

Tallinna Tehnikaülikool



ADCP mõõtmised hoovuste profiilide ja
põhjalähedase soolsuse ning hapniku sisalduse
andmete kogumiseks parvlaev „Estonia“ vraki
piirkonnas (detsember 2021 – märts 2022)

Aruanne

Riigihange nr 241513

TALLINN
2022

SISUKORD

ANNOTATSIOON	3
1. SISSEJUHATUS	4
2. ANDMED JA METOODIKA	6
3. TULEMUSED	10
3.1. HOOVUSED	10
3.2. METEOROLOOGILISTE TINGIMUSTE MÕJU HOOVUSTE DÜNAAMIKALE.....	14
3.3. SOOLSUS, TEMPERATUUR JA HAPNIK	18
4. KIHISTUNUD JA LÄBISEGUNENUD TINGIMUSTE VÕRDLUS.....	21
5. KOKKUVÕTE	24
LISA 1.....	25

ANNOTATSIOON

Uuringu eesmärgiks oli registreerida hoovuste vertikaalseid profile ja põhjalähedase kihi soolsust, temperatuuri ning hapniku sisaldust parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas talvistes tingimustes, kui veesambas ei esine sesoonset termokliini. Mõõtmisteks kasutati Aanderaa mõõtmisplatvormi SeaGuard II, millega olid ühendatud akustiline hoovuste profileerija, rõhu, elektrijuhtivuse, temperatuuri ja hapniku andurid. Uputatud poiga ühendatud ja merepõhja ankurdatud platvorm paigaldati Politsei ja Piirivalveameti laevalt „Raju“ parvlaev „Estonia“ vraki lähedusse 12. detsembril 2021 koordinaatidele 59° 23,0515' N, 21° 41,2294' E. Merepõhja sügavus mõõtmiste asukohas oli 80 m. Platvorm võeti merest välja Tallinna Tehnikaülikooli uurimislaevaga „Salme“ 21. märtsil 2022. Kogutud andmereal on toodud käesoleva aruande lisas. Aruandes kirjeldatakse hoovuste ajalist muutlikkust veesambas sügavuste vahemikus 34-76 m, st alates 4 m mere põhjast kuni 42 m ulatuses. Seoses vee hea läbipaistvusega on mõõtmistulemused pinnakihi ebausaldusväärsed (suure müra-signaali suhtega) ja neid käesolevas aruandes ei analüüsita. Tuuakse välja suurema hoovuse kiirusega perioodid süvakihis ja kasutades meteoroloogilisi andmeid mõõtmisperioodi kohta kirjeldatakse tugevate hoovuste esinemise tingimusi. Analüüsitakse põhjalähedase veekihi soolsuse ja lahustunud hapniku sisalduse ajalist muutlikkust parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas sesoonse kihistuse puudumisel detsembrist 2021 kuni märtsini 2022. Esitatud on ka kahe mõõtmisperioodi tulemuste võrdlev analüüs.

Töö on teostatud vastavalt Ohutusjuurduse Keskusega sõlmitud hankelepingule (riigihanke viitenumber 241513) 13. oktoobrist 2021.

Mõõtmiste läbiviimisel, andmete analüüsimisel ja aruande koostamisel osalesid Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituudi eksperdid Villu Kikas, Oliver Samlas, Kai Salm, Stella-Theresa Stoicescu ja Urmas Lips.

1. SISSEJUHATUS

Parvlaev „Estonia“ vraki asukohas Ava-Läänemere põhjasseinis ei ole okeanograafiliste parameetrite pikaajalisi mõõtmisi aastatel 1994-2021 teostatud. Esimesed pikemat ajaperioodi katvad mõõtmised teostati käesoleva projekti raames 10. juulist 2021 kuni 9. novembrini 2021. Nimetatud mõõtmised viidi läbi suveperioodil, mis vastab veesamba kihistunud tingimustele. Käesolevas aruandes analüüsitud mõõtmised teostati talveperioodil, mil sesoonne kihistus puudub ja veesammas on läbi segunenud kuni halokliinini. Kogutud andmete põhjal kirjeldatakse põhjalähedase kihi hoovuste, soolsuse ja hapnikutingimuste muutlikkust ning seost valitsevate meteoroloogiliste tingimustega ja/või füüsikaliste protsessidega ja võrreldakse tulemusi suviste mõõtmistulemustega.

Aruandes esitame mõõtmisandmed ja analüüsi hoovuste, temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse ajalist käiku ja muutlikkust parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas talvistes tingimusteks. Andmeid koguti perioodil 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

Töö käigus registreeriti hoovuste vertikaalsete profiilide ja põhjalähedase kihi soolsuse, temperatuuri ning hapniku sisalduse aegread sammuga üks tund. Mõõtmistel kasutati Aanderaa mõõtmisplatvormi SeaGuard II, millega olid ühendatud akustiline hoovuste profileerija, rõhu, elektrijuhtivuse, temperatuuri ja hapniku andurid. Mõõtmiste asukohas (59° 23,0515' N, 21° 41,2294' E; kõik koordinaadid aruandes on toodud WGS84 süsteemis) oli mere sügavus 80 m. Aruandes tuuakse välja muuhulgas maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhja lähedal ja analüüsitakse, millega need sündmused võisid seotud olla. Iseloomustatakse soolsuse ja hapnikutingimuste muutlikkust mere põhja lähedal talvistes tingimustes. Kõik kogutud andmed on kasutatavad mudeltulemuste valideerimiseks.

Aruande struktuur on järgmine. Peatükis 2 (Mõõtmised ja andmed) kirjeldatakse kasutatud aparatuuri, poijaama ülesehitust, andureid, kogutud andmeid ja analüüsimeetodeid. Samuti tuuakse välja analüüsis kasutatavad meteoroloogilised andmed.

Peatükis 3 on toodud tulemused. Alapeatükis 3.1 on kirjeldatud hoovuste ajalist muutlikkust veesambas vahemikus 4-46 m mere põhjast (st sügavusvahemikus 34-76 m). Eraldi on käsitletud põhjalähedase kihi dünaamikat. Graafiliselt on esitatud hoovuste aegread ja progressiivvektor diagrammid ning toodud on hoovuseid iseloomustavad statistilised näitajad, nagu maksimaalsed kiirused, perioodid, mil kiirus ületas teatud piiri (10 cm/s ja 20 cm/s) ja muud parameetrid.

Alapeatükis 3.2 on ERA5 andmete alusel kirjeldatud mõõtmisperioodil valitsenud meteoroloogilisi tingimusi, sh on toodud tuule statistika koos tuulte roosiga, maksimaalsed kiirused ja tuul nendel perioodidel, mil esinesid suuremad kiirused mere põhja lähedal. Analüüsitakse, mis võis olla mehhanism suurte hoovuskiiruste tekkel, st mis tuultega suured hoovusekiirused (sh missuguse suuna ning kiiruse mõttes) piirkonnas esinesid.

Alapeatükis 3.3 kirjeldatakse põhjalähedase kihi soolsuse ja lahustunud hapniku sisalduse muutlikkust läbi mõõtmisperioodi. Analüüsitakse muutlikkuse põhjuseid ja hapnikutingimuste seoseid hoovuste ja tuuletingimuste muutustega.

Teisel mõõtmisperioodil saadud tulemusi analüüsitakse ja võrreldakse tulemustega esimesest perioodist neljandas peatükis.

Peatükis 5 esitatakse lühidalt mõõtmistulemuste kokkuvõtted ja järeldused.

2. ANDMED JA METOODIKA

Töös kasutati Aanderaa mõõtmisplatvormi SeaGuard II, millega olid ühendatud akustiline hoovuste profileerija (Doppler Current Profiler DCPS, sn 505), rõhu andur (Pressure Sensor 4117, sn 1857), elektrijuhtivuse andur (Conductivity Sensor 4319, sn 1545) ja hapniku andur (Oxygen Optode 4835, sn 3766). Kõik kolm viimati nimetatud andurit olid varustatud ka temperatuurianduriga. Andurite spetsifikatsioonid on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Käesolevas töös kasutatud Aanderaa SeaGuard II platvormiga ühendatud andurite spetsifikatsioonid.

Andur/parameeter	Ühik	Ulatus	Lahutus	Täpsus
DCPS kiirus	cm/s	0-500	0,1	0,3
DCPS suund /kompass	kraad	0-360	0,1	2
Rõhk	MPa	0-60	0,0001% skaalast	0,01% skaalast
Elektrijuhtivus	S/m	0-7,5	0,0002	0,005
Hapnik	µM	0-500	1	8
Hapnik	%	0-150	0,4	5
Temperatuur	°C	-4 - +36	0,001	0,03

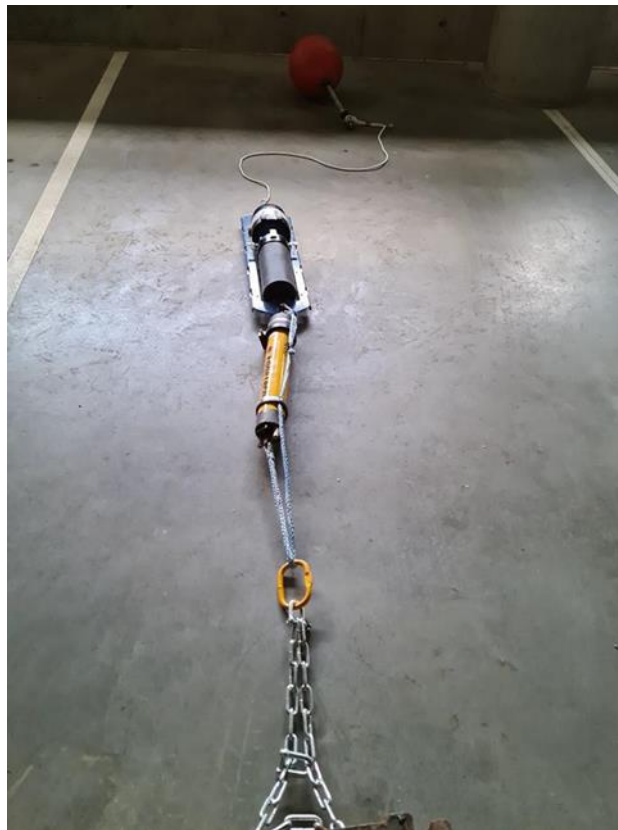
Hoovuste profileerija (DCPS) muud tehnilised andmed olid järgmised: sagedus 600 kHz, vertikaalne mõõtmisulatus kuni 80 m, kihi paksus (vertikaalne lahutus) 0,5-5 m, varjatud kaugus andurist esimese mõõtmisvahemikuni 1 m, saatjaid/vastuvõtjaid 4, kaldenurga mõõtja vertikaali suhtes täpsusega 0,5 kraadi.

Mõõtmisel kasutati järgmisi profileerija seadistuse parameetreid: mõõtmisvahemik alates sügavusest 76 m (st 4 m merepõhjast) kokku 40 kihti, millest 35 olid vees ja oluliselt häirimata veepinnalt tagasi peegeldunud signaalist. Mõõtmisajaks oli 1 tund. Hoovuse kiiruse ja suuna tulemusena registreeriti iga täistunni jaoks ca 1,5 minuti jooksul saadud 30 signaali keskmine väärtus. Kuna talvistes tingimustes oli suhteliselt paks mere ülakiht täielikult läbi segunenud ja vesi ei sisaldanud hõljuvaineid, siis kaugemalt kui 40 m profileerijast tagasi peegeldunud helisignaal oli suhteliselt nõrk. Andmete kvaliteedinäitajate põhjal (müra ja signaali suhe) on käesolevas aruandes esitatud analüüsist ülemise kihi andmed välja jäetud, st analüüsitud on andmeid sügavusvahemikus 34-76 m. Originaalandmetena (koos kvaliteeti iseloomustavate parameetrite väärtustega) on tulemused aruandele lisatud.

SeaGuard II platvormi paigaldamiseks mere põhjale kasutati sama poi ja ankruga varustatud süsteemi, mis oli kasutusel ka esimesel mõõtmisperioodil (vt joonis 2.1). Piisava raskusega ankru külge oli kinnitatud kett, millega ühendati akustiline päästik ja sellega seekli abil SeaGuard II anduritega. Süsteemi pikkus ankrust hoovuste profileerijani (DCPS) oli 3 m, mis koos varjatud mõõtmisvahemikuga 1 m määras esimese mõõtmisvahemiku alumise piiri kauguse põhjast 4 m. SeaGuard II platvormi vertikaalne asend veesambas tagati piisavalt suure ujuvusega poiga, mis oli ühendatud platvormiga ca 3 m pikkuse otsaga.

Põhjalähedase veekihi temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse andmed on käesolevas aruandes toodud SeaGuard II platvormi sügavuselt (77 m, mis on 3 m merepõhjast). Temperatuur on esitatud mõõdetud *in-situ* temperatuurina ühikutes °C. Soolsuse väärtused on arvutatud mõõdetud temperatuuri, elektrijuhtivuse ja rõhu põhjal kasutades TEOS-10¹ seoseid ja andmed on esitatud ühikutes g/kg. Hapniku sisaldus on toodud lahustunud hapniku kontsentratsioonina µM (ehk µmol/l) ja küllastusprotsendina.

Mõõtmissüsteem paigaldati merre Politsei- ja Piirivalveameti laevalt „Raju“ parvlaev „Estonia“ vraki lähedusse 12. detsembril 2021 koordinaatidele 59° 23,0515' N, 21° 41,2294' E. Suurema ala topograafia koos uuringute piirkonnaga on toodud joonisel 2.2 ning piirkonna detailsem topograafia koos mõõtmissüsteemi asukohaga mõlema mõõtmisperioodi jooksul ja kasutatud meteoroloogiliste andmete ERA5 punkti asukohaga joonisel 2.3. Merepõhja sügavus mõõtmiste asukohas oli 74 m. Platvorm võeti merest välja Tallinna Tehnikaülikooli uurimislaevaga „Salme“ 21. märtsil 2022. Kogutud andmed nende algsel kujul ja töödelduna füüsikalistesse ühikutesse on toodud käesoleva aruande lisas.

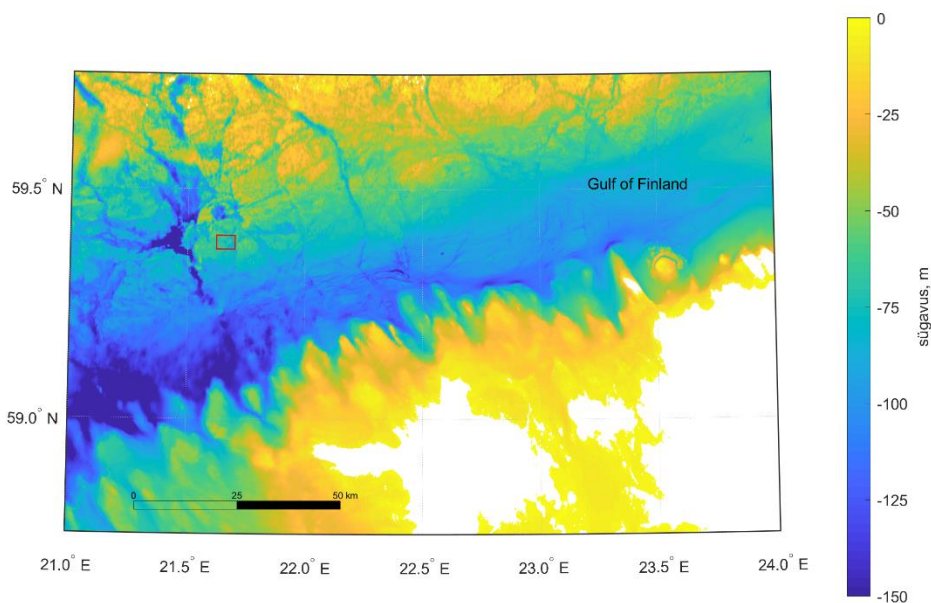


Joonis 2.1. Poijaama konfiguratsioon – poi, Aanderaa SeaGuard II platvorm koos akustilise hoovuse profileerijaga ja hapniku, temperatuuri ja elektrijuhtivuse anduritega ning akustiline päästik, mis oli kinnitatud ankru külge.

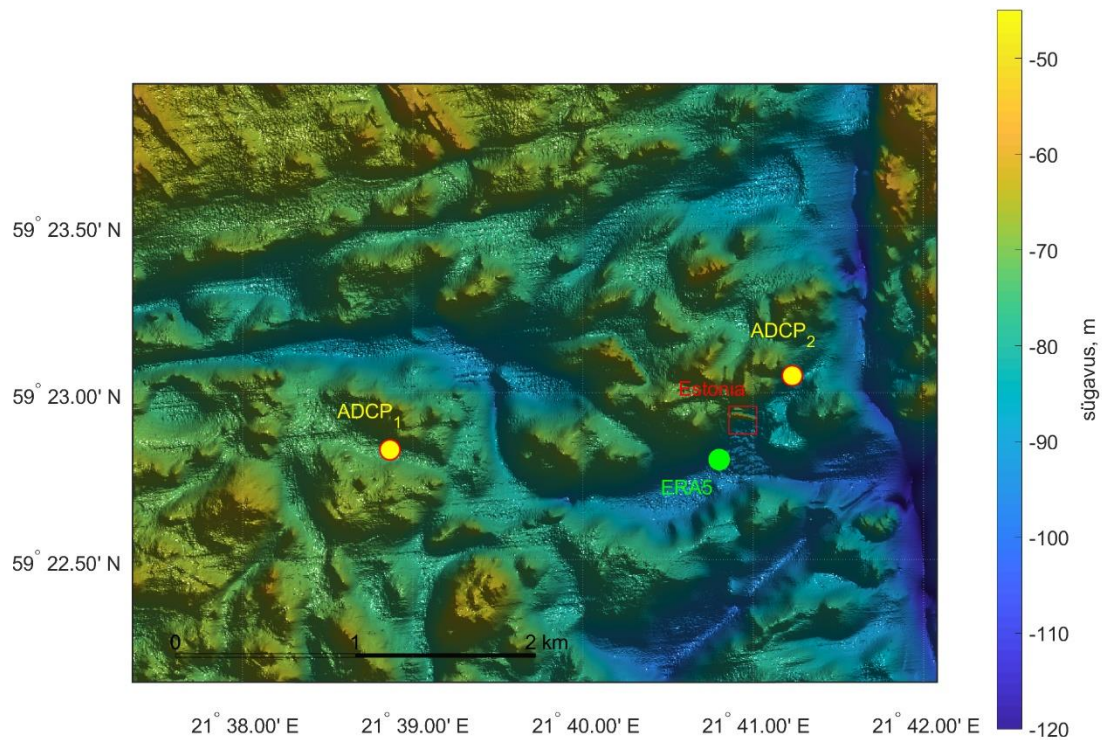
¹ IOC, SCOR and IAPSO: The International Thermodynamic Equation of Seawater - 2010: Calculation and Use of Thermodynamic Properties, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56. UNESCO, 196, 2010.

Möödistuste piirkond jääb Hiiumaast loodesse Soome majandusvööndisse, mis geograafiliselt kuulub Ava-Läänemere põhjasseini. Suures mastaabis on tegu piirkonnaga, kus mere sügavus suureneb põhjast lõuna poole (joonis 2.2). Kui vaadelda piirkonna topograafiat detailsemalt, siis on parvlaev „Estonia“ vraki ja möödmiste asukoha vahetus läheduses tegu väga varieeruva põhjaga (joonis 2.3). Kui esimesel perioodil asus möödistusjaam vrakist ligikaudu 2 km läänes, siis teisel perioodil paigutati platvorm ligikaudu 500 m vrakist kirdesse. Möödistusjaam asus sügavama põhja-lõuna suunalise vao läänenõlva lähedal kirde-edela suunalises vähem väljendunud kanalis, mis ulatub kuni parvlaev „Estonia“ vrakini.

Meteoroloogiliste tingimuste iseloomustamiseks möödmisperioodil on töös kasutatud ERA5 andmeid analoogselt esimesele perioodile, st kasutati ERA5 andmebaasi meteoroloogilisi andmeid reanalüüsi produktist *“ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present”*. Andmebaasist eraldati tuule u ja v komponentide andmed 10 m kõrgusel merepinnast perioodist detsember 2021 kuni märts 2022. Andmed on ühe tunnise ajalise lahutusega ja 0.25° x 0.25° horisontaalse lahutusega. Analüüsis kasutati andmeid möödmiste asukohale lähimast ERA5 võrgupunkti (59° 22,8' N, 21° 40,8' E; vt joonis 2.3).



Joonis 2.2. Ava-Läänemere põhjaosa ja Soome lahe lääneosa topograafia koos möödistuste asukohaga (punane ristkülik).

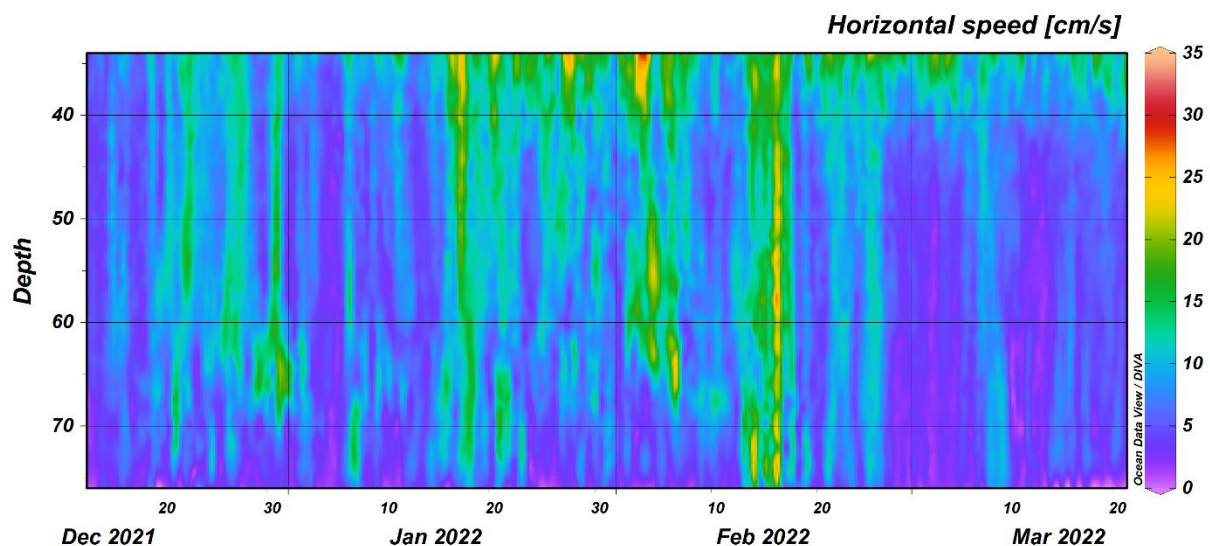


Joonis 2.3. Parvlaev „Estonia“ vraki piirkonna detailsem topograafia koos parvlaeva (punane ruut, Estonia, koordinaadid 59° 22.9252' N, 021° 40.8451' E), meteoroloogiliste andmete punkti (roheline ring, ERA5) ja mõõdistusplatvormi asukohtadega esimesel mõõdistusperioodil (kollane ring, ADCP₁) ja teisel mõõdistusperioodil (kollane ring, ADCP₂).

3. TULEMUSED

3.1. HOOVUSED

Hoovuse kiiruse vertikaalset jaotust ja selle ajalist muutlikkust mõõdistusperioodil iseloomustab joonis 3.1. Jooniselt on näha, et talvise mõõdistusperioodi jooksul esinesid ainult mõned lühiajalised tugevamate hoovustega perioodid. Mõõdistuse esimeses pooles (kuni veebruari keskpaigani) oli hoovuste muutlikkus mere põhjalähedases kihis (64-76 m) erinev kõrgemal registreeritud hoovuste režiimist. See oli ilmselt tingitud halokliini esinemisest sügavusvahemikus 60-70 m. Peale veebruari keskpaika, mil registreeriti kõige tugevamad hoovused kogu veesambas sügavusel 40 m kuni mere põhjani, muutusid hoovused kogu vaadeldavas kihis (40-76 m) sünkroonselt. See tähendab, süvakihis tiheduse hüppekihti ei esinenud ja hoovuste režiim ühtlustus. Lisaks ei esinenud mõõdistuse viimasel kolmandikul enam peaaegu hoovuse kiiruseid üle 10 cm/s.

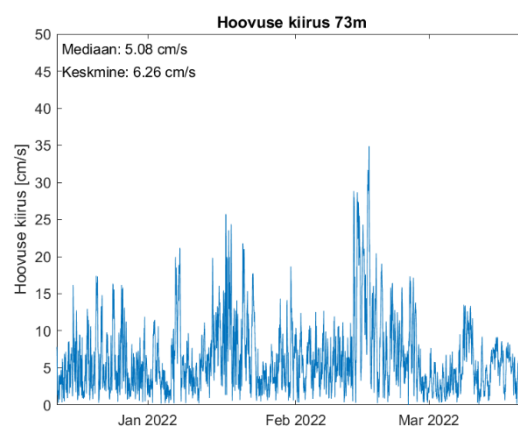
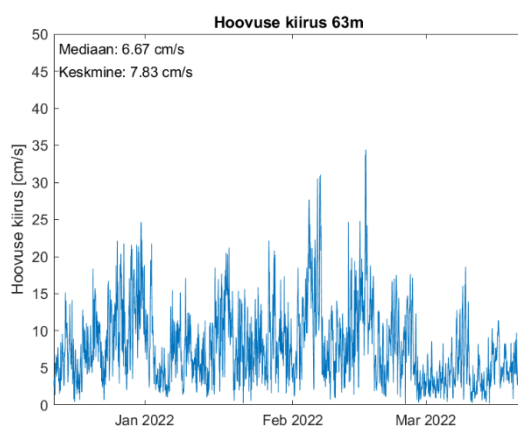
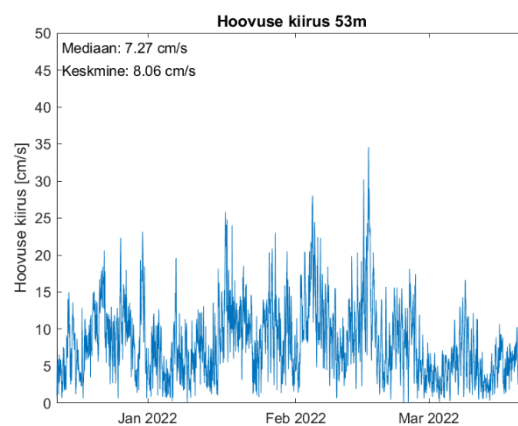
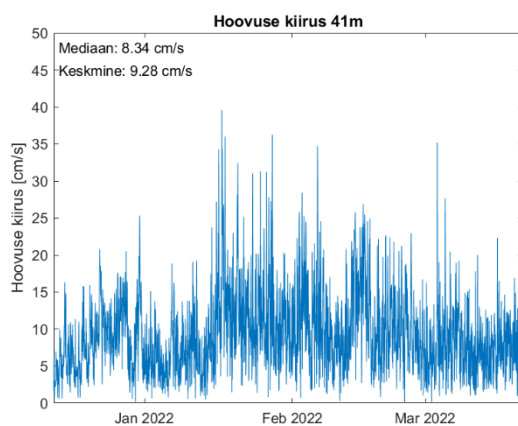


Joonis 3.1. Hoovuse kiiruse vertikaalse jaotuse muutus ajas parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas sügavusvahemikus 34-76 m kogu mõõtmisperioodi jooksul ajavahemikus 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

Põhjalähedase veekihi hoovuste muutlikkust on iseloomustatud allpool kiiruse statistiliste parameetritega nagu keskmine kiirus ja maksimaalne kiirus (tabel 3.1). Analüüsiks valiti veekiht paksusega kuni 16 m (mere põhjast 4 kuni 20 m). Keskmine hoovuse kiirus mõõdistusperioodil oli vaadeldavas kihis 6,6 cm/s ja mediaan keskmine 5,3 cm/s. See tähendab, üle poole ajast oli hoovuse kiirus selles 16 m paksuses kihis 5,3 cm/s või vähem. Maksimaalsed hoovuse kiirused ulatusid kuni 32,6-36,9 cm/s. Need maksimumid olid kõikidel vaadeldud sügavustel seotud 13.-16. veebruaril 2022 kogu veesambas registreeritud tugeva hoovuse sündmusega.

Tabel 3.1. Registreeritud hoovuse kiiruse statistilised näitajad põhjalähedases kihis 2-m kihtide kaupa parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ajavahemikus 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

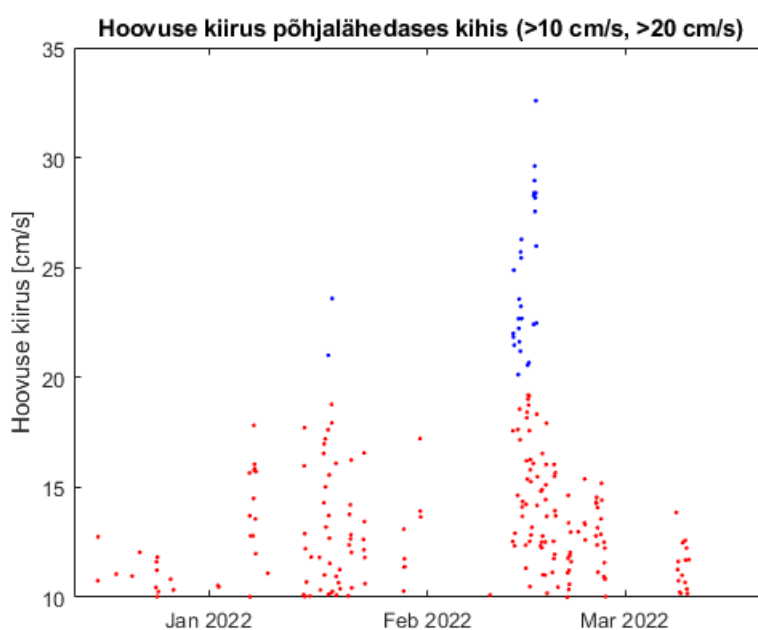
Sügavus (m)	Aritmeetiline keskmine (cm/s)	Mediaan keskmine (cm/s)	Maksimaalne kiirus (cm/s)
74-76	5,1	3,8	36,9
72-74	4,7	3,6	32,6
70-72	6,3	5,1	34,9
68-70	6,5	5,3	34,6
66-68	6,9	5,6	33,7
64-66	7,5	6,4	34,8
62-64	7,7	6,6	34,5
60-62	7,8	6,7	34,4
Keskmine/ max	6,6	5,3	36,9



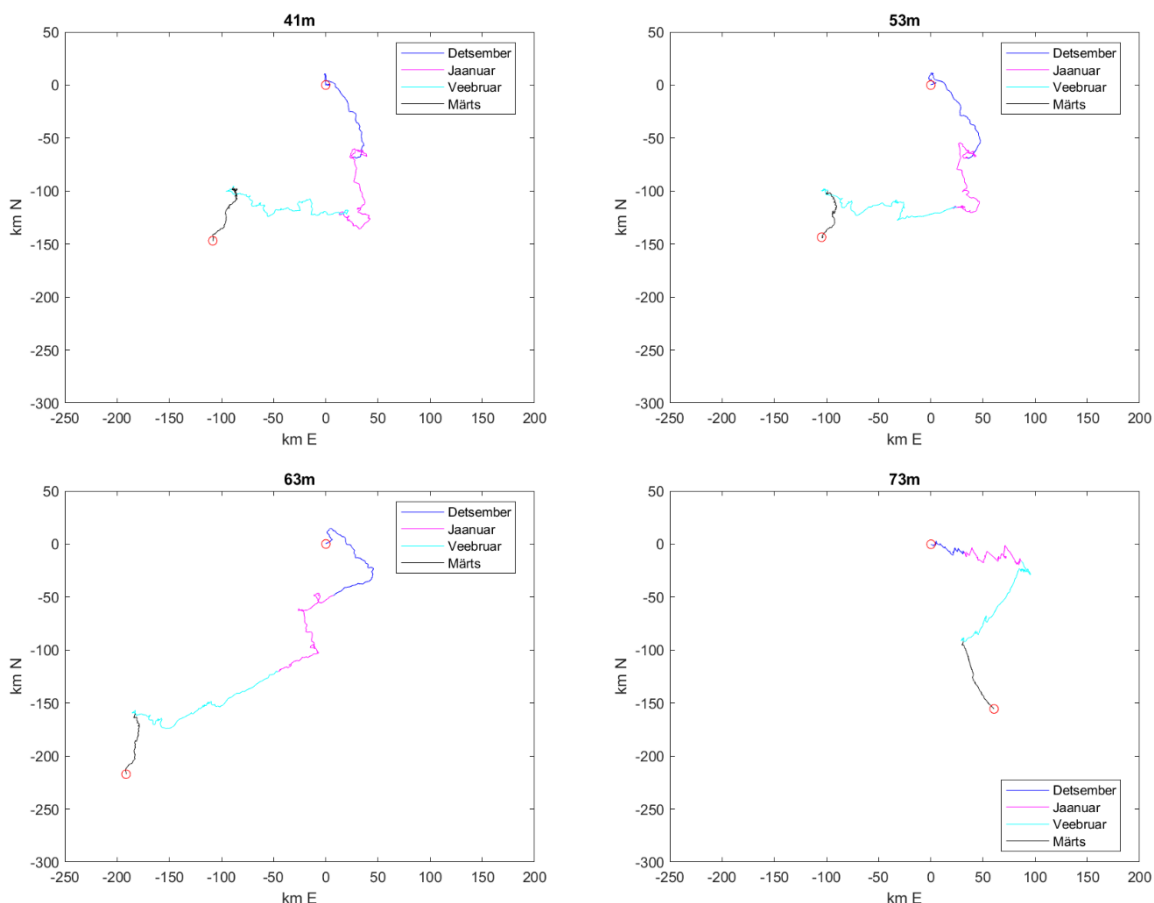
Joonis 3.2. Hoovuse kiiruse ajaline käik 40-42 m, 52-54 m, 62-64 m ja 72-74 m sügavusel parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas kogu mõõtmisperioodi jooksul ajavahemikus 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

Võrreldes mõõdetud hoovuse kiirusi erinevate kihtide vahel (joonis 3.2), on samuti näha, et maksimaalsed kiirused sügavamatel horisontidel esinesid nimetatud tugevate hoovuste sündmuse ajal 13.-16. veebruaril. Veesambas ülalpool oli tugevamate hoovuste sündmusi ka teistel perioodidel. Näiteks sügavusvahemikus 40-42 m ületasid maksimaalsed kiirused 35 cm/s ka jaanuaris, veebruari alguses ja märtsi alguses 2022 (joonis 3.2).

Põhjalähedases veekihis oli hoovuse kiirus periooditi suurem kui 20 cm/s ainult ajavahemikus 13.-16. veebruar 2022 ja üksikutel juhtudel 17.-18. jaanuaril 2022 (joonis 3.3). Keskmiselt olid põhjalähedased hoovused tugevamad samuti nendel perioodidel, st veebruari keskpaigas ja teises pooles ning jaanuari teises pooles.



Joonis 3.3. Hoovuse kiirused väärtusega 10-20 cm/s (punased punktid) ja üle 20 cm/s (sinised punktid), mõõdetud 72-74 m sügavusel parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ajavahemikus 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

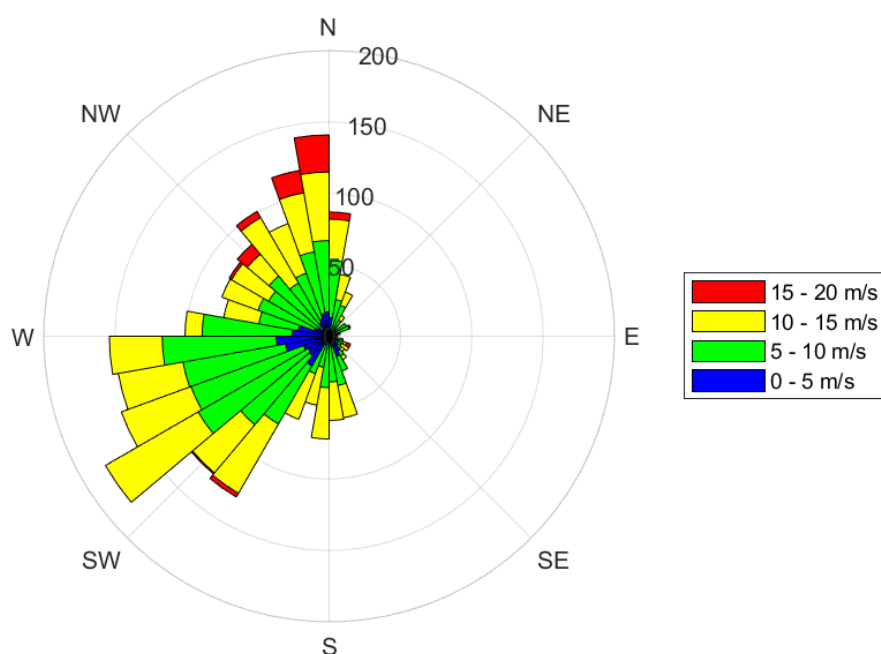


Joonis 3.4. Hoovuse progressiivvektor diagrammid 40-42 m, 52-54 m, 62-64 m ja 72-74 m sügavusel parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas kogu mõõtmisperioodi jooksul ajavahemikus 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

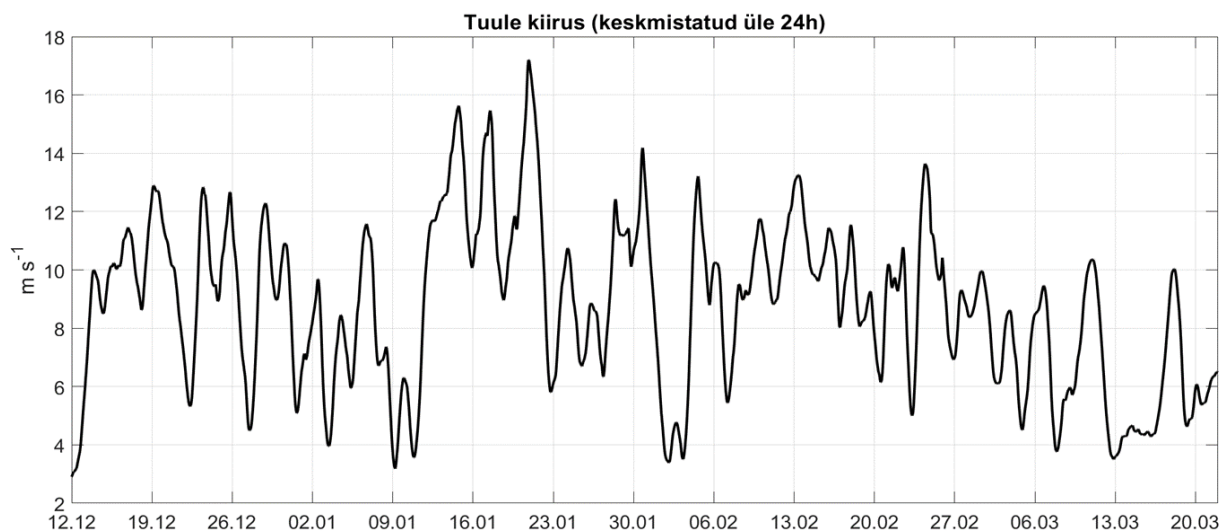
Progressiivvektor diagrammid näitavad voolamise valdavalt suunda ja tugevust pikemate perioodide jooksul. Jooniselt 3.4 on näha, et põhjalähedases kihis (73 m) oli voolamine suunatud detsembris-jaanuaris itta, veebruaris (mil esinesid ka maksimaalsed hoovuse kiirused) edelasse, st mõõtmisplatvormist Estonia vraki suunas ja märtsis valdavalt kagusse. Kümme meetrit kõrgemal veesambas oli hoovus kogu mõõtmisperioodil valdavalt suunatud edelasse, välja arvatud detsembri keskpaik (st mõõtmiste alguses). Sügavusel 53 m ja 43 m olid voolamine ja selle muutused suhteliselt sarnased, st detsembris-jaanuaris oli ülekaalus voolamine lõunasse, veebruaris läände ja märtsis, sarnaselt alumiste veekihtidega, lõunasse.

3.2. METEOROLOOGILISTE TINGIMUSTE MÕJU HOOVUSTE DÜNAAMIKALE

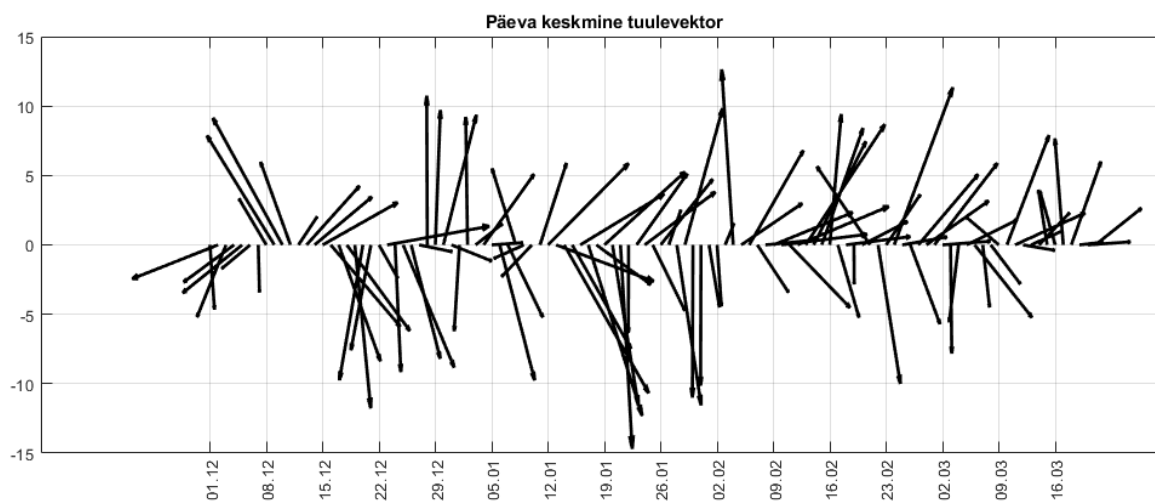
Mõõdistusperioodi jooksul olid piirkonnas valdavaks edelatuuled, kuid sageli esines ka suhteliselt tugevaid põhja- ja loodetuuli (joonis 3.5). Mõõdistusperioodil peaaegu puudusid tuuled idast (st kogu sektorist kagu ja kirde vahel), mis ei ole talvisele perioodile iseloomulik. Tavaliselt on teatud perioodide jooksul valdavaks ka ida-kirdetuuled. Tuule kiirus vaadeldaval perioodil oli maksimaalne 17. jaanuaril 2022, kus kiirus tunni väärtusena ulatus kuni 22 m/s. Üle 24 tunni silutud graafikult (joonis 3.6) on näha, et pikemaajaliselt (ööpäevases ajamastaabis) esines maksimaalne tuule kiirus 19. jaanuaril. Sel perioodil (14.-22. jaanuar) vaheldusid põhja- ja edelatuuled ning maksimaalse päeva keskmise väärtustega olid põhjast puhuvad tuuled (joonis 3.7).



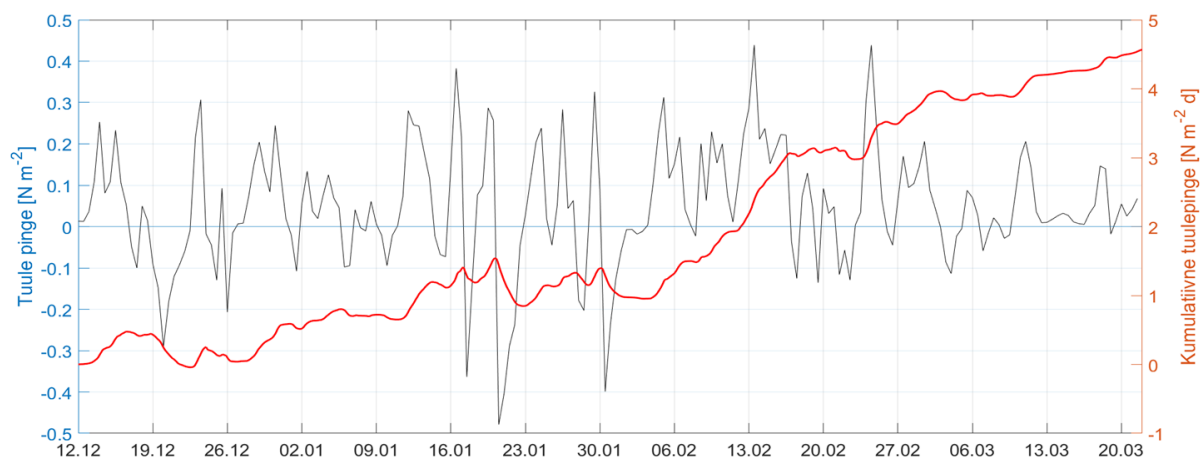
Joonis 3.5. Tuulte roos mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal (tuule kiirus 10 m kõrgusel merepinnast) mõõdistusperioodil 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.



Joonis 3.6. Üle 24 tunni silutud tuule kiirused mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal mõõdistusperioodil detsembrist 2021 kuni märtsini 2022.



Joonis 3.7. Ööpäevased keskmised tuule vektorid mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal detsembrist 2021 märtsini 2022.

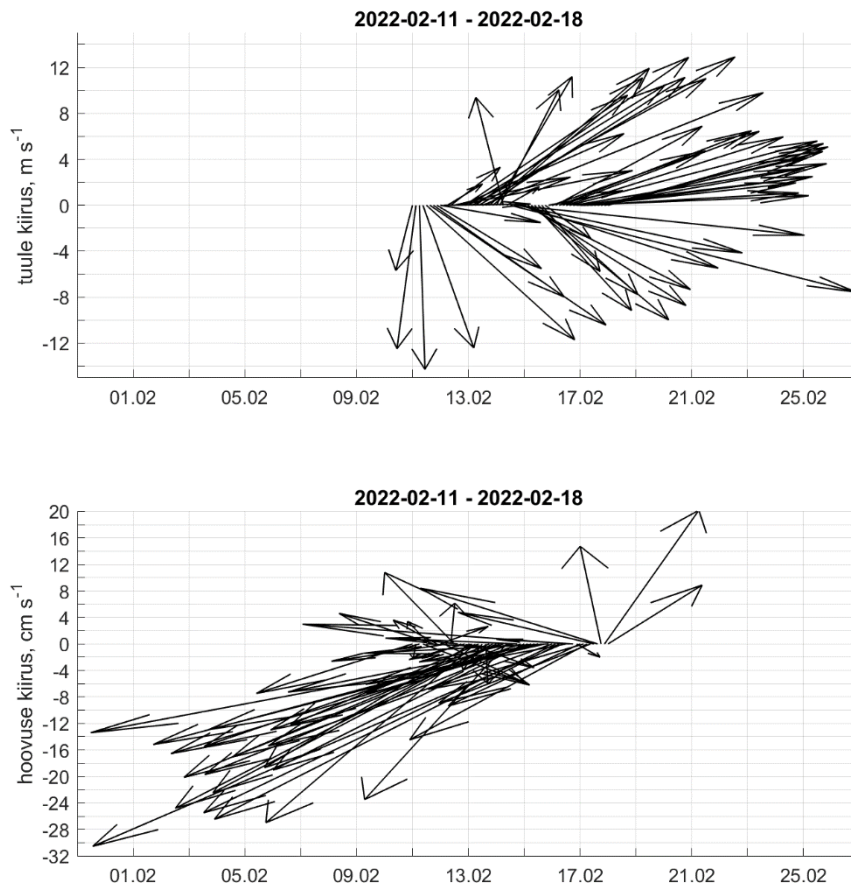


Joonis 3.8. Üle 6 tunni silutud tuule pinge (must joon) ja kumulatiivne tuulepinge (punane joon) mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal mõõdistusperioodil 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022. Esitatud on tuulepinge komponent positiivse suunaga kirdesse (pööratud 45 kraadi põhjasuunast päripäeva).

Tuulepinge aegrida, mille positiivsed väärtused vastavad edelatuulele, st nende mõjule mere pinnakihi, on esitatud joonisel 3.8. Kuna kogu mõõdistusperioodi jooksul on ülekaalus positiivsed väärtused, siis näitab see samuti, et valdasid edelatuuled. Eelpool nimetatud perioodil jaanuari teises pooles aga esines ka väga suuri tuulepingeid vastupidisest suunast, mis vastab esinenud tugevatele põhjatuulele (joonis 3.8). Kumulatiivselt muutus tuulepinge oluliselt ja pidevalt ühes suunas perioodil 5.-16. veebruaril 2022. Sel perioodil valdasid edelatuuled, mis põhjustasid selle perioodi lõpus (13.-16. veebruaril) ka kõige tugevamad hoovused ja nende võnkumised läbi kogu veesamba, sh põhjalähedases kihis.

Valdavate tuulte ja erinevatel sügavustel domineerinud voolamise suundade võrdlus näitab, et voolamine veesambas oli mõjutatud valdavate tuulte poolt, kuid kogu analüüsitava kihis esines selge erinevus tuule suuna ja hoovuse suuna vahel. Detsembris ja jaanuaris, kui tuuled olid muutlikud, st vaheldusid edela-lõuna ja põhja tuuled, oli voolamine põhja lähedal (st kuni halokliinini; vt joonis 3.4, 73 m) itta. Kõrgemal veesambas toimus ülekannet lõuna suunas. Tugevad edelatuuled põhjustasid voolamise suuna muutuse kõigil sügavustel – süvakihi sügavamas osas (vt joonis 4.3, sügavused 73 ja 63 m) oli voolamine suunatud edelasse (st vastupidises suunas võrreldes tuule suunaga) ja vahekihi (43 ja 53 m) oli voolamine suunatud läände. Mõõtmisperioodi viimasel kolmel nädalal (märtsis 2022), kui tuuled olid suhteliselt muutlikud (esines tuuli edelast, läänest ja loodest), oli voolamine kogu vaadeldavas kihis suhteliselt nõrk ja suunatud lõunasse. Võib väita, et nagu ka mõõtmiste esimeses pooles, oli põhjalähedase kihi voolamine valdavalt vastassuunas võrreldes tuule suunaga. See tähendab, et ka läbisegunenud veesamba tingimustes on süvakihi hoovused mõjutatud tuulest ja kaudne mõju avaldub ilmselt tänu veetaseme gradiendi tekkele. Reaktsiooniks on hoovuste võnkumine, kusjuures valdav voolamise suund (jääkhoovus) on tuulele vastupidises suunas.

Käesoleva töö kontekstis oli oluline tuvastada meteoroloogilised tingimused, mil mõõdeti maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhjalähedases veekihi. Analüüsid detailsemalt üheaegseid muutusi tuuletingimustes ja hoovustes on näha, et maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhja lähedal olid seotud pikema aja jooksul puhunud läänekaarte tuultega (valdav tuule suund oli edelast; joonis 3.9). Põhjalähedane hoovus oli aga suunatud peaaegu 180 kraadi vastassuunas. Hoovuse vektori aegrida näitab, et hoovus oli võnkuva iseloomuga, st suured kiirused vaheldusid väiksemate kiirustega samas suunas. Võib ka väita, et hoovuse valdav suund mere põhja lähedal oli mõjutatud põhja topograafia poolt – kui alumistes kihtides oli hoovus suunatud edelasse, siis 20 m põhjast kõrgemal oli hoovuse suunatud valdavalt läände. Sellest võib järeldada, et ka parvlaev Estonia, mis asus hoovusmõõtjast edelas piki veidi sügavamat topograafilist kanalit, oli sel perioodil mõjutatud tugevate edelasuunaliste hoovuste poolt. Samas ei ole konkreetselt nendes tingimustes esinenud hoovuse kiirused väga suured, kuid ka tuule tugevus, mis põhjustas hoovuse kiirusi üle 30 cm/s, ei vastanud veel tormituultele – maksimaalsed kiirused olid kuni 15 m/s.



2022

Joonis 3.9. Tuule (ülemine paneel) ja põhjalähedase veekihi hoovuse (72-74 m; alumine paneel) vektorid suurimate hoovuskiirustega perioodil – 11.-18. veebruaril 2022.

3.3. SOOLSUS, TEMPERATUUR JA HAPNIK

Põhjalähedase veekihi soolsuse, temperatuuri ja hapniku sisalduse muutlikkust parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas iseloomustavad tabelis 3.2 toodud nende parameetrite mõõdistusperioodi keskmised, minimaalsed ja maksimaalsed väärtused. Temperatuur muutus vahemikus 3,15–6,49 °C, soolsus vahemikus 7,63–10,89 g/kg ja hapniku sisaldus vahemikus 0–368 µM või 0–88 % küllastusest. Mõõdistusperioodi keskmine temperatuur põhjalähedases veekihis oli 5,39 °C ja soolsus 9,50 g/kg. Hapnikutingimusi ei iseloomusta niivõrd keskmine kontsentratsioon vaid asjaolu, et mõõtmisperioodi esimeses pooles valdavad olnud anoksilised tingimused asendusid veebruari keskpaigas hapnikurikaste tingimustega, st mõõtmised katsid kaks täiesti erinevate hapnikutingimustega perioodi.

Tabel 3.2. Registreeritud minimaalsed, maksimaalsed ja keskmised temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse väärtused põhjalähedases veekihis parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ajavahemikus 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

Parameeter	Miinum	Maksimum	Keskmine
Temperatuur (°C)	3,15	6,49	5,39
Soolsus (g/kg)	7,63	10,89	9,50
Hapnik (µM)	0	368	99
Hapnik (%)	0	88	24

Mõõtmisperioodile on iseloomulik anoksiliste või väga vähese hapnikusisaldusega (hüpoksiliste) tingimuste esinemine väga pika aja jooksul mõõtmiste algusest kuni veebruari keskpaigani. Anoksiliste ja hüpoksiliste tingimustega 2021. a detsembrist kuni 2022. a veebruari keskpaigani kaasnesid ka põhjalähedase veekihi kõrgemad soolsuse väärtused (joonis 3.10) – soolsus muutus vahemikus 9,5 kuni 10,9 g/kg. Jaanuari esimeses pooles, kui soolsus oli selle perioodi madalaim, tõusis ka hapniku kontsentratsioon ajutiselt üle 10% küllastusest, kuid peamiselt valdasid piirkonnas anoksilised tingimused. Põhjalähedase veekihi temperatuur varieerus kogu sel hapnikuvaegusega perioodil vahemikus 5,9 kuni 6,5 °C (joonis 3.11).

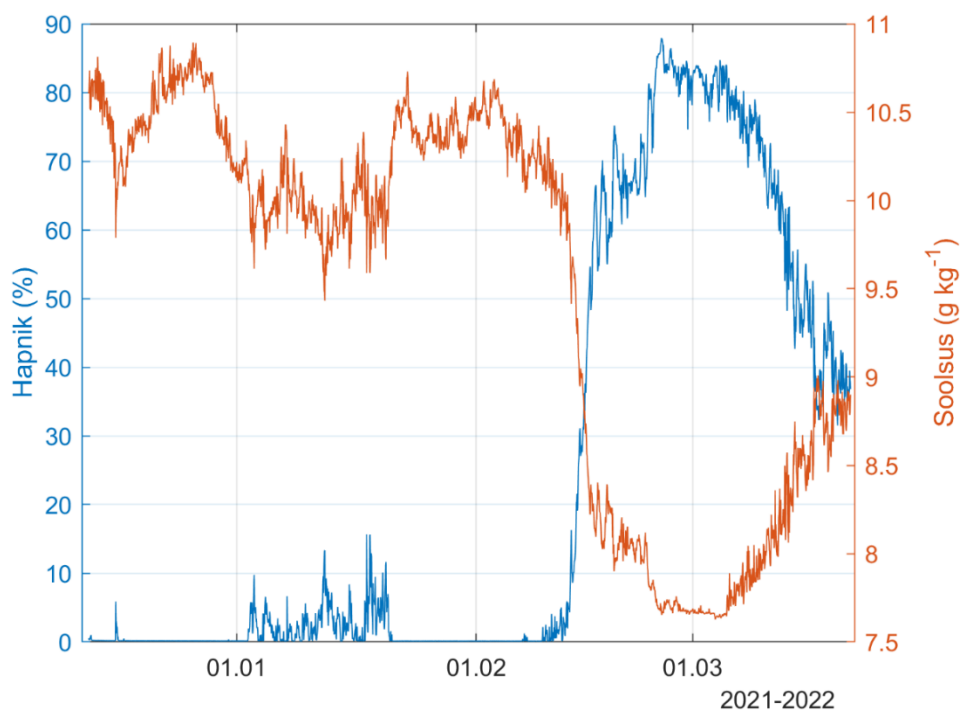
Oluline muutus toimus piirkonnas veebruari keskpaigas, mil hapnikuvaene vesi mere põhja lähedal asendus teise veemassiga, kus hapniku kontsentratsioon oli suhteliselt kõrge (ajutiselt üle 80% küllastuse kontsentratsioonist), soolsus langes kuni väärtuseni 7,7 g/kg ja temperatuur kuni väärtuseni 3,2 °C. Sarnaseid muutusi on talvel tugevate edela-läänte tuultega registreeritud Soome lahe lääneosas 2011. a ja 2014. a talvel (Liblik et al., 2013²; Lips et al., 2017³). Veemasside asendumine ja

² Liblik, T., Laanemets, J., Raudsepp, U., Elken, J., Suhhova, I. (2013). Estuarine circulation reversals and related rapid changes in winter near-bottom oxygen conditions in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Science*, 9, 917–930. DOI: 10.5194/os-9-917-2013.

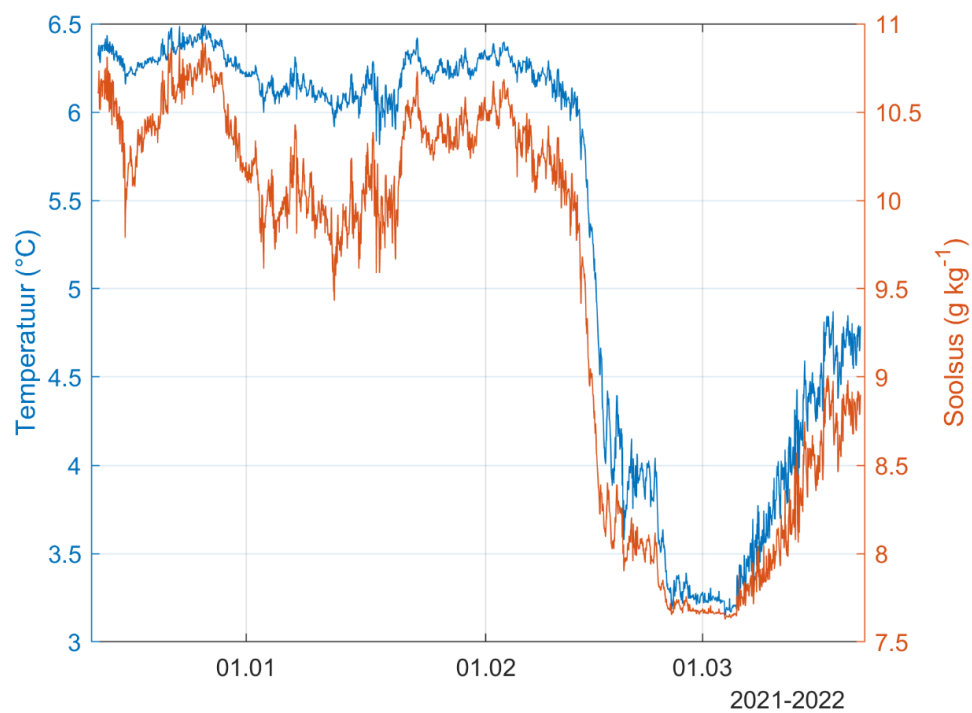
³ Lips, U., Laanemets, J., Lips, I., Liblik, T., Suhhova, I., Suursaar, Ü. (2017). Wind-driven residual circulation and related oxygen and nutrient dynamics in the Gulf of Finland (Baltic Sea) in winter. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 195, 4–15. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.10.006.

stratifikatsiooni nõrgenemine (kuni stratifikatsiooni kollapsini) on seotud tuulte poolt otseselt mõjutatud pinnakihi liikumisega tuule suunas ja süvakihi vee liikumisega vastassuunas. See tähendab, et muutused vee parameetrites on seotud nii horisontaalse transpordiga (antud juhul Estonia vraki piirkonda kirdest-idast, st Soome lahe poolt) ja vertikaalse segunemisega.

Märtsi algusest mõõdistusperioodi lõpuni kasvasid nii temperatuur kui ka soolsus ning samaaegselt vähenes hapniku kontsentratsioon (joonised 3.10-3.11). See tähendab, et aeglaselt liikus piirkonda tagasi soolasem ja väiksema hapniku sisaldusega veemass. Selline vee liikumine vastab tavapärase nn estuaarsele tsirkulatsiooni taastumisele nõrgemate tuulte tingimustes. Oluliseks tulemuseks käesolevast mõõtmisperioodist on saadud teadmine, et reisipraami Estonia piirkonnas võivad mere põhja lähedal esineda väga pikad hapnikuvaegusega perioodid, mis teatud meteoroloogiliste tingimuste saabumisel asenduvad samuti suhteliselt pikaajaliste perioodidega, mil hapniku sisaldus on kõrge. Taoline hapnikutingimuste varieerumine soodustab metallide korrodeerumist merekeskkonnas.



Joonis 3.10. Veeklahustunud hapniku sisalduse (%) sinine joon) ja soolsuse (g/kg; punane joon) ajaline käik põhjalähedases veekihis parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.



Joonis 3.11. Temperatuuri (°C; sinine joon) ja soolsuse (g/kg; punane joon) ajaline käik põhjalähedases veekihis parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022.

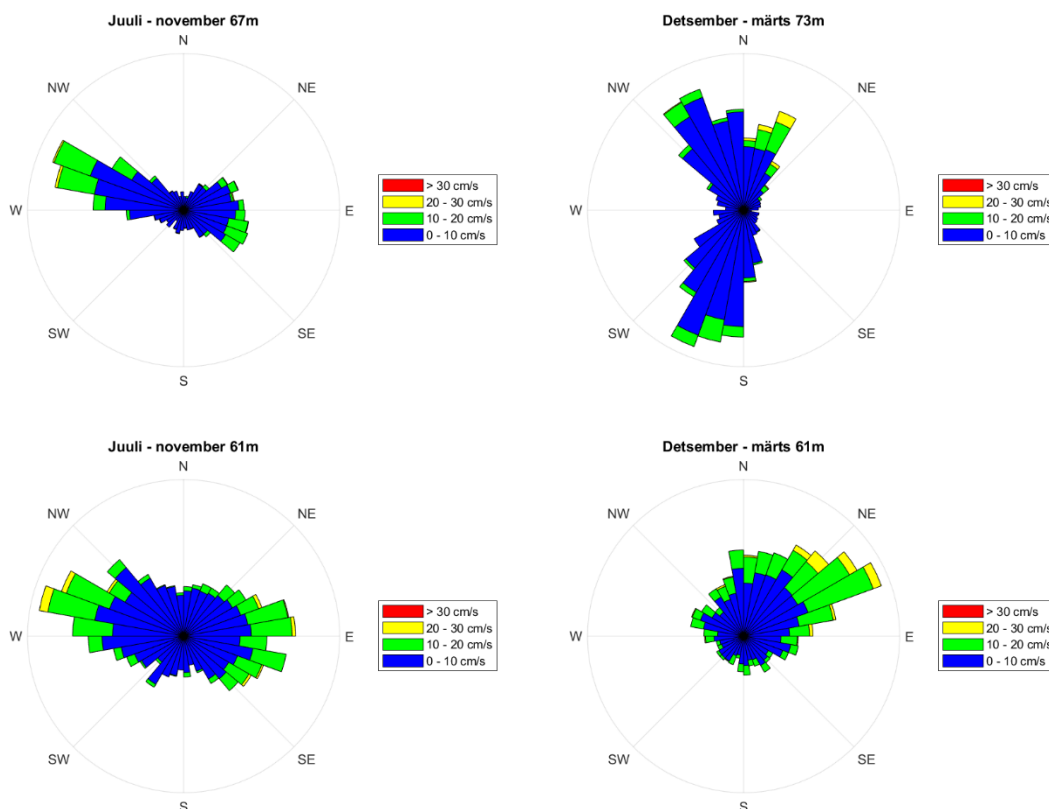
4. KIHISTUNUD JA LÄBISEGUNENUD TINGIMUSTE VÕRDLUS

Töö eesmärgiks oli registreerida piisavalt pikad hoovuste aegread mere põhjalähedases kihis, et iseloomustada hoovuste režiimi nii kihistunud veesamba tingimustes kui talvistes, nõrgema vertikaalse kihistusega tingimustes. Mõlemal perioodil olid valdavaks piirkonnas edelatuuled, selle erinevusega, et talvel esinesid ka tugevad põhjatuuled ja puudusid peaaegu tuuled idakaarest, kuid suvel-sügisel puhusid vähesel määral ka kirde- ja kagutuuled. Tuule kiirused olid keskmiselt suuremad talvisel perioodil, mil maksimaalne ööpäeva keskmine tuule kiirus ületas perioodil 14.-22. jaanuaril 2022 aegajalt väärtust 15 m/s. Kumulatiivne tuulepinge, mis iseloomustab tuule mõju mere pinnakihi tsirkulatsioonile pikema aja jooksul, oli mõlemal perioodil sarnane selles osas, et kumulatiivselt tekitas tuul pinnakihi voolamist itta. See vastab Läänemere piirkonna tavapärasele tuulerežiimile. Juulis-novembris esinesid ka lühemaajalised perioodid, mil tugevad tuuled sundisid pinnakihi vett lääne-edela suunas liikuma.

Põhjalähedase kihi hoovuse kiiruse statistilised väärtused kahel perioodil oluliselt ei erinenud. Mõlema mõõtmisperioodi maksimaalsed hoovuse kiirused 20 m paksuses kihis mere põhja lähedal olid 35-36 cm/s. Mediaankeskmiused kiiruse väärtused olid veidi suuremad kihistunud tingimustes – 6,0 cm/s võrreldes 5,3 cm/s talvisel perioodil. Mõlemal perioodil esinesid lühemajalised ajavahemikud, mil hoovuse kiirus ületas 20 cm/s. Prominentseim tugevate hoovuste sündmus registreeriti 13.-16. veebruaril 2022. Analüüsides tugevate hoovuste esinemise seost tuultega võib väita, et kaudselt olid need kõik seotud tuule mõjuga. Tugevate hoovuste sündmustele eelnesid ka tugevamad tuuled vastupidisest suunast. Tuule mõju jõudis põhjalähedasse kihti läbi pinnakihi vee liikumisele ligikaudu tuule suunas, mis muutis veetaseme gradienti, mille tagajärjel süvakihis tekkis liikumine vastassuunas. Samas, suuremad kiirused ei vastanud kõige tugevamatele kuid lühiajalistele tuultele, vaid olukorrale, kui suhteliselt tugevad tuuled puhusid ühest valdavast suunast pikema aja jooksul (mõned päevad – nädal).

Hoovuste polaarhistogrammid mere põhjale kõige lähematest kihtidest (joonis 4.1, ülemised paneelid) näitavad, et hoovuse valdavad suunad olid oluliselt mõjutatud lokaalsest topograafiast. Juulis-novembris 2021 asus hoovusmõõtja ligikaudu ida-lääne suunas välja venitatud sügavama ala servas (vt joonis 2.3) ja põhjalähedase kihi hoovused olid peamiselt suunatud piki seda kanalit. Detsembrist 2021 kuni märtsini 2022 oli hoovusmõõtja suurema põhja-lõunasuunalise nõo servas asuvas kirde-edela suunalises kanalis ja hoovused olid suunatud ligikaudu piki seda topograafilist iseärasust. Mõlema mõõdistuse andmetel veidi kõrgemal veesambas toodud hoovuste polaarhistogrammid (joonis 4.1, alumised paneelid) näitavad, et hoovused olid samuti mõjutatud lokaalsest topograafiast, kuid suundade jaotus oli oluliselt ühtlasem, st topograafia mõju vähenes, liikudes veesambas ülesse.

Arvestades Estonia vraki asukohta ja lähema piirkonna topograafiat (joonis 2.3) võib eeldada, et selles piirkonnas on valdavateks hoovused piki ida-läänesuunalist sügavamat nõgu. Kuid Estonia vrakk on avatud ka kirde-edela suunalistele hoovustele piki vähem väljendunud nõgu, kus asus ka hoovusmõõtja teisel perioodil. Sellest suunast tulevad hoovused on peaaegu risti vraki teljega, st need võivad avaldada ka kõige suuremat mõju vrakile. Samas, seitsme kuu jooksul mõõdetud hoovuste kiirused ei ületanud 36 cm/s, st väga tugevaid hoovuseid ei registreeritud.

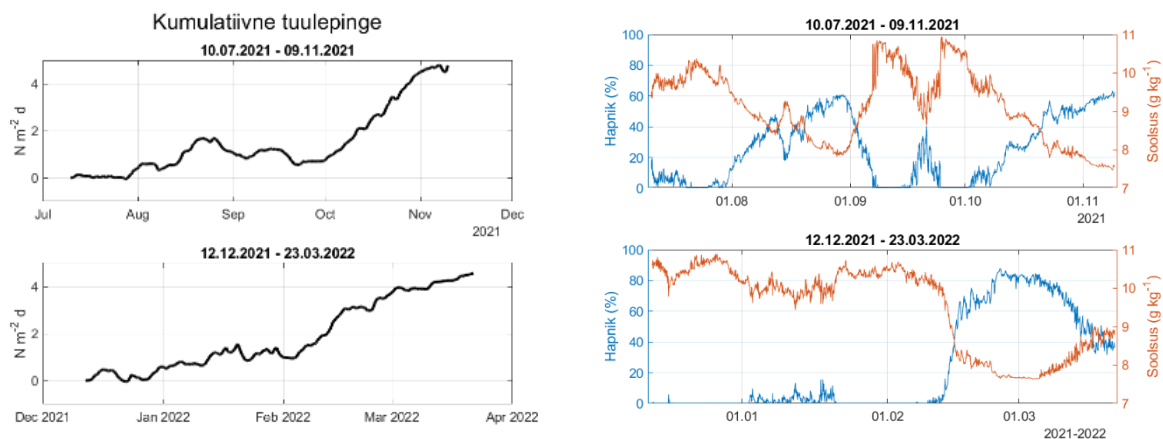


Joonis 4.1. Hoovuste polaarihogrammid põhjalähedases veekihis (ülemised paneelid) ja 60-62 m sügavusel (alumised paneelid) parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas perioodidel 10. juulist 2021 kuni 9. novembrini 2021 (vasakpoolsed paneelid) ja 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022 (parempoolsed paneelid).

Seitsme kuu jooksul läbi viidud temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse mõõtmised mere põhja lähedal näitasid, et tingimused parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas on väga muutlikud – vaheldusid suhteliselt kõrge hapniku kontsentratsiooniga ja anoksilised tingimused (joonis 4.2). Kumulatiivse tuulepinge ja hapniku sisalduse aegriidelt on näha tugevate edelatuulte mõju oktoobris 2021 ja veebruari teises pooles 2022. aastal. See väljendus põhjalähedase veekihi voolamises tuule suunale vastassuunas, mis tõi mõõdistusalale madalama soolsuse ja suurem hapnikusisaldusega vett. Kui edelast-kirdesse suunatud tuulepinge nõrgenes või muutus vastupidiseks, taastus tavapärane tsirkulatsioon ja vraki piirkonda liikus tagasi hapnikuvaene veemass. Kõige kõrgemad hapniku sisalduse väärtused mõõdeti veebruari lõpus 2022, kui eelnevalt olid pikema aja jooksul valdavaks suhteliselt tugevad edelatuuled. Kuna sel perioodil puudus sesoonne termokliin, siis tekkis olukord, kus veesammas oli peaaegu läbisegunenud – st põhjalähedase kihi soolsus langes alla 8 g/kg ja hapniku kontsentratsioon tõusis üle 80% küllastusest. Analoogsed stratifikatsiooni kollapseid ja nende mõju põhjalähedastele keskkonnatingimustele talvekuudel on registreeritud Soome lahes (Liblik et al., 2013⁴; Lips et al., 2017⁵).

⁴ Liblik, Taavi, Laanemets, J., Raudsepp, U., Elken, J., & Suhhova, I. (2013). Estuarine circulation reversals and related rapid changes in winter near-bottom oxygen conditions in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Science*, 9, 917–930.

⁵ 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>



Joonis 4.2. Kumulatiivse tuulepinge (vasakpoolsed paneelid) ja soolsuse ning hapniku sisalduse (parempoolsed paneelid) ajalised muutused põhjalähedases veekihis parvalaev „Estonia“ vraki piirkonnas perioodidel 10. juulist 2021 kuni 9. novembrini 2021 (ülemised paneelid) ja 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022 (alumised paneelid).

Väga muutlikud keskkonnatingimused põhjalähedases veekihis parvalaev „Estonia“ vraki piirkonnas tähendavad, et vrakile avaldavad mõju nii oksüdeerumine hapnikurikkas merevees kui ka materjalide mikrobioloogiline korrodeerumine^{6,7}. Vastavate täpsemate hinnangute teostamiseks on vajalik valideerida olemasolevaid mudelاندmeid ning viia läbi keskkonnatingimuste muutlikkuse pikaajaline analüüs. Mikrobioloogilise korrosiooni hindamiseks oleks otstarbekas võtta ka vastavad bakterite proovid ja neid analüüsida (näiteks kasutades eDNA meetodeid).

⁶ Gu, 2012. New Understandings of Biocorrosion Mechanisms and their Classifications. Microbial Biochem Technol, 4:4, DOI: 10.4172/1948-5948.1000e107.

⁷ Li and NING, 2019. Latest research progress of marine microbiological corrosion and biofouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling. Bioactive Materials 4, 189–195.

5. KOKKUVÕTE

Uuringu eesmärgiks oli registreerida hoovuste vertikaalsete profiilide ja põhjalähedase kihi soolsuse, temperatuuri ning hapniku sisalduse aegread parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas vähemalt kolme kuu jooksul läbisegunenud veesamba tingimustes. Töös kasutati Aanderaa mõõtmisplatvormi SeaGuard II, millega olid ühendatud akustiline hoovuste profileerija, rõhu, elektrijuhtivuse, hapniku ja temperatuuri andurid. Mõõtmisi teostati 12. detsembrist 2021 kuni 21. märtsini 2022 asukohas koordinaatidega 59° 23,0515' N, 21° 41,2294' E ja mere sügavusega 80 m.

Peamised esialgse analüüsi tulemused, sh võrreldes esimese mõõtmisperioodiga, ja järeldused on järgmised:

- Maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhjalähedases veekihis ulatusid kuni 37 cm/s, st olid ligikaudu sama suured, kui esimesel perioodil stratifitseeritud tingimustes.
- Mediaan keskmine hoovuse kiirus põhja lähedal oli 5,1 cm/s, kuid esines üks periood, mil hoovuse kiirus ületas 20 cm/s ja lühemaid perioode läbi kogu mõõtmisperioodi hoovuse kiirusega üle 10 cm/s.
- Tugevaimad põhjalähedased hoovused olid seotud pikemat aega puhunud suhteliselt tugevate edelatuultega veebruari keskpaigas 2022.
- Sarnaselt stratifitseeritud tingimustes saadud tulemustele (mõõtmised juulis-novembris 2021) toimus voolamine mõõdistuspiirkonna põhjalähedases veekihis valdavalt tuule suunale vastupidises suunas.
- Mõõdistuse algusest kuni 2022. a veebruari keskpaigani valdasid piirkonna põhjalähedases kihis anoksilised (ajutiselt hüpoksilised) tingimused.
- Pikaajalise edelatuule mõjul kanti veebruari keskpaigas piirkonna põhjalähedasse kihti kõrge hapniku sisaldusega (üle 80% küllastuse kontsentratsioonist) veemass.
- Mõõtmiste viimase kolme nädala jooksul taastus estuaarne tsirkulatsioon ja toimus hapniku sisalduse vähenemine ning temperatuuri ja soolsuse kasv põhjalähedases kihis.
- Pikemate anoksiliste ja kõrge hapnikusisaldusega perioodide vaheldumise põhjal reisipraami Estonia vraki piirkonnas võib eeldada, et tegu on tingimustega, mis toetavad suhteliselt kõrget metallide korrodeerumist merekeskkonnas.

Aruandele on lisatud mõõtmisandmed nii algsel kujul kui kontrollitud ja välja arvutatud füüsikaliste suuruste aegridadena.

Parvlaev „Estonia“ vrakile merekeskkonna poolt avaldatava mõju uuringu järgmise etapina on otstarbeks läbi viia olemasolevate numbriliste mudelite andmete (näiteks Copernicus Marine Service) valideerimine mõõtmisandmetega. Kui valideerimise tulemused näitavad mudelandmete piisavat usaldusväärsust (vastavust mõõtmisandmetele), on võimalik teostada nii hoovuste kui ka mere põhjalähedase kihi soolsuse ja hapniku sisalduse pikaajaliste muutuste analüüs (alates aastast 1994). Nimetatud analüüsi abil saab hinnata merekeskkonna (sh dünaamika) võimalikku mõju vrakile.

LISA 1.

Aruandele on lisatud toorandmed SeaGuard II mälukaardilt (failid Data000.bin, Data001.bin, Data002.bin, Data003.bin, Data004.bin, Data005.bin) koos informatsiooniga instrumendi konfiguratsioonist (Config.xml) ja mõõtmiste seadistusest (Layout.xml). Kõik nimetatud failid on loetavad spetsiaalse tarkvaraga DataStudio 3D (Aanderaa).

Kogu mõõtmisperioodi kõik algandmed füüsilistes ühikutes, mis on ekstraheeritud kasutades nimetatud Aanderaa tarkvara, on salvestatud ja edastatud ka *.csv ja *.xlsx failidena (Estonia_Dec-Mar_2021-22.csv ja Estonia_Dec-Mar_2021-22.xlsx), mis on loetavad teksti- ja tabelitöötluse tarkvaraga (näiteks Excel). Nimetatud failid sisaldavad nii esmaseid mõõtmisandmeid kui ka informatsiooni hoovuse profiilide mõõtmise kvaliteedi ja aparatuuri seisundi kohta kogu mõõtmisperioodil.

Mõõtmisandmed on vormistatud eraldi Exceli failina, mis sisaldab ainult kontrollitud kvaliteediga andmeid anduritelt ja arvutatud füüsiliste suuruste väärtusi. Tabeli tulpades on esitatud järgmised andmed:

- Record Time – kellaaeg (UTC)
- Record Number – andmerea number
- Conductivity [mS/cm] – elektrijuhtivus
- Temperature[Deg.C] – vee temperatuur (mõõdetud elektrijuhtivuse anduriga)
- Salinity[PSU] – arvutatud soolsus ühikutes [PSU]
- Salinity[g/kg] – arvutatud soolsus ühikutes [g/kg]
- Density[kg/m3] – arvutatud vee tihedus
- Soundspeed[m/s] – arvutatud helileviku kiirus vees
- Pressure[kPa] – rõhk
- Temperature[DegC] – temperatuur (mõõdetud rõhu anduriga)
- O2Concentration[uM] – vees lahustunud hapniku kontsentratsioon (ühik on μM ehk $\mu\text{mol/l}$)
- AirSaturation[%] – hapniku küllastusprotsent
- Temperature[Deg.C] – temperatuur (mõõdetud hapniku anduriga)

Järgnevates tulpades on toodud anduriga DCPS #505 kõikides kihtides alates veekihist 76-74 m kuni veekihini 36-34 m mõõdetud ja arvutatud hoovuste parameetrid arvestades mõõdetud hoovuse kiirusi ja kompassiga registreeritud instrumendi orientatsiooni:

- hoovuse kiiruse moodul (Horizontal Speed [cm/s]),
- hoovuse suund (Direction [Deg.M]),
- hoovuse kiiruse põhjasuunaline komponent (North Speed [cm/s]),
- hoovuse kiiruse idasuunaline komponent (East Speed [cm/s]).