

Tallinna Tehnikaülikool



ADCP mõõtmised hoovuste profiilide ja
põhjalähedase soolsuse ning hapniku sisalduse
andmete kogumiseks parvlaev „Estonia“ vraki
piirkonnas (juuli-november 2021)
Aruanne

Riigihange nr 241513

TALLINN
2021

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	17
4. KOKKUVÕTE.....	20
LISA 1.....	21

ANNOTATSIOON

Uuringu eesmärgiks oli registreerida hoovuste vertikaalseid profile ja põhjalähedase kihi soolsust, temperatuuri ning hapniku sisaldust parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas kihistunud veesamba tingimustes. Selleks 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 Transpordiameti laevalt EVA-316 parvlaev „Estonia“ vraki lähedusse 10. juulil 2021 koordinaatidele 59° 22,8299' N, 21° 38,8656' E. Merepõhja sügavus mõõtmiste asukohas oli 74 m. Platvorm võeti merest välja Politsei- ja Piirivalveameti alusega „Kindral Kurvits“ 9. novembril 2021. Kogutud ligi neljakuulised andmerekad on toodud käesoleva aruande lisa. Aruandes kirjeldatakse hoovuste ajalist muutlikkust läbi kogu veesamba erilise rõhuga põhjalähedase kihi dünaamikal. 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 juulis-novembris 2021.

Töö on teostatud vastavalt Ohutusjuurduse Keskuse tellimusele 06. juulist 2021 ja hankepingule (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. Et hinnata põhjalähedase veekihi dünaamikat ja keskkonnatingimuste muutlikkust tagasiulatuvalt kuni aastani 1994, on vajalik rakendada numbrilist modelleerimist võttes arvesse valitsenud meteoroloogilisi tingimusi. Mudeltulemuste valideerimiseks peab kasutama mõõtmisandmeid piirkonnast, mida on kogutud võimalikult pika perioodi jooksul. Erinevatele meteoroloogilistele ja hüdrograafilistele tingimustele vastavate andmete saamiseks on käesoleva töö raames plaanitud läbi viia mõõtmised nii suveperioodil, mis vastab veesamba kihistunud tingimustele, kui talveperioodil, mil ülemise veekihi kihistus kuni halokliinini puudub. Kogutud andmete põhjal kirjeldatakse põhjalähedase kihi hoovuste, soolsuse ja hapnikutingimuste muutlikkust ning seost valitsevate meteoroloogiliste tingimustega ja/või füüsikaliste protsessidega.

Käesolev aruanne esitleb andmeid ja kirjeldab hoovuste, temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse ajalist käiku ja muutlikkust parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas esimese mõõtmisperioodi jooksul 10. juulist 2021 kuni 9. novembrini 2021. Mõõtmised talvistes tingimusteks viiakse läbi detsembrist 2021 kuni märtsini 2022 vähemalt kolme kuu jooksul.

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 ($59^{\circ} 22,8299' N$, $21^{\circ} 38,8656' E$; kõik koordinaadid aruandes on toodud WGS84 süsteemis) oli mere sügavus 74 m. Hoovuste iseloomustamiseks kihistunud veesamba tingimustes tuuakse välja muuhulgas maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhja lähedal ja analüüsitakse, millega need sündmused võisid seotud olla. Iseloomustatakse soolsuse ja hapnikutingimuste muutlikkust. Kui neid tulemusi modelarvutuste abil analüüsi hilisemas faasis pikendada perioodile alates septembrist 1994, saab muuhulgas teha järeldusi korrosiooni intensiivsuse kohta. 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 läbi kogu veesamba. 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 (näiteks 10 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, sh millal esinesid hapnikuta perioodid ja millal oli piirkonnas hapnikuga vesi. Analüüsitakse muutlikkuse põhjuseid ja hapnikutingimuste seoseid hoovuste ja tuuletingimuste muutustega.

Peatükis 4 esitatakse lühidalt esimese mõõtmisperioodi 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

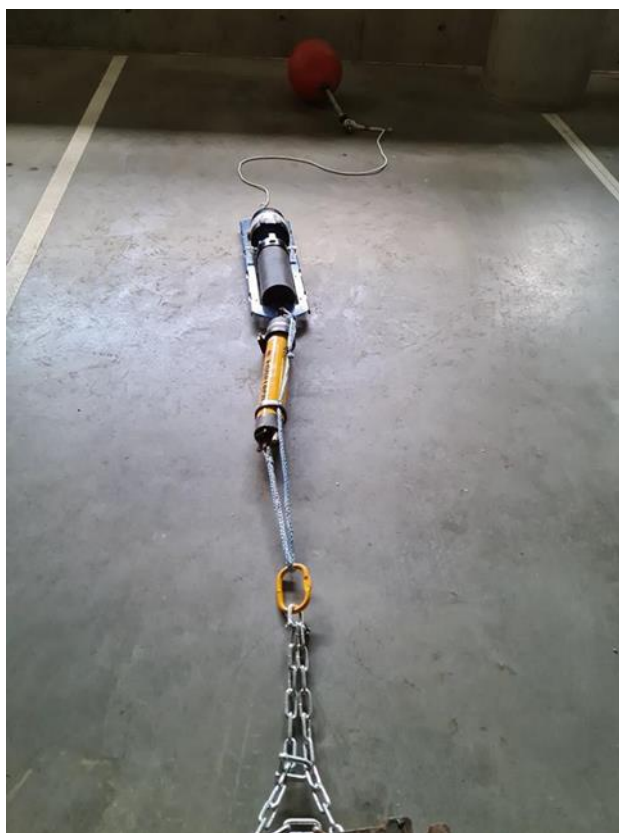
Hoovuste profileerija (DCPS) muud tehnilised andmed olid järgmised: sagedus 600 kHz, vertikaalne mõõtmisulatus kuni 80 m, kihi paksus (vertikaalne lahutus) 0,5-5 m, varjatud kaugus andurist esimese mõõtmisvahemikuni 1 m, saatjaid/vastuvõtjaid 4, kaldenurga mõõtja vertikaali suhtes täpsusega 0,5 kraadi. Mõõtmisel kasutati järgmisi profileerija seadistuse parameetreid: mõõtmisvahemik – sügavusest 70 m (st 4 m merepõhjast, vt selgitust allpool) kuni mere pinnani kahemeetrise sammuga (40 kihti, millest 32 olid vees ja oluliselt häirimata veepinnalt tagasi peegeldunud signaalist) ja mõõtmisamm ajas 1 tund. Hoovuse kiiruse ja suuna tulemusena registreeriti iga täistunni jaoks ca 1,5 minuti jooksul saadud 30 signaali keskmine väärtus.

SeaGuard II platvormi paigaldamiseks mere põhjale konstrueeriti poi ja ankruga varustatud süsteem (vt joonis 2.1). Piisava raskusega ankru külge kinnitati 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 (71 m, mis on 3m 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 $\mu\text{mol/l}$) ja küllastusprotsendina.

Mõõtmissüsteem paigaldati merre Transpordiameti laevalt EVA-316 parvlaev „Estonia“ vraki lähedusse 10. juulil 2021 koordinaatidele 59° 22,8299' N, 21° 38,8656' E. Suurema ala topograafia koos uuringute piirkonnaga on toodud joonisel 2.2 ning piirkonna detailsem topograafia koos mõõtmissüsteemi ja kasutatud meteoroloogiliste andmete ERA5 punkti asukohaga joonisel 2.3. Merepõhja sügavus mõõtmiste asukohas oli 74 m. Platvorm võeti merest välja Politsei- ja Piirivalveameti alusega „Kindral Kurvits“ 9. novembril 2021. Kogutud andmed nende algse kujul ja töödelduna füüsikalistesse ühikutesse on toodud käesoleva aruande lisas.



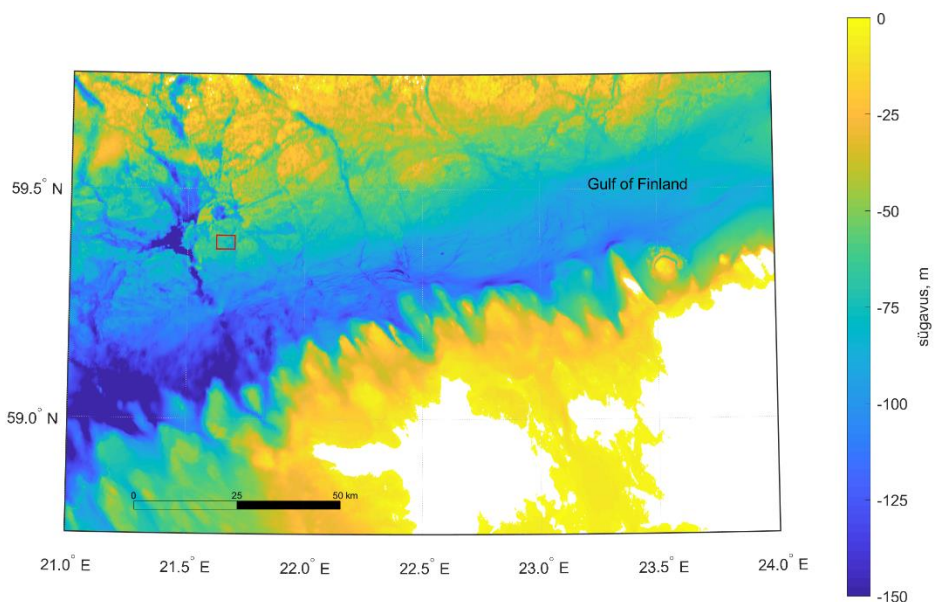
Joonis 2.1. Poijaama konfiguratsioon – poi, Aanderaa SeaGuard II platvorm koos akustilise hoovuse profileerijaga ja hapniku, temperatuuri ja elektrijuhtivuse anduritega ning akustiline päästik, mis oli kinnitatud ankru külge.

Mõõdistuste piirkond jääb Hiiumaast loodesse Soome majandusvööndisse, mis geograafiliselt kuulub Ava-Läänemere põhjabasseini. Suures mastaabis on tegu piirkonnaga, kus mere sügavus suureneb

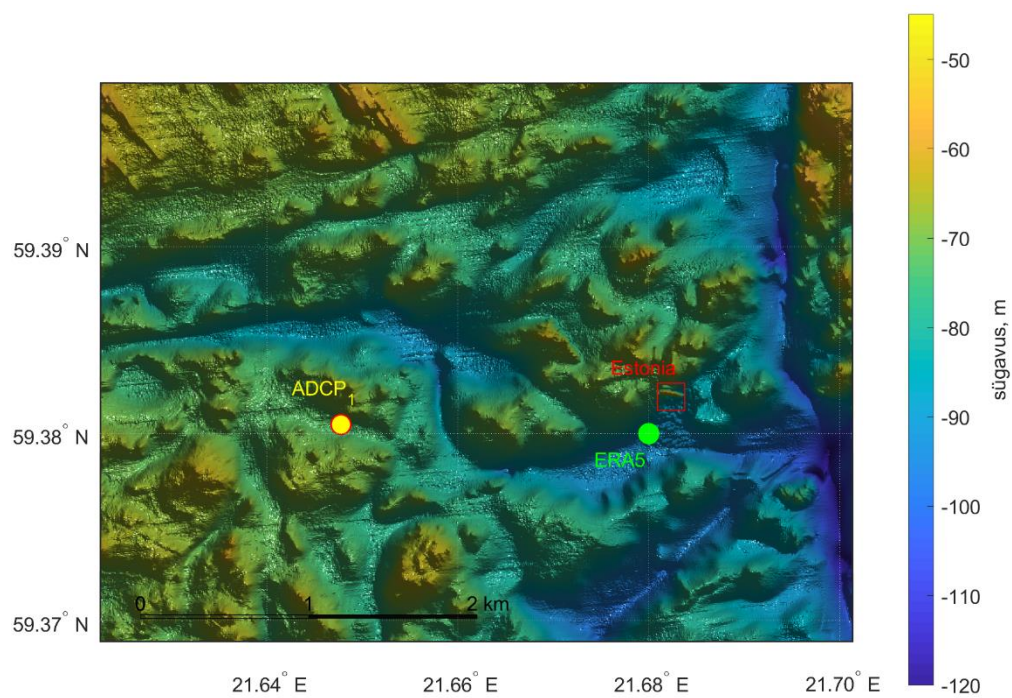
¹ IOC, SCOR and IAPSO: The International Thermodynamic Equation of Seawater - 2010: Calculation and Use of Thermodynamic Properties, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56. UNESCO, 196, 2010.

põhjast lõuna poole (joonis 2.2). Kui vaadelda piirkonna topograafiat detailsemalt, siis on parvlaev „Estonia“ vraki ja esimeseks perioodiks merre paigaldatud SeaGuard II platvormi asukoha vahetus läheduses tegu väga varieeruva põhjaga (joonis 2.3). Mõõdistusjaam asus vrakist ligikaudu 2 km läänes. Parvlaev „Estonia“ vrakist lõunasse jääv sügavam ala on ühenduses mõõdistuspunktist põhjapoole jääva ida-lääne suunas välja venitatud veidi sügavama alaga. Mõõdistusjaam asus vähem väljendunud (madalamas) vaos, mis on samuti ligikaudu ida-lääne suunalise orientatsiooniga.

Meteoroloogiliste tingimuste iseloomustamiseks mõõtmisperioodil on töös kasutatud 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 juuli kuni november 2021. Andmed on ühe tunnise ajalise lahutusega ja $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ horisontaalse lahutusega. Analüüsis kasutati andmeid mõõtmiste asukohale lähimast ERA5 võrgupunktist ($59^\circ 22,8' N$, $21^\circ 40,8' E$; vt joonis 2.3).



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

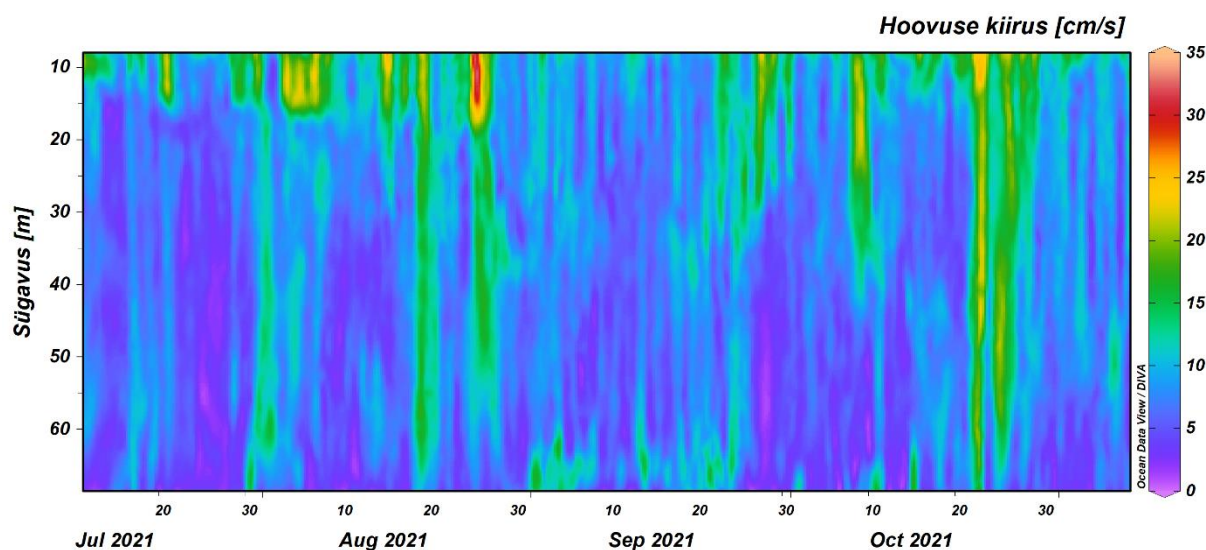


Joonis 2.3. Parvlaev „Estonia“ vraki piirkonna detailsem topograafia koos parvlaeva (punane ruut, Estonia, koordinaadid 59° 22.9252' N, 021° 40.8451' E), meteoroloogiliste andmete punkti (roheline ring, ERA5) ja mõõdistusplatvormi (kollane ring, ADCP1) asukohaga esimesel mõõdistusperioodil.

3. TULEMUSED

3.1. HOOVUSED

Hoovuse kiiruse vertikaalset jaotust ja selle ajalist muutlikkust mõõdistusperioodil iseloomustab joonis 3.1. Jooniselt on näha, et juulis-augustis olid hoovused pinnakihi, mis on alumistest kihtidest eraldatud sesoonse termokliiniga, tugevamad kui allpool veesambas. Septembris mõõdeti veesamba ülemises osas aeg-ajalt suuremaid kiirusi. Ülemine kiht suuremate kiirustega oli sel perioodil paksusega 30-35 m, sest ilmselt oli segunemise tagajärjel termokliin sügavamale nihkunud. Ajalises muutlikkuses olid iseloomulikud lühiajalised kogu veesammast haaravad tugevamad hoovuste sündmused. Iseloomulik oli ka kiiruse gradiendi esinemine umbes 60 m sügavusel, mida võib siduda halokliiniga. Aeg-ajalt esinesid sügaval nõrgemad hoovused kui ülalpool ja aeg-ajalt olid maksimaalsed hoovuse kiirused just põhjalähedases veekihi.

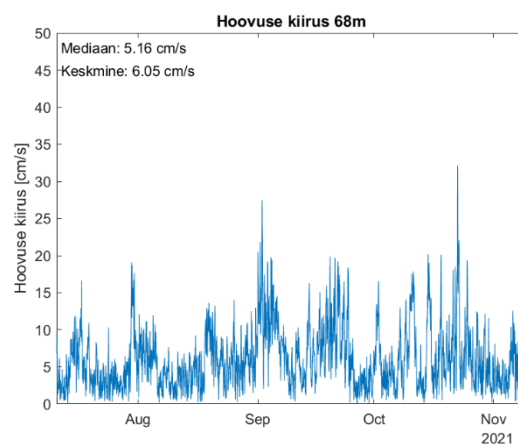
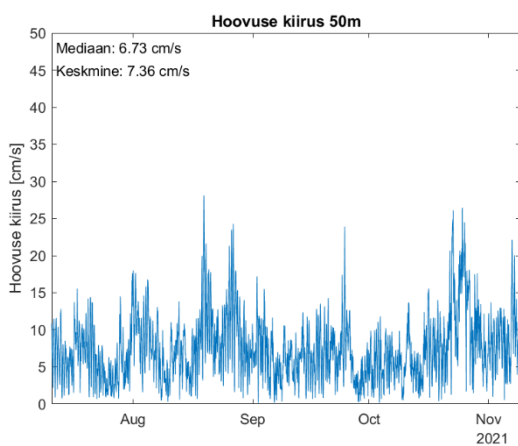
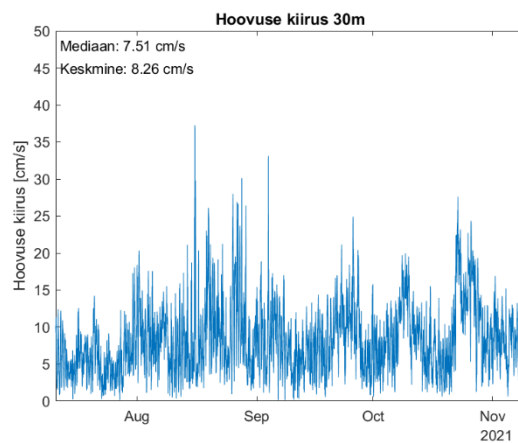
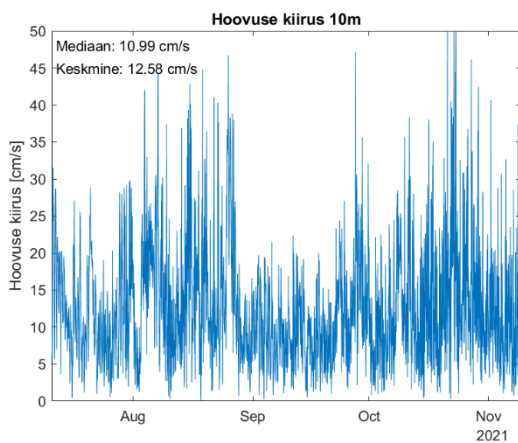


Joonis 3.1. Hoovuse kiiruse vertikaalse jaotuse muutus ajas parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas kogu mõõtmisperioodi jooksul ajavahemikus 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

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. Keskmine hoovuse kiirus mõõdistusperioodil oli vaadeldavas kihis 6-7 cm/s. Mediaankeskmine oli veelgi madalam, mis tähendab, et enamuse ajast oli hoovuse kiirus alla 6 cm/s. Maksimaalsed registreeritud kiirused nelja kuu jooksul olid 32-35 cm/s, maksimumiga kihis sügavusel 64-66 m.

Tabel 3.1. Registreeritud hoovuse kiiruse statistilised näitajad põhjalähedases kihis 2-m kihtide kaupa parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ajavahemikus 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

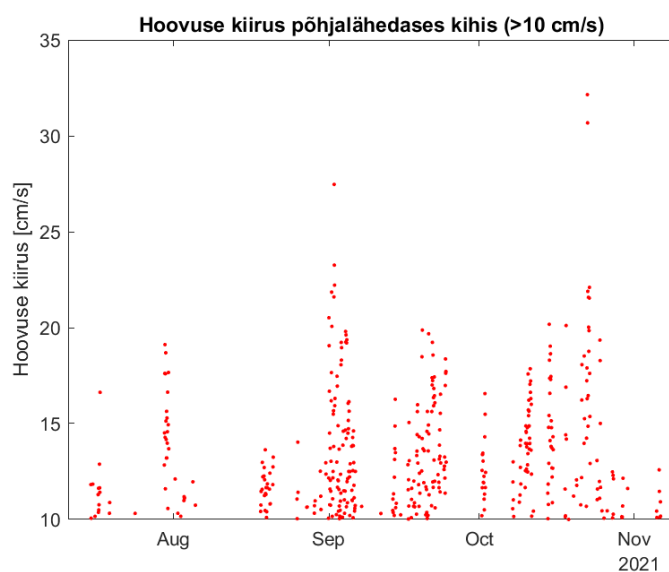
Sügavus (m)	Aritmeetiline keskmine (cm/s)	Mediaan keskmine (cm/s)	Maksimaalne kiirus (cm/s)
66-68	6,0	5,2	32,1
64-66	6,8	5,9	35,4
62-64	6,9	6,0	31,2
60-62	6,8	6,0	32,3
58-60	6,9	6,0	26,7
56-58	7,1	6,3	28,0
Keskmsed	6,7	5,9	30,9



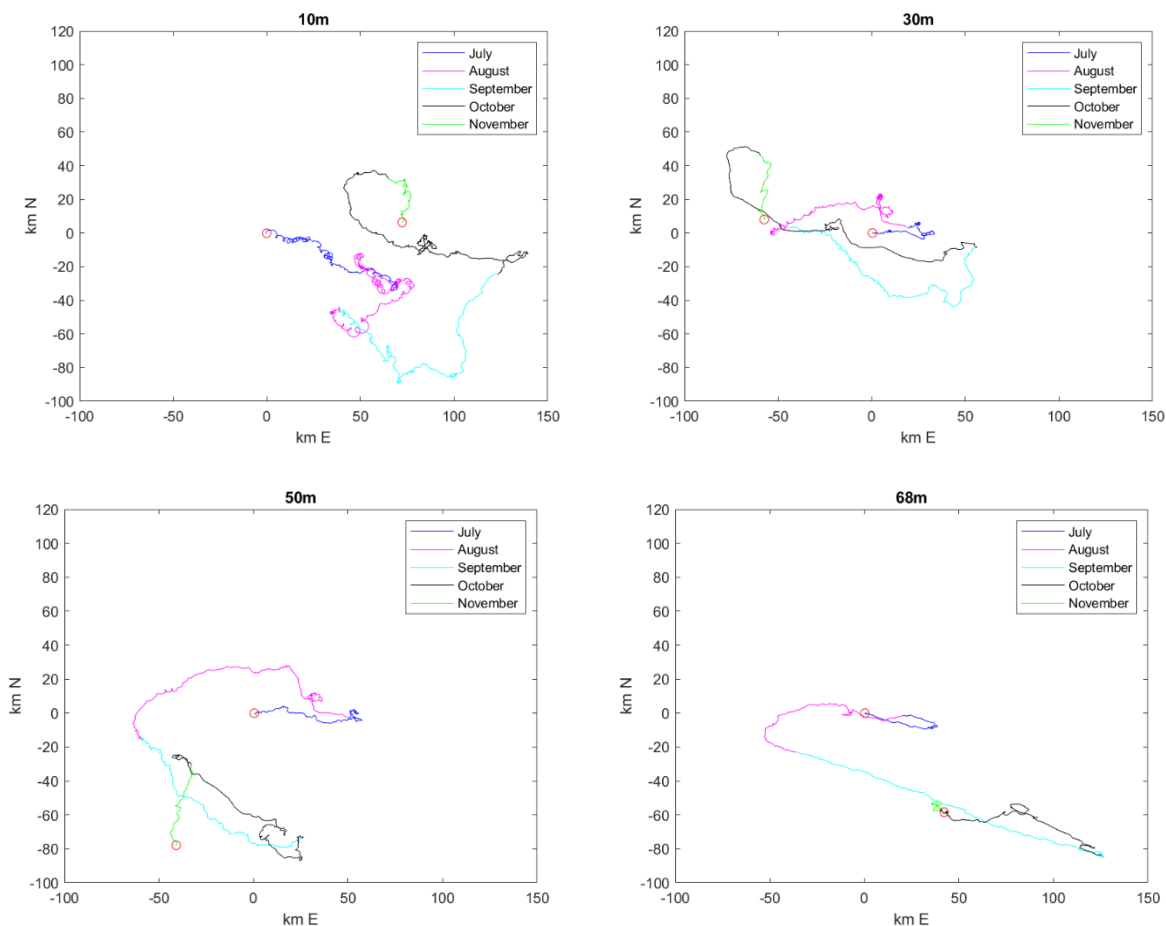
Joonis 3.2. Hoovuse kiiruse ajaline käik 8-10 m, 28-30 m, 48-50 m ja 66-68 m sügavusel parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas kogu mõõtmisperioodi jooksul ajavahemikus 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

Võrreldes mõõdetud hoovuse kiirusi erinevate kihtide vahel, on näha, et maksimaalsed kiirused esinesid pinnakihis (vt näiteks joonis 3.2, 8-10 m) ja mõõdetud maksimumid olid kõige väiksemad vahekihis (joonis 3.2, 48-50 m). Võrreldes 64-66 m sügavusel mõõdetud maksimaalse hoovuse kiirusega 32 cm/s, ületasid kiirused pinnakihis 60 cm/s (8-10 m) ja ulatusid 37 cm/s 28-30 m sügavusel. Vahekihis, sügavusel 48-50 m, mõõdeti maksimaalseks hoovuse kiiruseks 28 cm/s.

Põhjalähedases veekihis oli hoovuse kiirus suurem kui 20 cm/s pikemalt ainult kahel perioodil – 1.-2. septembril 2021 ja 22.-23. oktoobril 2021. Üle 10 cm/s esines hoovuse kiiruseid suhteliselt sageli, keskmiselt kahel pikemal perioodil igas kuus (joonis 3.3). Keskmiselt olid põhjalähedased hoovused tugevamad septembris-oktoobris ja nõrgemad juulis-augustis.



Joonis 3.3. Hoovuse kiirused väärtusega üle 10 cm/s, mõõdetud 66-68 m sügavusel parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ajavahemikus 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.



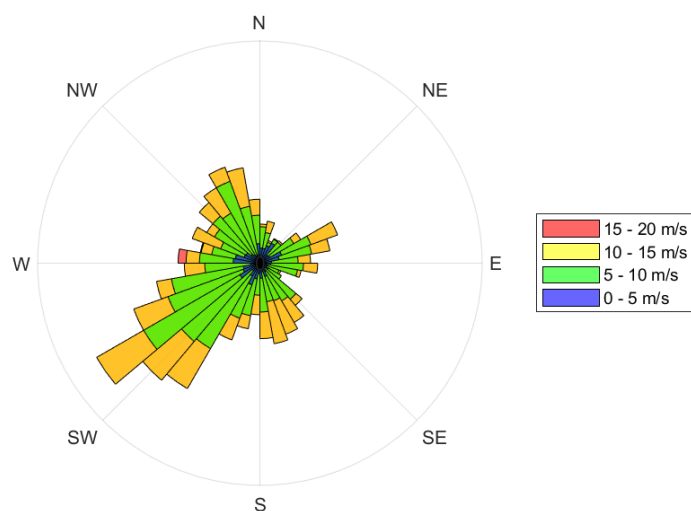
Joonis 3.4. Hoovuse progressiivvektor diagrammid 10 m, 30 m, 50 m ja 68 m sügavusel parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas kogu mõõtmisperioodi jooksul ajavahemikus 10 juulist kuni 9. novembrini 2021.

Progressiivvektor diagrammid näitavad voolamise valdavat suunda ja tugevust pikemate perioodide jooksul. Jooniselt 3.4 on näha, et kuigi voolamine oli aeg-ajalt selge suunaga ja tugev, jäi kogu perioodi summaarne liikumine kõikidel sügavustel vahemikku 50-80 km. See vastab keskmise voolamise või jääkhoovuse kiirusele alla 1 cm/s. Põhjalähedases kihis oli eelistatud voolamine ida-kagu suunas või lääne-loode suunas, mis on kooskõlas piirkonna topograafiaga (vt joonised 2.2 ja 2.3). Juuli keskel oli voolamine suunatud itta-kagusse, mis juuli lõpus pöördus läände-loodesse. Augustis jätkus samasuunaline voolamine kuni see pöördus edelasse ja hiljem itta-kagusse. Samas suunas toimus voolamine kogu septembri jooksul. Oktoobris valdas voolamine läände-loodesse. Novembris olid hoovused põhjalähedases kihis suhteliselt nõrgad.

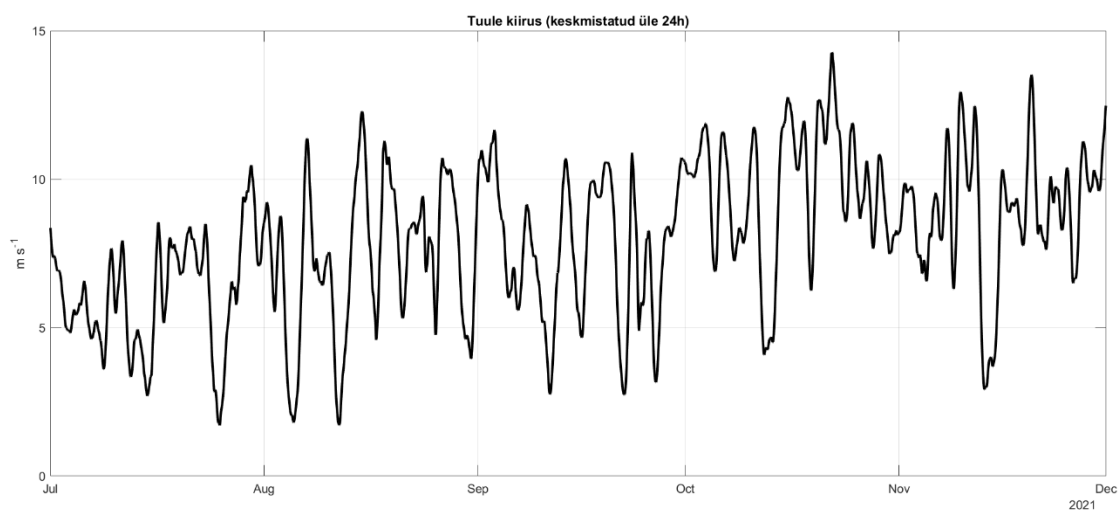
Veesambas ülalpool olid voolamises periooditi domineerivateks rohkem erinevaid suundi. Kui põhjalähedases veekihi oli kogu perioodi tulemuseks voolamine kagusse, siis 50 m sügavusel edelasse. Ülemises kahes veekihi, mis on näidatud joonisel 3.4, oli hoovuste/voolamise muutlikkus suhteliselt sarnane, kuid kogu perioodi tulemusena oli voolamine pinnakihi (8-10 m) suunatud itta ja 28-30 m sügavusel läände (mõõtmisperioodi alguses asus nende kahe veekihi vahel neid eraldav termokliini).

3.2. METEOROLOOGILISTE TINGIMUSTE MÕJU HOOVUSTE DÜNAAMIKALE

Mõõdistusperioodi jooksul olid piirkonnas valdavaks edelatuuled, sagedamini esines tuuli ka põhjast-loodest, lõunast-kagust ja idast-kirdest (joonis 3.5). Tuule kiirus ületas 15 m/s ainult läänetuulte puhul. Üle 24 tunni silutud tuulte kiiruste graafik näitab mõnepäevaste tugevamate ja nõrgemate tuultega perioodide vaheldumist kogu mõõdistuse jooksul (joonis 2.6). Keskmiselt olid tuuled nõrgemad juulis-augustis ja tugevamad mõõdistuse teisel poolel septembris-oktoobris. Maksimaalsed tuule kiirused mõõdeti oktoobri teises pooles.

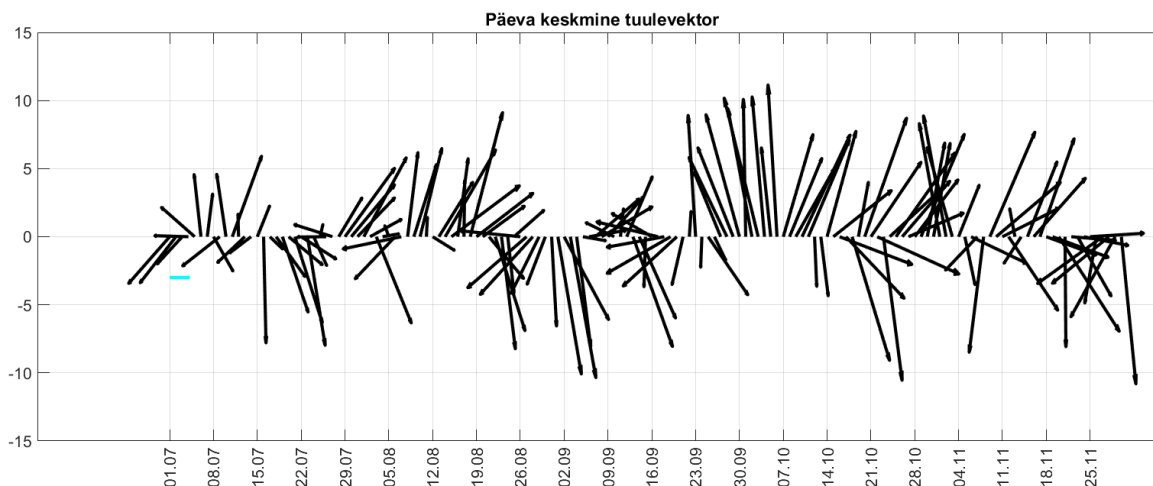


Joonis 3.5. Tuulte roos mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal (tuule kiirus 10 m kõrgusel merepinnast) mõõdistusperioodil 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

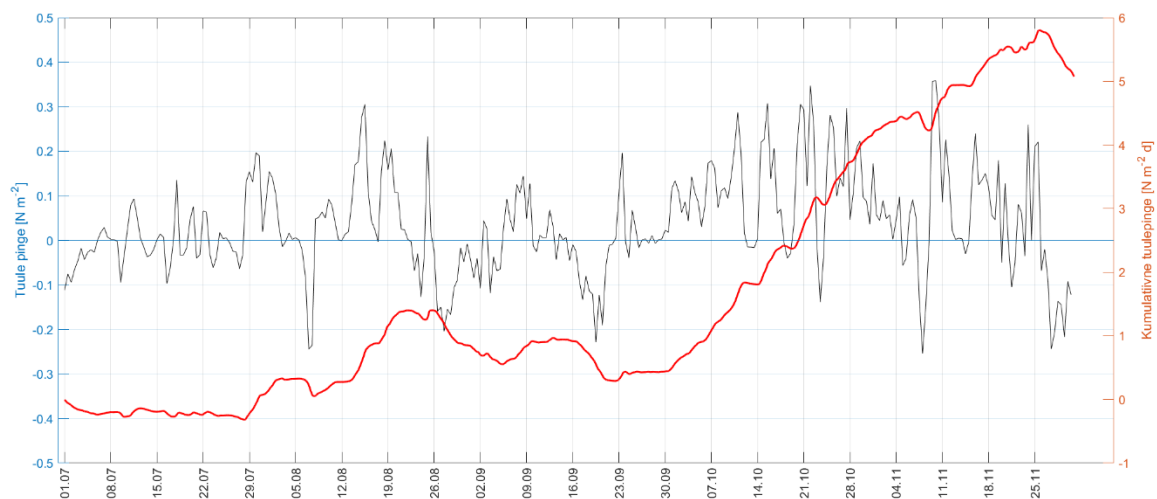


Joonis 3.6. Üle 24 tunni silutud tuule kiirused mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal juulis-novembris 2021.

Ööpäeva keskmise tuule vektorid iseloomustavad samuti meteoroloogiliste tingimuste suurt muutlikkust mõnepäevaste perioodidega (joonis 3.7). Pikemad perioodid tugevamate tuultega teatud suunast valitsesid augusti lõpus – septembri alguses, mil domineerisid põhjatuuled ja septembri lõpus – oktoobri alguses ning oktoobri lõpus, mil valitsesid lõunatuuled. Kõige suuremate tuule kiirustega perioodil oktoobri teises pooles oli tuul muutliku suunaga.



Joonis 3.7. Ööpäevased keskmised tuule vektorid mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal juulis-novembris 2021.

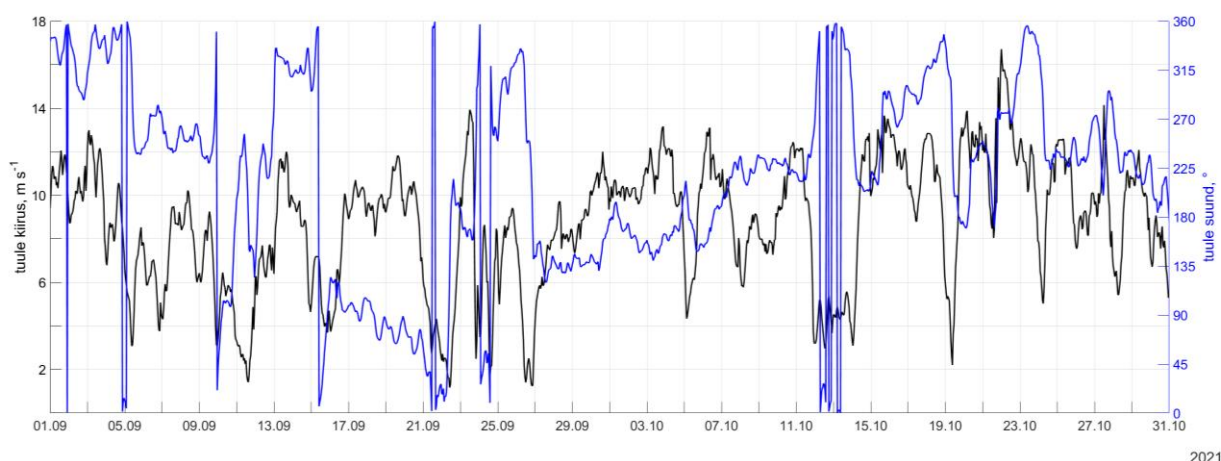


Joonis 3.8. Üle 6 tunni silutud tuule pinge (must joon) ja kumulatiivne tuulepinge (punane joon) mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal mõõdistusperioodil 10. juulist 2021 kuni 9. novembrini 2021. Esitatud on tuulepinge komponent positiivse suunaga kirdesse (pööratud 45 kraadi põhjasuunast päripäeva).

Tuulepinge aegrida näitab samuti, et domineerivaks on piirkonnas mõõdistusperioodil olnud edelatuuled (joonis 3.8). Kirdetuultega või vastupidise tuulepinge maksimumiga on nähtavad ainult

mõned lühiajalisemad perioodid – augusti alguses, augusti lõpus - septembri alguses, septembri keskpaigas ja novembri alguses. Oktoobris on selgelt ülekaalus edelatuulte mõju, mis on väga hästi näha kumulatiivselt tuulepinge graafikult – kumulatiivne tuulepinge kasvab järsult peaaegu kogu oktoobri jooksul (joonis 3.8).

Valdavate tuulte ja erinevatel sügavustel domineerinud voolamise suundade (vt joonis 3.4) võrdlus näitab, et pinnakihis oli voolamine rohkem tuule suunas (st otseselt tuulepingest mõjutatud), kui sügavamates kihtides. Põhjalähedases kihis oli voolamine valdavalt tuule suunale vastupidises suunas või risti tuule suunaga, olles arvatavasti mõjutatud ka lokaalsest topograafiast. Näiteks augusti lõpus – septembri alguses valitsenud põhja-loode tuultele vastas põhjalähedases veekihis voolamine itta-kagusse ja oktoobris valitsenud lõuna-edela tuulte puhul läände-loodesse. Taoline vastassuunaline voolamine erinevatel sügavustel on Läänemerele veesamba stratifitseeritud tingimustes iseloomulik, mida on mõõtmistega demonstreeritud Soome lahes (näiteks Lips et al., 2017²; Suhhova et al., 2018³).



Joonis 3.9. Tuule kiirus ja suund mõõdistuspiirkonnale lähimast ERA5 punktist võetud mudeltulemuste põhjal septembris-oktoobris 2021.

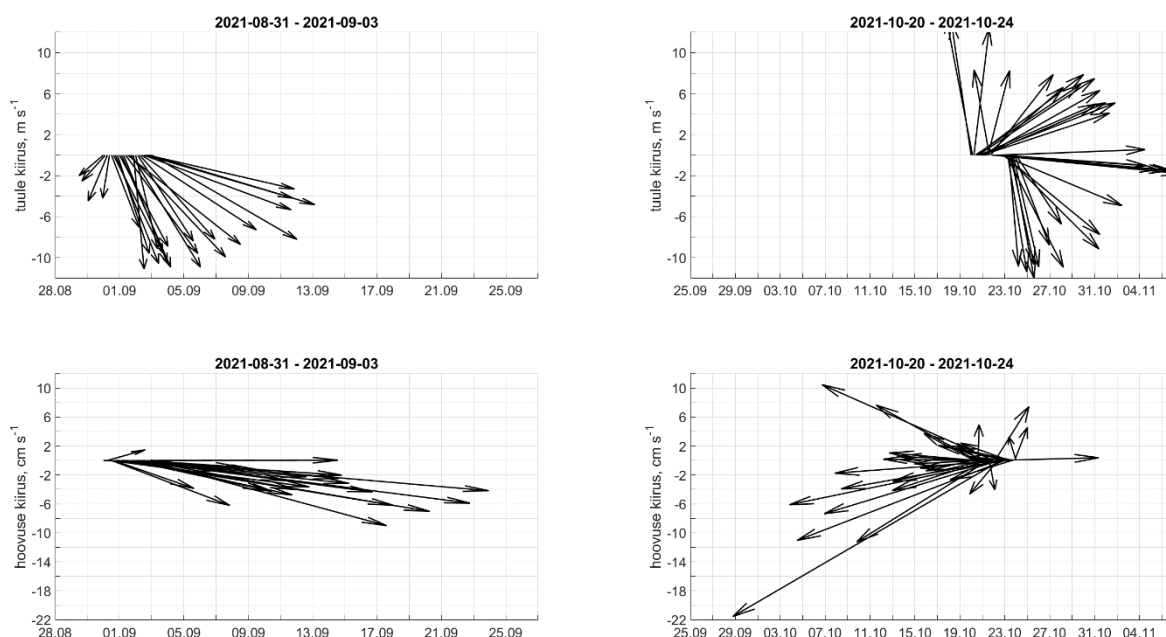
Käesoleva töö kontekstis oli oluline tuvastada meteoroloogilised tingimused, mil mõõdeti maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhjalähedases veekihis. Kiirused üle 20 cm/s mõõdeti 1.-2. septembril 2021 tugevate põhja-loode tuulte perioodil ja 22.-23. oktoobril 2021, kui esinesid kogu mõõdistusaja maksimaalse kiirusega tuuled, mis puhusid läänest (joonis 3.9). Esimesel nimetatud perioodidest mõõdeti maksimaalse hoovuse kiiruse põhjalähedases kihis 24 cm/s ja teisel perioodil 35 cm/s.

Analüüsidest detailsemalt üheaegseid muutusi tuuletingimustes ja hoovustes on näha, et septembri esimestel päevadel domineerinud tugevad tuuled, mis olid valdavalt põhjast, tekitasid põhjalähedases

² 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.

³ 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.

veekihis tugeva hoovuse, mis oli suunatud itta (joonis 3.10). See tähendab, põhjalähedane hoovus oli suunatud 90 kraadi tuule suunast vasakule. Tugevad läänekaarte tuuled 20.-24. oktoobril tekitasid hoovuse suurima registreeritud kiirusega. On näha, et muutuva tuulele vastab ka muutlik hoovus, kuid lühiajaliselt ja suurima kiirusega on hoovus just vastassuunas võrreldes tuulega. Võib arvata, et suurima kiirusega hoovuse suund on mõjutatud basseini üldise konfiguratsiooni ja hoovusmõõtja asukoha lokaalse topograafia poolt. Põhjalikum analüüs viiakse läbi töö teises faasis, kui on olemas ka mõõtmisandmed talvistest tingimustest.



Joonis 3.10. Tuule (ülemised paneelid) ja põhjalähedase veekihi hoovuse (66-68 m; alumised paneelid) vektorid kahel valitud perioodil – 31. augustist 3. septembrini (vasakpoolsed paneelid) ja 20. oktoobrist 24. oktoobrini.

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 4,14 – 6,95 °C, soolsus vahemikus 7,47 – 10,95 g/kg ja hapniku sisaldus vahemikus 0 – 248 µM või 0 – 63 % küllastusest. Mõõdistusperioodi keskmine temperatuur põhjalähedases veekihis oli 5,42 °C ja soolsus 9,12 g/kg. Hapnikutingimusi ei iseloomusta niivõrd keskmine kontsentratsioon vaid asjaolu, et anoksilised tingimused ja kõrgema hapniku sisaldusega tingimused vaheldusid.

Tabel 3.2. Registreeritud minimaalsed, maksimaalsed ja keskmised temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse väärtused põhjalähedases veekihis parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ajavahemikus 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

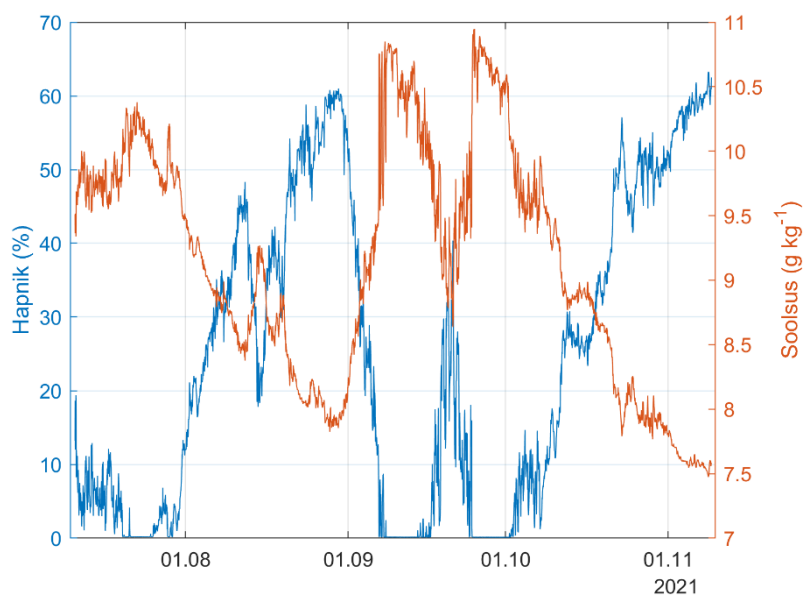
Parameeter	Miinum	Maksimum	Keskmine
Temperatuur (°C)	4,14	6,95	5,42
Soolsus (g/kg)	7,47	10,95	9,12
Hapnik (µM)	0	248	98
Hapnik (%)	0	63	25

Mõõtmistega registreeriti mere põhjalähedases kihis perioodiliselt esinevad anoksilised (ilma hapnikuta) tingimused. Anoksiaga samaaegselt mõõdeti suurenenud soolsuse väärtused (joonis 3.11, soolsus > 10 g/kg). Soolsuse vähenedes suurenes ka hapnikusisaldus vees. Registreeritud anoksilised perioodid esinesid augusti teises pooles, septembri keskel ja septembri lõpus/oktoobri alguses. Mõõdistusperioodi lõpu poole, alates oktoobri keskpaigast, hapniku kontsentratsioon suurenes ja soolsus vähenes kuni mõõtmiste lõpuni. Kui kõrgele veesambas anoksilised või hüpoksilised tingimused ulatusid, on võimalik hinnata vertikaalsete hapniku profiilide abil. Hüpoksia ulatus on põhjalähedase hapnikuvaeguse tingimustes tavaliselt seotud halokliini sügavusega (vt näiteks Stoicescu et al., 2019⁴). Põhjalikumad hinnangud esitatakse käesoleva töö lõpparuandes.

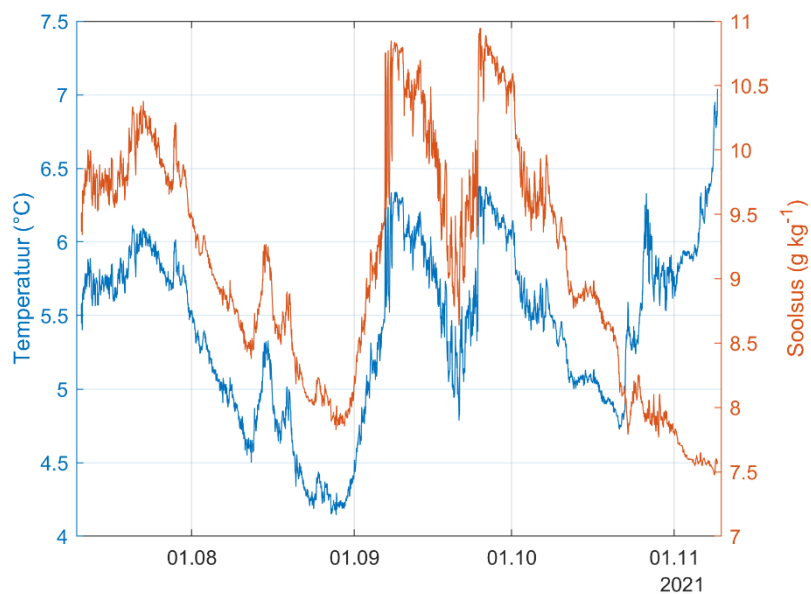
Kuna soolsuse suurenemine ja hapniku vähenemine esinesid samaaegselt, siis võib oletada, et madalad hapnikuväärtused parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas ei tekkinud kohapeal, vaid muutused olid tingitud veemasside vahetumisest mõõdistusalal. Väheste hapnikusisaldusega soolasem veemass liikus mõõtepiirkonda arvatavasti lõunast Läänemere sügavamatelt aladelt. Nendel perioodidel, mil hapniku sisaldus järsult vähenes või esinesid pikemalt anoksilised tingimused, oli põhjalähedases kihis valdavaks itta suunatud voolamine. See tähendab, kuigi veemass oli oletatavalt pärit mõõdistusalast lõunast, jõudis veemass piirkonda topograafilist kanalit mööda läänest. Soolsuse vähenemine ja samaaegne hapniku sisalduse suurenemine, mis toimus näiteks oktoobri alguses, näitab, et neil perioodidel jõudis piirkonda magedam vesi nõrgema halokliiniga alalt põhjast või idast (Soome lahe poolt). Sel perioodil valitses põhjalähedases veekihis voolamine läände.

Oktoobri keskpaigas hakkasid hapnikutingimused paranema ja soolsus vähenema, kuid erinevalt varasemast, kui temperatuur ja soolsus muutusid ühes suunas, kaasnes seekord soolsuse vähenemisega temperatuuri tõus (joonis 3.12). Sellised muutused viitavad vertikaalsele segunemisele, st mõõdistuspiirkonna põhjalähedase kihi vesi ja ülemised veekihid (väiksema soolsusega ja kõrgema temperatuuriga) segunesid tänu tugevatele tuultele ja pinnakihi jahtumisest tingitud konvektsioonile sügisel.

⁴ Stoicescu, S.-T., Lips, U., Liblik, T. (2019). Assessment of Eutrophication Status Based on Sub-Surface Oxygen Conditions in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Frontiers in Marine Science*, 6, UNSP 54. DOI: 10.3389/fmars.2019.00054.



Joonis 3.11. Vees lahustunud hapniku sisalduse (%) sinine joon) ja soolsuse (g/kg; punane joon) ajaline käik põhjalähedases veekihis parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.



Joonis 3.12. Temperatuuri (°C; sinine joon) ja soolsuse (g/kg; punane joon) ajaline käik põhjalähedases veekihis parvlaev „Estonia“ vraki piirkonnas 10. juulist kuni 9. novembrini 2021.

4. 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 stratifitseeritud veesamba tingimustes. Töös kasutati aparatuurina Aanderaa mõõtmisplatvormi SeaGuard II, millega olid ühendatud akustiline hoovuste profileerija, rõhu, elektrijuhtivuse, hapniku ja temperatuuri andurid. Mõõtmisi teostati 10. juulist 2021 kuni 9. novembrini 2021 asukohas koordinaatidega 59° 22,8299' N, 21° 38,8656' E ja mere sügavusega 74 m.

Käesolevas aruandes on antud mõõtmistulemuste esialgne kirjeldus fookusega põhjalähedase kihi dünaamikal. Peamised esialgse analüüsi tulemused ja järeldused on järgmised:

- Maksimaalsed hoovuse kiirused mere põhjalähedases veekihis ulatusid kuni 35 cm/s.
- Mediaankeskmine hoovuse kiirus põhja lähedal oli 6 cm/s, kuid esinesid lühemad perioodid hoovuse kiirusega üle 20 cm/s ja igas kuus ka pikemad perioodid hoovuse kiirusega üle 10 cm/s.
- Tugevamad põhjalähedased hoovused olid seotud tugevate tuultega, näiteks maksimaalne kiirus mõõdeti 22.-23. oktoobril 2021 esinenud tormi ajal.
- Hoovuse kiirused põhja lähedal olid suuremad sügisel (septembris-oktoobris) võrreldes hoovustega juulis-augustis.
- Voolamine mõõdistuspiirkonna põhjalähedases veekihis toimus valdavalt tuule suunale vastupidises suunas.
- Hapniku kontsentratsioon põhjalähedases veekihis varieerus nullist (anoksiline keskkond) kuni kontsentratsioonini 63% küllastusest, mis oli seotud veemasside vahetumisega piirkonnas.
- Põhjalähedase veekihi soolsuse kasvuga kaasnes hapnikusisalduse langus ja vastupidi – hapniku kontsentratsiooni kasv esines koos soolsuse vähenemisega.
- Oktoobris 2021 registreeritud hapniku sisalduse ja temperatuuri kasv ning soolsuse vähenemine põhjalähedases kihis oli ilmselt seotud veesamba vertikaalse segunemisega.

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

LISA 1.

Aruandele on lisatud toorandmed SeaGuard II mäluaardilt (failid Data000.bin, Data001.bin, Data002.bin, Data003.bin, Data004.bin, Data005.bin ja Data006.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_Jul-Nov_2021.csv ja Estonia_Jul-Nov_2021.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[μM] – vees lahustunud hapniku kontsentratsioon (ühik on μM ehk μmol/l)
AirSaturation[%] – hapniku küllastusprotsent
- Temperature[Deg.C] – temperatuur (mõõdetud hapniku anduriga)

Järgnevates tulpades on toodud anduriga DCPS #505 kõikides kihtides alates veekihist 70-68 m kuni veekihini 6-4 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]).