

Tallinna Tehnikaülikool

Mere elupaikade kirjeldamise parandamise võimalused kasutades autonoomseid mõõtmisi ja andmeprodukte

(Deliverable 2.1.1. Methodology for spatial characterization of habitats using autonomous high-frequency in situ observations in combination with conventional monitoring, remote sensing and model outcomes)

Teostatud projekti "Eesti mereala keskkonna ja loodusväärtuste hindamise ja seire innovaatilised lahendused" raames

Version 1
01.04.2021

Vastutav täitja: Urmas Lips
Aruande koostajad: Fred Buschmann, Taavi Liblik, Nelli Rünk,
Kai Salm, Oliver Samlas, Stella-Theresa Stoicescu, Irina Suhhova.

Sisukord

Executive summary	3
1. Sissejuhatus.....	5
2. Andmed ja meetodika.....	6
2.1. Salmebox.....	6
2.2. Liugur	6
2.3. Profiilid laevalt	10
2.4. Poijaamad	11
2.5. Mudelandmed.....	11
2.6. Muud andmed.....	12
2.7. Hapniku puudujäägi indikaator	12
3. Tulemused.....	13
3.1. Vaatlused	13
3.1.1. Klassikalised vaatlused uurimislavalt	13
3.1.2. Kõrge lahutusega mõõtmised pinnakihis.....	20
3.1.3. Allveeliuguri vaatlused	24
3.1.4. Fikseeritud jaamad.....	32
3.2. Pikaajaline, sh. aastevaheline muutlikkus	42
3.3. Sünoptilist mastaapi muutlikkus.....	53
3.4. Ruumiline muutlikkus	57
3.5. Veesamba karakteristikute kaardistamine kombineerides in-situ mõõtmisi ja mudelprodukte.....	69
3.6. Veesamba elupaikade kirjeldamise parendamise võimalused Eesti merealadel	81
3.7. Kokkuvõte ja soovitused seireprogrammi täiendamiseks	85
Kasutatud kirjandus	87

Executive summary

Autonomous measurements have become an essential component of the research in the marine areas. However, their application in environmental monitoring programs is still rare. The aim of this activity was to develop and test a methodology for 3D characterization of the water column habitats by applying novel technologies of in situ observations and combining the acquired data with the information from other sources as conventional monitoring and numerical models.

Following autonomous platforms and data sources were tested in the pilot area: flow-through thermosalinograph, mounted to the research vessel; extra profiling stations along the track of conventional monitoring network; repeated measurements along a section by underwater glider and continuous recording by fixed moorings.

Conventional monitoring conducted by research vessels is still an important part of the observing system. High-quality and high vertical resolution observations in the wide range of parameters are needed for the continuity of HELCOM time-series and for the reference and calibration of other platforms.

Research vessel mounted thermosalinograph provides high-resolution data in the surface layer along the ship track. The high-resolution flow-through data is especially valuable in the areas of strong gradients (straits between basins, upwelling fronts). We suggest switching the flow-through data to the monitoring program. Another simple way to improve the sparse spatial resolution of the monitoring network is to add extra stations. We suggest adding two stations in the open sea part of the pilot area to improve the view on the deep layer characteristics and two stations to the coastal slope from the open sea towards the Irbe Strait to capture better the coastal processes and water exchange effects with the Gulf of Riga. Dedicated analysis in the other basins must be conducted to come up with suggestions for the station network improvement there.

Zonal glider section considerably improves the characterization of water column habitats in the coastal slope of the Baltic Proper. This large area is not covered by either open sea and coastal monitoring program. The running costs of a glider are relatively high, but the added value – cost ratio is much higher for a glider if compared to conventional monitoring. Running costs of two-months continuous occupation of the glider section costs less than a five-day monitoring survey with a research vessel.

Estonian monitoring system has currently only one station continuously measuring water characteristics below the surface layer. The observations in the test site well revealed the added value of a single-point mooring. Nearly saturated conditions were registered in the times of conventional monitoring visits while the continuous measurements captured several periods (up to few weeks) with considerable oxygen depletion, thereby three periods with hypoxic conditions. We suggest seven fixed moorings with continuous recording of water column characteristics shall be deployed and established to the deep areas in the open sea (four locations), straits (two) and coastal slope (one). The annual running cost for the whole system, if it will be serviced in the monitoring cruises, is comparable to a five-day monitoring cruise.

There are no continuous current measurements established in the Estonian sea areas. The registered time-series of current profiles confirmed the earlier understanding that circulation modelling in the stratified areas is not reliable enough yet. The flow structure measurements are required to provide data about advection, the information needed to estimate horizontal fluxes of substances. We suggest continuous current observations shall be started in Estonian marine areas.

In addition to the platforms dealt with in this work, complementing conventional monitoring by profiling floats (Argo) and profiling moorings should be tested and considered.

Copernicus wave hindcast product showed great performance in the test site. We suggest the product can be well used for the habitats characterization and no major further developments are required in the wave observations/modelling field in the open sea.

The Copernicus reanalysis products for the temperature, salinity and oxygen can be considered for the water habitats characterization, but site-specific analysis on uncertainties and systematic errors must be conducted. The same applies to the temperature and salinity in the operational forecast product. Oxygen in the operational product and nutrients both in the operational and reanalysis product are not reliable enough yet for the habitats characterization.

1. Sissejuhatus

Konventsionaalsed uurimislavadelt tehtavad mõõtmised on pikaajaliselt välja kujunenud viis mereseiret teostada. Uurimislavalt on võimalik teha kõrgtäpseid, usaldusväärseid mõõtmisi suure hulga parameetrite osas.

Lisaks uurimislavadele on teadusuuringutes kasutuses mitmeid autonoomseid mõõtmisplatvorme. Eksperimentaalsetes teadusuuringutes on jõutud arusaamale, et parima võimaliku pildi uuritava nähtuse kohta annab erinevate platvormide integreerimine ning samaaegselt ka satelliidi- ja numbriliste mudelite produktide kaasamine. Mõõtmisplatvormidel on erinevad karakteristikud nagu ruumiline ja ajaline lahutus; mõõdetavate parameetrite valik; andmete täpsus ja kvaliteet; andurite stabiilsus; kasutamise keerukus ja insenertehnilise toetuse vajaduse maht; vastupidavus ja töökindlus; energiakulu; asukoha sh. sügavuse piirangud; seadme maksumus; käitamise kulud, andmeedastuse võimekus ja karakteristikud ning paljud muud. Satelliidi- ja mudeliproduktide puhul on olulised ruumiline ja ajaline lahutus, täpsus.

Käesoleva töö eesmärk on: 1) kombineerida konventsionaalne seire autonoomsete mõõtmiste ning numbriliste mudelite ja satelliidi produktidega; 2) tuua välja autonoomsete mõõtmiste ja produktide potentsiaalne lisandväärtus mereala elupaikade ruumilisel kirjeldamisel; 3) teha ettepanekud autonoomsete mõõtmiste lülitamiseks mereseire programmi.

Käesolevas töös testime järgnevaid platvorme/seadmeid/meetodeid:

- Uurimislavale paigaldatud läbivoolusüsteem, mis kogub andmeid pinnakihist;
- Uurimislavaga tehtavad täiendavad mõõtmisjaamad avamereseire jaamade vahel;
- Allveeliuguri mõõtmised;
- Hoovusmõõtmised punktis ja hoovuste profileerimine.
- Vee karakteristikute pidevmõõtmine punktis.

Mudeliproduktidest kasutame Copernicuse mereteenuse füüsikaliste ja biogeokeemiliste mudelite reanalüüsi ja operatiivse mudelijooksu tulemusi, kuhu on assimileeritud satelliitseire abil saadud pinnakihi temperatuuri väärtused.

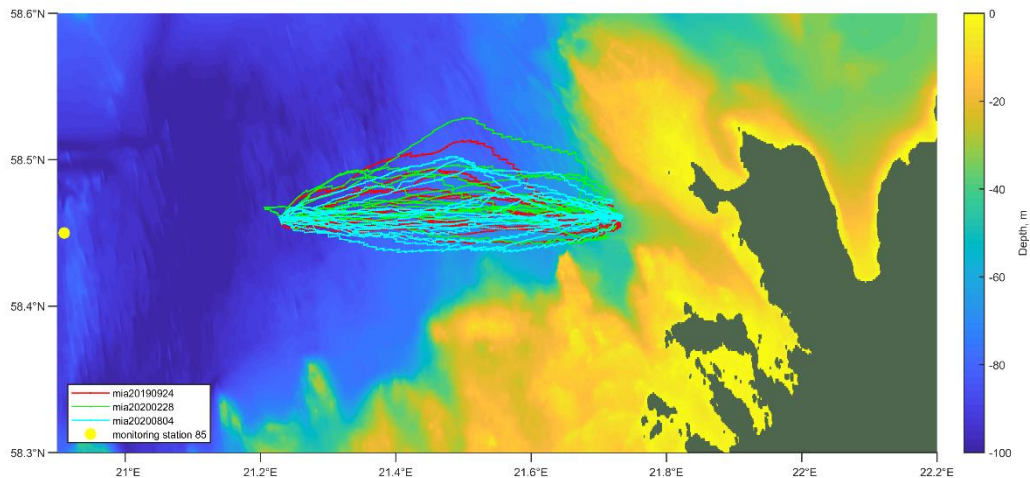
2. Andmed ja meetodika

2.1. Salmebox

Kõrglahutusega andmed on registreeritud uurimislaeva Salme pardal oleva autonoomse läbivoolusüsteemiga Salmebox (BlueBox System, GO Systemelektronik GmbH). Merevesi pumbatakse 2 meetri sügavusel läbi Salmeboxi süsteemi. Esimene digitaalne termomeeter SBE38 (Sea-Bird Electronics, Inc.) asub merevee sissevõtuava vahetus läheduses. Merevee soolsuse määramiseks registreeritakse elektrijuhtivuse ja temperatuuri andmed mõõteseadmega termosalinograaf SBE45 (Sea-Bird Electronics, Inc.). Andmed koos koordinaatidega salvestatakse 10 s intervalliga Blueboxi süsteemi. Peale andmetöötlust keskmistatakse andmed 1 minutilise sammuga, mis ruumiliselt vastab ligikaudu 250 meetrile. Kasutatud on andmeid kahest 2019 ja viiest 2020 aastal toimunud reisist. Aastal 2019 tehtud mõõdistustest on jaanuari ja juulikuu seirereiside andmeid kasutatud ainult osaliselt kuna Salmeboxi häiringu tõttu ei ole registreeritud kõigi mõõtmispunktide koordinaate.

2.2. Liugur

Projekti raames teostati kolm liuguri mõõdistust: sügis 2019, kevad 2020 ja suvi 2020 (joonis 2.2.1). Mõõdistuste raames koguti temperatuuri, soolsuse, klorofüllil ja hapniku andmeid. Mõõdistuslõige kulges Saaremaa ranniku ja seirejaam 85 vahel. Piirkonda iseloomustab merepõhja nõlv, kus sügavus langes 40 m-lt 95 m-ni. Liuguri esimene missioon toimus 24.09-24.10.2019, mil seade läbis mõõdistuslõiget 14 korda ja kogus ligi 5000 vertikaalset profiili. Liuguri teine missioon toimus 28.02-22.03.2020. Liugur läbis mõõdistuslõiget 14 korda ja kogus 3600 vertikaalset profiili. Liuguri kolmas missioon toimus 04.08-02.09.2020. Liugur läbis mõõdistuslõiget 18 korda ja kogus umbes 4500 vertikaalset profiili.



Joonis 2.2.1. Liuguri missioonide trajektoorid Saaremaast läänes 2019 sügis (punane), 2020 kevad (roheline) ja 2020 suvi (sinine), ning lähim seirejaam 85 (kollane punkt). Joonise värviskaalal on mõõdistuspiirkonna sügavus (*EMODnet Digital Terrain Model*).

Liuguri külge on kinnitatud CTD-andur (SeaBird, G-1451), hapnikuandur (Aanderaa Data Instrument AS, Oxygen Optode 4330) ning klorofüll a fluorestsentsi ja hägususe andur (Wet Labs, Eco Flntu). Andurite mõõtmisagedus on 0,5 Hz. Liuguri profiilid on kogutud seadme sukeldudes ja pinnale tõustes. Enne töötlust on andmetele tehtud esmane kvaliteedikontroll, sh võimatu aja ja positsiooni test ning andurite mõõtevahemiku test. Töödeldud andmed on keskmistatud konstantse sammuga (0,5 dbar) võrgule.

CTD-andur mõõdab temperatuuri, elektrijuhtivust ja rõhku. Lisaks arvutatakse soolsus ja tihedus. Esmalt on temperatuuri ja elektrijuhtivuse väärtused viidud vastavusse rõhuga. Kuna liugur on pidevas liikumises, ei vasta anduri reaktsiooniaja tõttu mõõdetud parameetri väärtuse registreeritud asukoht selle väärtuse esinemise tegelikule asukohale veesambas. Reaktsiooniaeg on aeg, mille jooksul andur reageerib muutusele. Tulenevalt registreerib andur mõõdetava parameetri väärtuse viivitusega ning eelkõige tuleb see esile tugevate vertikaalsete gradientide olemasolul.

Anduritel on erinev reaktsiooniaeg. Liuguri temperatuuri ja elektrijuhtivuse anduri puhul on see <2 s. Iga missiooni korral leitakse nende andurite jaoks ajaline parand, mida rakendades registreeritud ajale võimaldab lineaarse interpolatsiooni teel leida mõõdetud füüsikalise parameetri väärtusele vastav tegelik rõhu väärtus. Nähtuse likvideerimiseks leitud optimaalsed parandid on leitud profiilide võrdluse teel, eeldusel, et nii laskumisel kui ka tõusmisel mõõdetud profiilid peavad olema võimalikult sarnased ehk kaks kõrvuti asetsevat profiili vastavad samale veemasside vertikaalsele jaotusele.

Elektrijuhtivuse andurit mõjutab lisaks reaktsiooniajale ka soojuslik inerts. See tähendab, et liikudes läbi temperatuuri hüppekihi muutub temperatuur keskkonnas kiiremini kui andur seda registreerida jõuab. Seetõttu erineb temperatuur elektrijuhtivuse anduris veesambas mõõdetust. Soolsuse arvutamiseks hinnatakse temperatuuri elektrijuhtivuse anduris. Koefitsientide a ja b abil arvutatakse parand T_T , mis lahutatakse mõõdetud temperatuurist T.

$$T_T(n) = -bT_T(n-1) + a[T(n) - T(n-1)]$$

Koefitsiendid on määratud valemiga:

$$a = \frac{4f_n\alpha\tau}{1 + 4f_n\tau}$$

$$b = 1 - \frac{2a}{\alpha}$$

kus f_n on mõõtmisagedus, α temperatuurivea amplituud ja τ ajakonstant (Mensah et al., 2009). Optimaalsed α ja τ on samuti leitud kõrvutiste profiilide võrdluse teel ning hinnatakse iga missiooni jaoks eraldi.

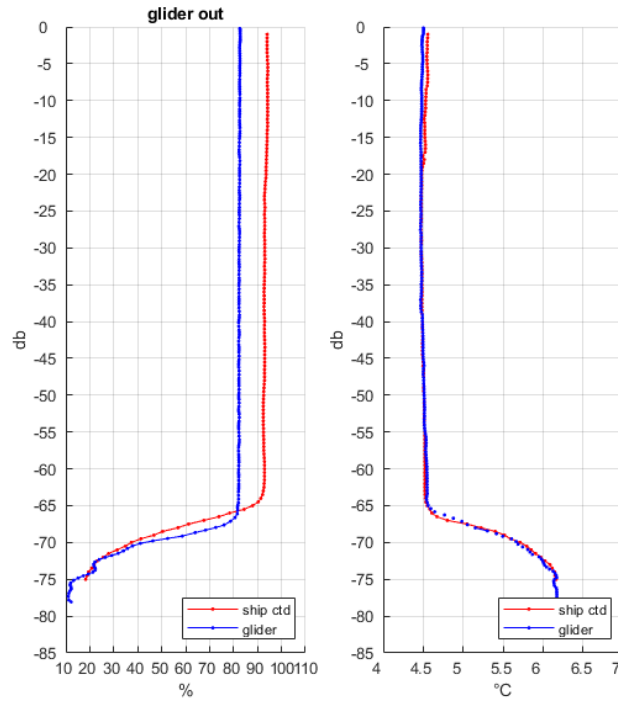
Liuguri hapnikuandur väljastab toorandmetena hapniku küllastusprotsendi, mis on arvatud mõõdetud optilise signaali faasinihke ja temperatuuri põhjal. Hapnikuanduril on enda temperatuuriandur. Väljastatud küllastusprotsent ei ole täpne samuti erinevate reaktsiooniaegade tõttu. Faasinihe, mis sõltub lahustunud hapniku kontsentratsioonist, registreeritakse <30 s ning temperatuur <15 s viivitusega. Seetõttu on küllastusprotsent tagasiarvutatud faasinihkeks ning hapniku sisaldus on leitud kasutades täpsemat CTD-anduri temperatuuri.

Erinevalt CTD-andurist ei ole hapnikuanduri reaktsiooniaeg konstantne. CTD-andur on varustatud pumbaga, et veevool läbi anduri oleks ühtlane ning töötingimused stabiilsed. Hapnikuandur mõõdab otse ümbritsevast keskkonnast, mistõttu mõõtmised on sõltuvuses liuguri liikumiskiirusest. Liikumiskiirusest sõltub anduri ette tekkiva piirikihi paksus, läbi mille jõuab hapnik anduri kilele. Omakorda avaldab mõju temperatuur, mõjutades hapniku lahustuvust ja levimist nii piirikihis kui ka anduri kilele (Bittig & Körtzinger, 2017). Reaktsiooniaja mittelineaarsus väljendub enim hüppekihtide läheduses, kus muutused nii voolus kui ka temperatuur võivad olla järsud. Bittig & Körtzinger (2017) on loonud mudeli, mis seob piirikihi paksuse, temperatuuri ja reaktsiooniaja. Nimetatud mudelit on rakendatud iga missiooni jaoks leitud konstantidega faasiväärtuste korrigeerimiseks enne küllastusprotsendi uuesti arvutamist.

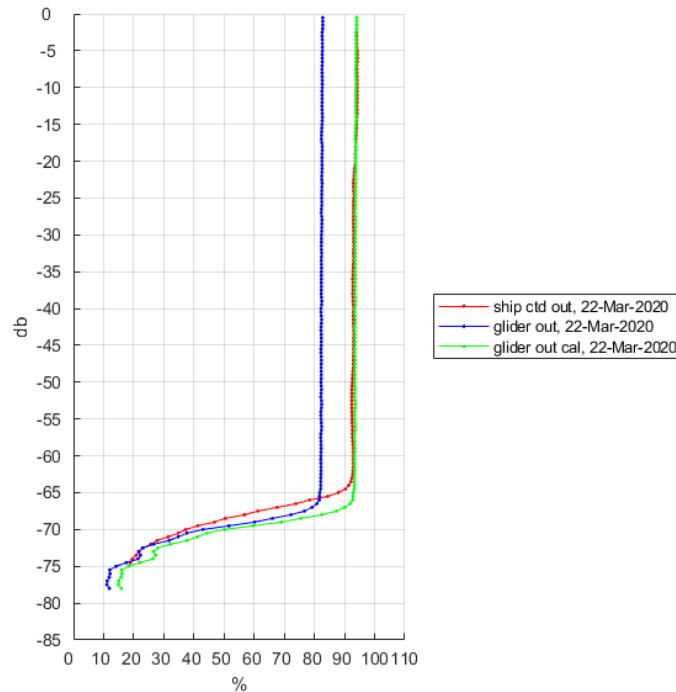
Enne küllastusprotsendi teisendamist hapniku kontsentratsiooniks (mg l^{-1}) väärtused kalibreeritakse. Selle jaoks registreeritakse liuguri veeskamisel ja väljavõtmisel täpsema (sh lühem reaktsiooniaeg, kõrgem mõõtmisagedus) CTD-sondiga lahustunud hapniku sisalduse vertikaalsed profiilid (joonis 2.2.2). Kalibreerimiseks on kasutatud kahe punkti järgi kalibreerimist vahemik-kalibreerimise (*bracketing calibration*) meetodil (Cuadros-Rodríguez et al., 2007).

$$x = x_{low} + (y - y_{low}) \frac{(x_{high} - x_{low})}{(y_{high} - y_{low})}$$

Meetod kasutab mõõdetud väärtusest y kalibreeritud väärtuse x saamiseks mõõdetud ja kalibreerimisprofiili kaht punkti väärtuste vahemiku maksimumi ja miinimumi lähedal, vastavalt y_{high} ja y_{low} ning x_{high} ja x_{low} . Meetod on rakendatav lähendusena profiilide mittelineaarse seose korral. Näide kalibreeritud profiilist on joonisel 2.2.3.



Joonis 2.2.2. Kevad 2020 missiooni lõpus, 22.03.2020, tehtud liuguri mõõdetud profiili (sinine) ja uurimislaevalt tehtud kalibreerimisprofiili (punane) võrdlus. Vasakul joonisel on esitatud hapniku küllastusprotsent (%) ja paremal joonisel temperatuur (°C).



Joonis 2.2.3. Kevad 2020 missiooni lõpus, 22.03.2020, tehtud liuguri mõõdetud hapniku küllastusprotsendi profiil (sinine), uurimislaevalt tehtud kalibreerimisprofiil (punane) ja kalibreeritud liuguri profiil (roheline).

Liuguri andmete põhjal on arvatud segunenud pinnakihi paksus, halokliini sügavus ja hüpoksia piir. Segunenud pinnakihikihi sügavus on minimaalne sügavus, kus on täidetud tingimus $p_z \geq p_3 + 0,15 \text{ kg m}^{-3}$. p_3 on tihedus 3 db sügavusel ja p_z tihedus sügavusel z (Liblik et al. 2020). Halokliini sügavus on sügavus, kus soolsuse gradient $\geq 0,07 \text{ g kg}^{-1}\text{m}^{-1}$ (Stoicescu et al., 2019). Soolsuse gradienti on arvatud silutud (3 db) profiilide põhjal. Ptk 3.3. ja 3.4. joonistel tähendab halokliini sügavus halokliini ülemist piiri. Hüpoksia piir on sügavus, kus $\text{O}_2 \leq 2,9 \text{ mg l}^{-1}$ (e.g. Stoicescu et al., 2019).

2.3. Profiilid laevalt

Töös kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudi poolt uurimislaevaga Salme avamerest seirereiside käigus kogutud CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) sondi vertikaalsete profiilide andmeid aastatest 2019 ja 2020. Mõõtmisteks kasutatud CTD sond OS320 (Idronaut) on varustatud elektrokeemilise hapniku anduriga ja klorofüll a fluorestsentsi anduriga.

CTD sond on peamine vahend merevee füüsikaliste omaduste määramiseks, mis annab ülevaate vee temperatuuri, soolsuse ja tiheduse jaotusest (Steele et al., 2009). Lahustunud hapniku standardne määramise viis põhineb Winkleri meetodil koos mitme modifikatsiooniga, mis tugineb lahustunud hapniku ja jodiidiooni vahelisel reaktsioonil leeliselises keskkonnas mangaan (II) juuresolekul. Elektrokeemilised hapniku andurid kasutavad ära hapniku redutseerimisprotsessi, et tekitada elektronide voog mida väljendatakse lahustunud hapniku ekvivalentides. CTD sondile juurde lisatud hapniku andurite abil on võimalik registreerida lahustunud hapniku pidevat profiili (HELCOM, 2018c).

Seirereisidelt kogutud CTD andmed töödeldi reiseid kaupa esmalt MatLabi skriptiga, mis kasutab spetsiaalset moodulit, Gibbs-SeaWater (GSW) Oceanographic Toolbox (McDougall & Barker, 2011), TEOS-10, mille vastavad alamprogrammid võimaldavad hinnata vee termodünaamilisi omadusi. Merevee tihedus on töös toodud suhtelise tihedusena Σ_0 (vastab merevee tihedusele ühikutes kg m^{-3} , millest on lahutatud 1000 kg m^{-3}). Mõõtmistööde ajal teostati kõikides reisides, peale ühe, ka paralleelselt veeproovide lahustunud hapniku analüüsid labori hapnikumeetriga (MU 6100 L, tootja VWR), mis võimaldasid kontrollida sondi hapniku andmete kvaliteeti, vajadusel lisati töötlusprogrammi lahustunud hapniku parand.

2.4. Poijaamad

Projekti piirkonnas kasutati fikseeritud hoovusmõõtjaid ja põhjalähedast merekeskkonna parameetreid (temperatuur, soolsus, hägusus, hapnik) mõõtvat sondi. Hoovusmõõtja Model 106 (Valeport) paigaldati 5 m kaugusele merepinnast, vee sügavus asukohas oli 41 m. Akustiline hoovusmõõtja ADCP (300 kHz, RDI) paigaldati koos SBE16+ (Seabird) keskkonnaparametreid mõõtva sondiga 71 m sügavusele. ADCP asus liuguri sektsiooni keskel ja Model 106 selle idapoolseimas punktis. Mõõtmistega alustati veebruari lõpus 2020, ADCP ja sond mõõtsid kuni augusti lõpuni, punkthoovusmõõtja kuni mai keskpaigani. Lisaks kasutame analüüsis 2015. a aprilli lõpust kuni 2016. a jaanuari keskpaigani tehtud lainetuse mõõtmisi lainepoiga Waverider (Datawell). Lainepoi asus liuguri sektsioonist ning hoovusmõõtjatest veidi põhjapool. Mõõtjate täpsed asukohad on toodud joonisel 3.1.21.

2.5. Mudelandmed

Mudelandmetena kasutati päeva keskmisi Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) reanalüüsi ja prognoosi andmeid.

Reanalüüsi andmed lahustunud hapniku ja klorofüll-*a* jaoks pärinevad BALTICSEA_REANALYSIS_BIO_003_012 produktist (väljaanne 2.5) (CMEMS, n.d.-b), ning temperatuuri ja soolsuse jaoks BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011 produktist (väljaanne 2.5) (CMEMS, n.d.-d). Mõlema

produkti arvutamiseks kasutati füüsikalise-geokeemilist mudelsüsteemi NEMO-SCOBI. Produktide kvaliteeti on hinnatud võrdluses nii sõltuvate kui sõltumatute vaatlustega.

Lahustunud hapniku ja klorofüll-*a* prognoosi andmed on võetud BALTICSEA_ANALYSISFORECAST_BGC_003_007 produktist (väljaanne 6.0) (CMEMS, n.d.-a). Produkt põhineb ERGOM mudeli BAL MFC-ERGOM versiooni simulatsioonidel. BAL MFC ERGOM mudelit kasutatakse võrgus koos BAL MFC ookeani mudeliga, mis põhineb NEMO 4.0 süsteemil. Produkt on horisontaalse lahutusega 1 meremiil (nm).

Temperatuuri ja soolsuse prognoosi andmed pärinevad BALTICSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_003_006 produktist (väljaanne 5.1) (CMEMS, n.d.-c). Produkti arvutamiseks kasutati mudelsüsteemi NEMO 4.0, mis on horisontaalse eraldusvõimega 1 meremiil (nm), ning vertikaalis koosnevad kuni 55 kihist. Kihi paksus varieerub 1 – 24 m, olles pinnal väikseim ning suurenedes sügavusega.

Produktide detailsemad kirjeldused, valideerimisraamistikud, hinnangulised täpsusnumbrid, kui ka produktide tulemused on leitavad nende vastavatest kvaliteediteabe dokumentidest.

2.6. Muud andmed

Töös on kasutatud Eesti Keskkonnaseire Infosüsteemi (KESE, kese.envir.ee), aastate 2019 ja 2020, anorgaaniliste toitainete (NO_2+NO_3 , PO_4) andmeid võrdluses mudelproduktidega ja divesiniksulfiidi (H_2S) andmeid hapniku puudujäägi indikaatori arvutamisel (vt ptk. 2.7.).

2.7. Hapniku puudujäägi indikaator

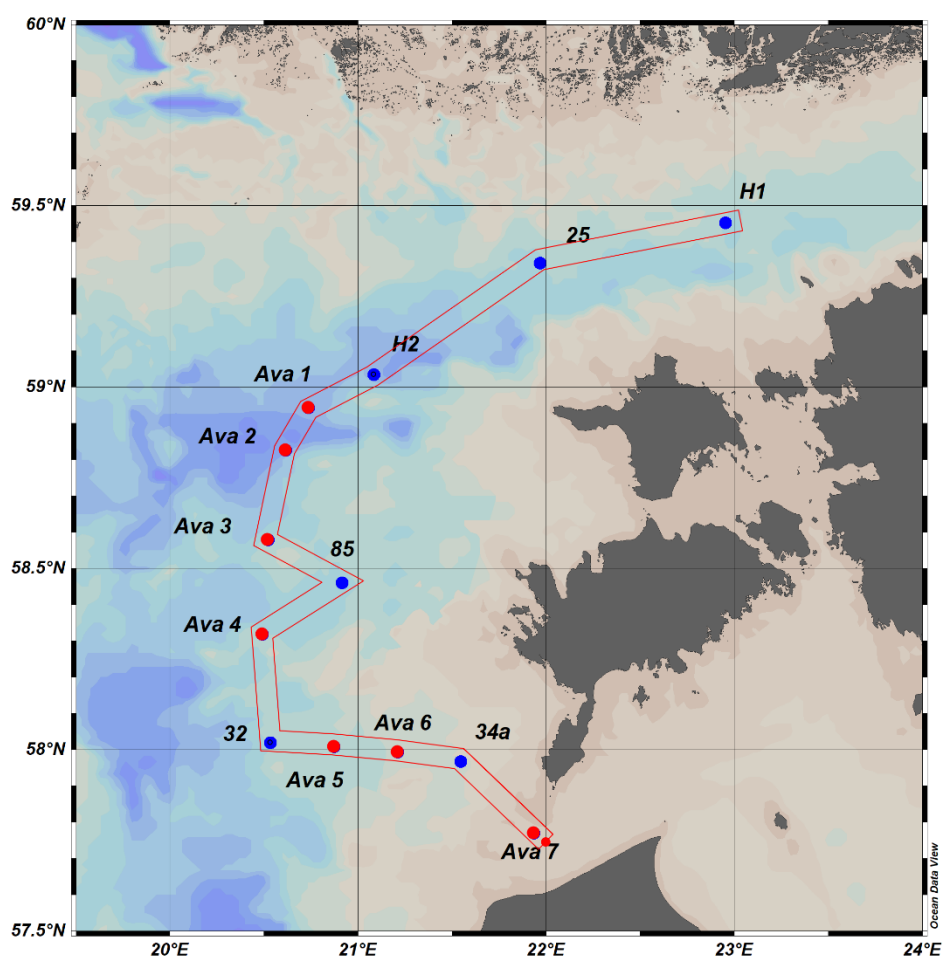
Töös arvutati HELCOMi tuumindikaatori *Oxygen debt* (hapniku puudujääk) väärtused 2019. ja 2020. a andmete põhjal lähtudes nimetatud indikaatori metoodikast (HELCOM, 2018d). Indikaatori väärtuste leidmiseks kasutati seire käigus mõõdetud hapniku ja soolsuse profiile, H_2S andmeid KESEst ja topograafia andmetena IOW sügavusandmeid (Seifert et al., 2001).

3. Tulemused

3.1. Vaatlused

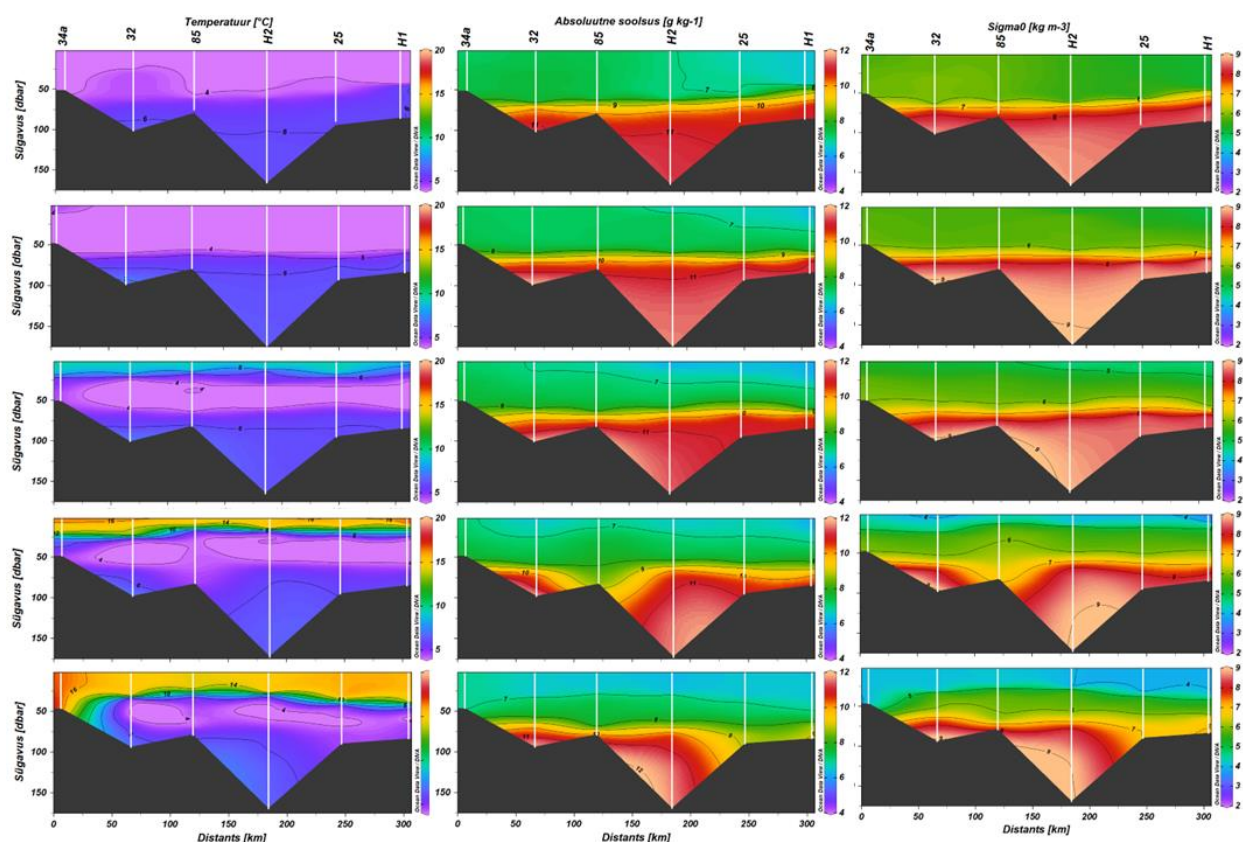
3.1.1. Klassikalised vaatlused uurimislaevalt

Eestis teostatakse avamere seiret jaanuaris, aprillis, mais, juulis, augustis ja oktoobris, mille käigus külastatakse ka käesoleva projekti ala. Vaatlusperioodil viidi uurimislaevaga avamere seiret läbi kokku 11 korral (2019 aastal 5 korda ja 2020 aastal 6 korda). Joonisel 3.1.1. on toodud RITA projektis kasutatavad jaamad, kuhu kuuluvad nii riikliku seire kui ka vaatlusperioodi ajaks valitud lisajaamad. Järgnevalt on välja toodud Eesti riikliku seire andmed.



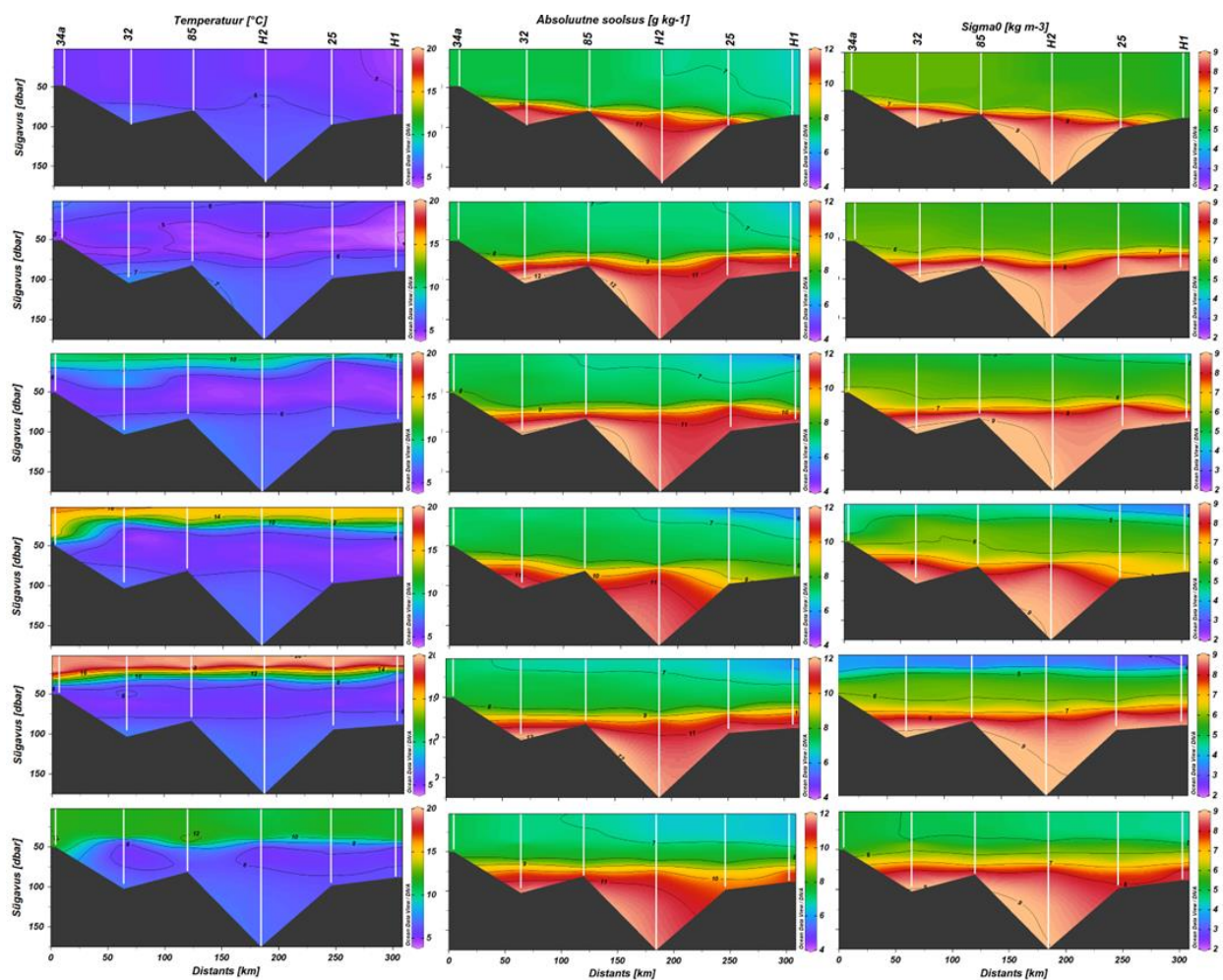
Joonis 3.1.1. Avamere kaart mõõtmisjaamade asukohtadega. Tähistatud on Eesti riikliku seire käigus külastatud seirejaamad 34a, 32, 85, H2, 25, H1 (sinisega) ja käesoleva projekti raames külastatud lisajaamad Ava1 kuni 7 (punasega), mida on kasutatud lõigete joonistamiseks (punasega tähistatud trajektoor suunaga Ava 7 kuni H1).

Talvest varakevadeni muutusid temperatuur ja soolsus vähe (joonis 3.1.2.). Vertikaalne stratifikatsioon esines kõikides parameetrites. Juuni alguseks oli ülemise kihi temperatuur tõusnud üle 8 °C ja on tekkinud termokliin. Soolsuse jaotuses ei esinenud samal perioodil suurt muutust, kuigi võis märgata magedama ($< 7 \text{ g kg}^{-1}$) ja väiksema tihedusega ($< 5 \text{ kg m}^{-3}$) vee levikut lõike põhjapoolsemast otsast kuni jaamani H2. Juuliks oli pinnakihis välja kujunenud tugevam termokliin, mis eraldas külma vahekihti ülemisest kihist, kus temperatuur oli üle 14 °C, kohati ka üle 16 °C. Pinnakihi tihedus oli terve lõike ulatuses väiksem kui 5 kg m^{-3} , jaamades 32 ja H1 isegi alla 4 kg m^{-3} . Lisaks oli jaama 85 põhjakihti jõudnud väiksema tiheduse ja soolsusega veemass võrreldes kevadega. Augustiks oli segunenud pinnakihi alumine piir liikunud sügavamale, ning võis täheldada ka magedama ($< 9 \text{ g kg}^{-1}$) ja väiksema tihedusega ($\sim 7 \text{ kg m}^{-3}$) vett jaamade H1 ja 25 põhjakihis lõike põhjapoolses osas.



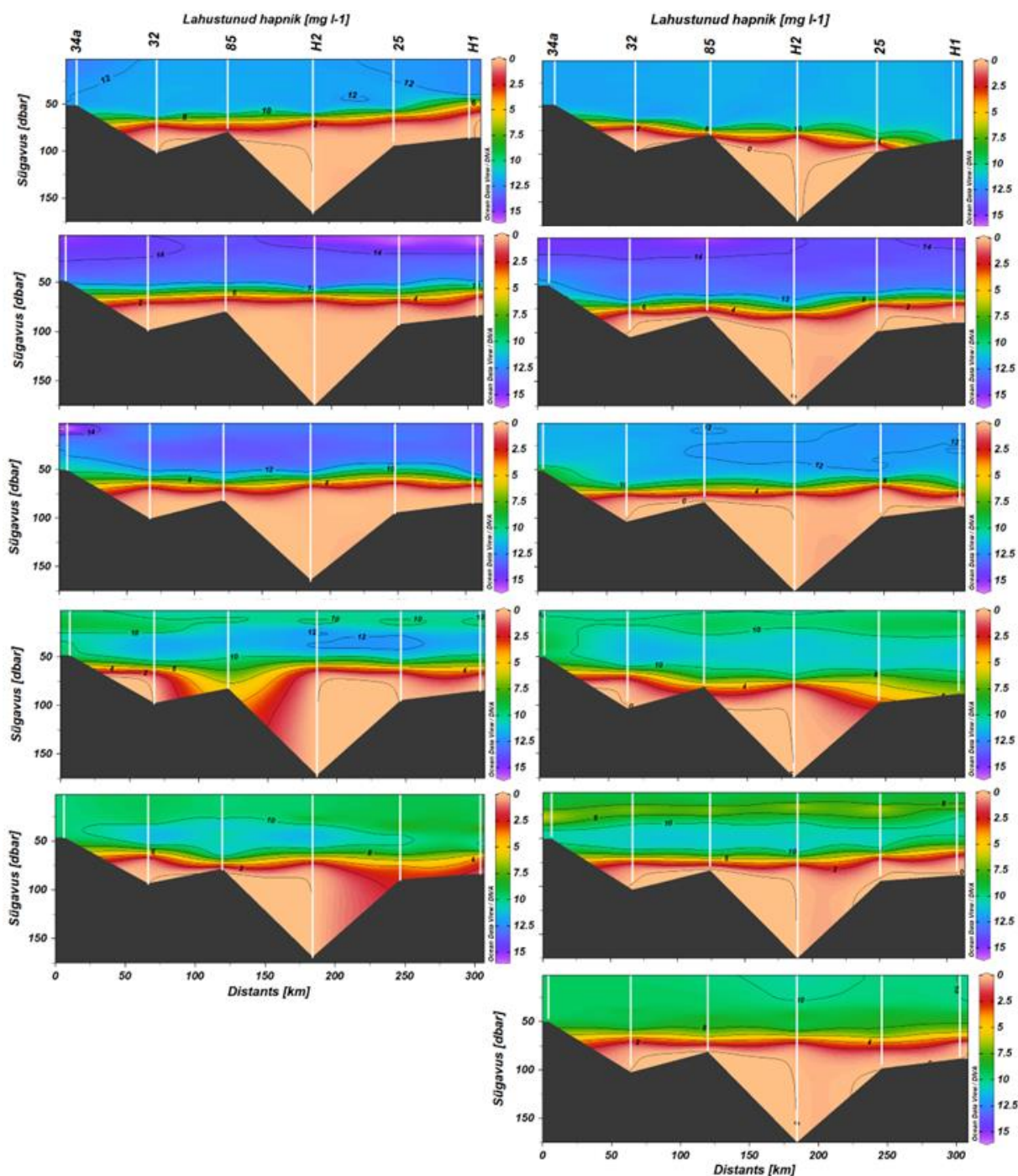
Joonis 3.1.2. Riikliku seire (ülevalt alla jaanuar, aprill, juuni, juuli ja august) käigus registreeritud temperatuuri, soolsuse ja tiheduse jaotused aastal 2019. Jaamade paiknemine avameres on toodud joonisel 3.1.1. ja lõike distants on toodud Sõrve säärest läänes paiknevast jaamast 34a kuni Soome lahe lähedal paikneva jaamani H1. Sondeerimised on kujutatud valgete vertikaaljoontega. Põhjareljeef on võetud sondeerimisjaamade sügavuste põhjal, mis jaamade vahel ei vasta tegelikule reljeefile.

Sarnaselt eelmisele aastale muutusid 2020. a algusest kuni varakevadeni temperatuur ja soolsus suhteliselt vähe. Temperatuur oli kogu veesamba ulatuses 5 – 6 °C, ning suuri temperatuuri muutusi ei esinenud. Juuni alguseks oli kõikides jaamades pinnakihi temperatuur tõusnud üle 10 °C ja suurema soolsuse (~11 g kg⁻¹) ja tihedusega (>7 kg m⁻³) põhjakiht oli laienenud jaamani H1. Pinnakihis oli sarnaselt eelmisele aastale lõike põhjaosas väiksema soolsuse ja tihedusega vesi. Juuliks oli välja kujunenud termokliin umbes 25 meetri sügavusel. Ülemise kihi temperatuur oli üle 14 °C, lõike lõuna poolsemas osas pinna lähedal isegi üle 16 °C. Lõike põhjapoolses otsas võis jällegi täheldada magedama ja väiksema tihedusega vee sissevoolu. Jaama H1 põhjakihis olid soolsuse ja tiheduse väärtused langenud. Augustiks oli pinnakihis üle terve lõike välja kujunenud tugev termokliin, mille kohal oli pinnakiht temperatuuriga > 18 °C). Pinnakihis olid tiheduse väärtused <4 kg m⁻³ ja lõike põhjapoolses otsas võis märgata ka tiheduse miinimumi (<3 kg m⁻³). Oktoobriks oli veesammas kuni umbes 50 meetri sügavuseni läbi segunenud.



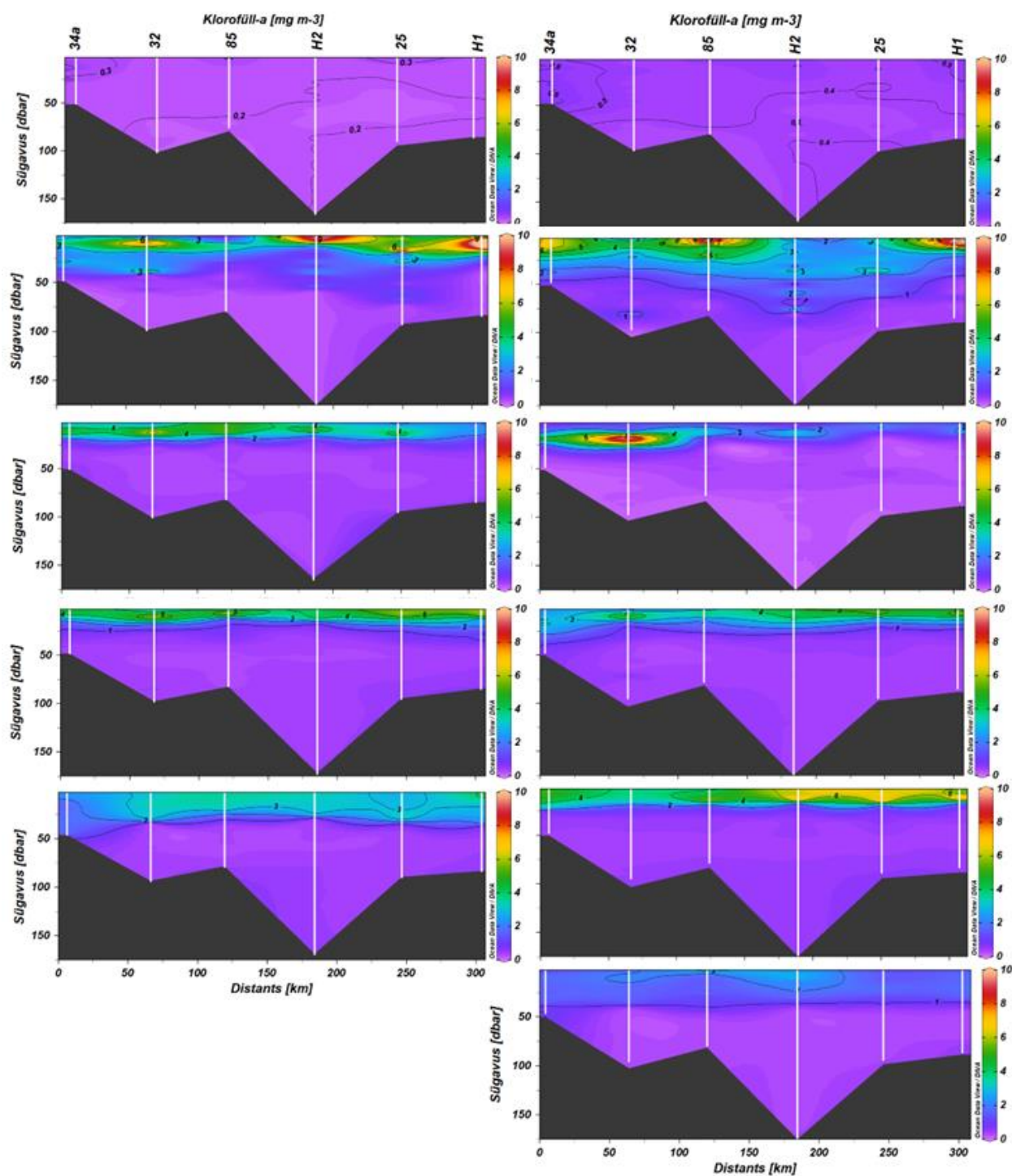
Joonis 3.1.3. Riikliku seire (ülevvalt alla jaanuar, aprill, juuni, juuli, august ja oktoober) käigus registreeritud temperatuuri, soolsuse ja tiheduse jaotused aastal 2020. Jaamade paiknemine avameres on toodud joonisel 3.1.1. ja lõike distants on toodud Sõrve säärest läänes paiknevast jaamast 34a kuni Soome lahe lähedal paikneva jaamani H1. Sondeerimised on kujutatud valgete vertikaaljoontega. Põhjareljeef on võetud sondeerimisjaamade sügavuste põhjal, mis jaamade vahel ei vasta tegelikule reljeefile.

Lahustunud hapniku jaotus veesambas varieerus läbi kahe aasta. Püsiv hapnikuvaegus (lahustunud hapnik $<2.9 \text{ mg l}^{-1}$) põhjakihis esines mõlemal aastal jaamades H2 ja 32. Jaamades H1 ja 85 põhjakihi hapnikutingimused küll paranesid periooditi, kuid valdavalt esines seal hapnikuvaegus. Jaam 34a oli ainuke seirejaam, milles ei registreeritud mõõtmiste ajal põhjakihis hapnikuvaegust. Jaanuaris oli mõlemal aastal ülemine kiht kuni $\sim 50 \text{ m}$ läbi segunenud, küll aga esines sellel perioodil kummalgi aastal märkimisväärne hapniku hüppekihi põhja-lõunasuunaline kalle. 2019. a oli hapniku hüppekiht sügavam lõike lõunapoolses otsas ja 2020. a lõike põhjapoolses otsas, mistõttu ka 2020. a jaanuaris põhjakihi hapnikutingimused jaamas H1 paranesid. Koos fütoplanktoni suurenenud aktiivsusega aprillis suurenesid sellel perioodil pinnakihi ka lahustunud hapniku kontsentratsioonid, mistõttu võis mõlemal aastal aprillis täheldada maksimaalseid pinnakihi hapnikuväärtusi ($> 14 \text{ mg l}^{-1}$). Suveperioodi alguses hakkasid temperatuuri tõusust ning küllastuse langusest tingituna pinnakihi hapniku sisaldused langema. Samas, juulis võis märgata põhjakihi hapnikutingimuste paranemist jaamades 85 (mõlemal aastal) ja H1 (2020. a). Augustiks olid pinnakihi väärtused veelgi langenud, eriti 2020. a-l. Oktoobriks oli ülemine kiht jahedam ja sügavam, kuid hapniku kontsentratsioonid ei olnud veel saavutanud jaanuari taset.



Joonis 3.1.4. Riikliku seire (ülevalt alla jaanuar, aprill, juuni, juuli, august ja oktoober) käigus registreeritud lahustunud hapniku jaotused aastatel 2019 (vasakul) ja 2020 (paremal). Jaamade paiknemine avameres on toodud joonisel 2.1.1. ja löike distants on toodud Sõrve säärest läänes paiknevast jaamast 34a kuni Soome lahe lähedal paikneva jaamani H1. Sondeerimised on kujutatud valgete vertikaaljoontega. Põhjareljeef on võetud sondeerimisjaamade sügavuste põhjal, mis jaamade vahel ei vasta tegelikule reljeefile.

Klorofüll-a jaotus on mõlema aasta puhul sarnane. Jaanuaris, kui primaarproduksioon on minimaalne, on ka klorofüll-a väärtused nulli lähedased. Varakevadel, koos päikesekiirguse ja veetemperatuuri tõusu ning stratifikatsiooni tekkega, suureneb ka fütoplanktoni kasv, mis paneb alguse kevadöitsengule. Viimane avaldub klorofüll-a kontsentratsioonide tõusus pinnakihis, mida võib näha ka aprilli seireandmetes. Mõlema aasta puhul esinevad sellel perioodil mitmes jaamas klorofüll-a maksimumid, $>8 \text{ mg m}^{-3}$, ülemises kihis. Suveperioodi saabudes hakkab primaarproduksioon aeglustuma, ning vähenevad ka klorofüll-a kontsentratsioonid. Juuni seire ajaks on pinnakihis väärtused keskmiselt $<6 \text{ mg m}^{-3}$, ning mõlemal aastal on märgata jaamas 32 pinna-aluseid maksimume, 2019 aastal ligikaudu 6 mg m^{-3} ja 2020 aastal $> 8 \text{ mg m}^{-3}$. Suve jooksul varieeruvad klorofüll-a väärtused jaamade vahel aastati erinevalt. Suurim erinevus kahe aasta vahel esineb augustis, kui 2019. aastal olid pinnakihi väärtused madalamad, $\sim 3 \text{ mg m}^{-3}$. 2020. aasta augustis olid pinnakihi väärtused suuremad, ulatudes lõike põhja poolsemas osas üle 6 mg m^{-3} . Oktoobriks olid pinnakihi väärtused veelgi langenud.

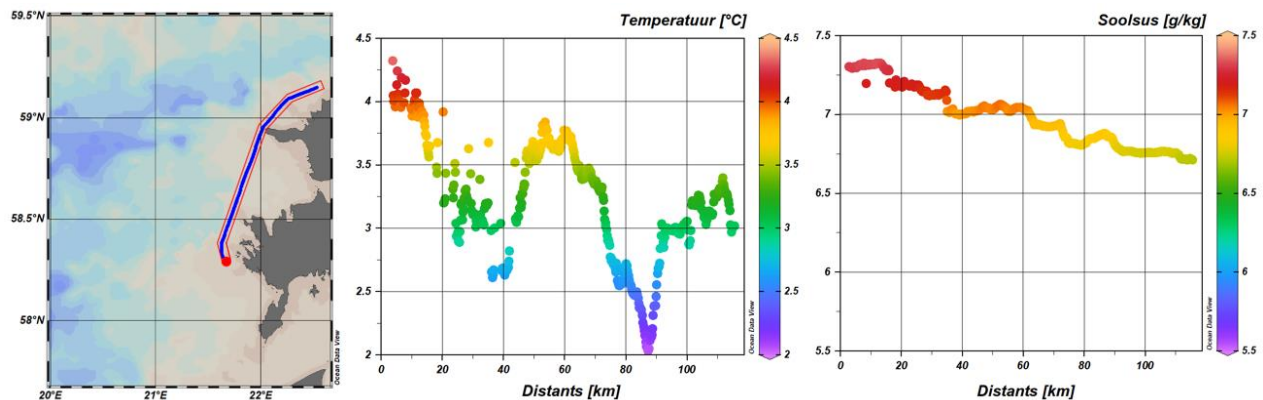


Joonis 3.1.5. Riikliku seire (ülevalt alla jaanuar, aprill, juuni, juuli, august ja oktoober) käigus registreeritud klorofüll-a jaotused aastatel 2019 (vasakul) ja 2020 (paremal). Jaamade paiknemine avameres on toodud joonisel 3.1.1. ja lõike distants on toodud Sørve säärest läänes paiknevast jaamast 34a kuni Soome lahe lähedal paikneva jaamani H1. Sondeerimised on kujutatud valgete vertikaaljoontega. Põhjareljeef on võetud sondeerimisjaamade sügavuste põhjal, mis jaamade vahel ei vasta tegelikule reljeefile.

3.1.2. Kõrge lahutusega mõõtmised pinnakihis

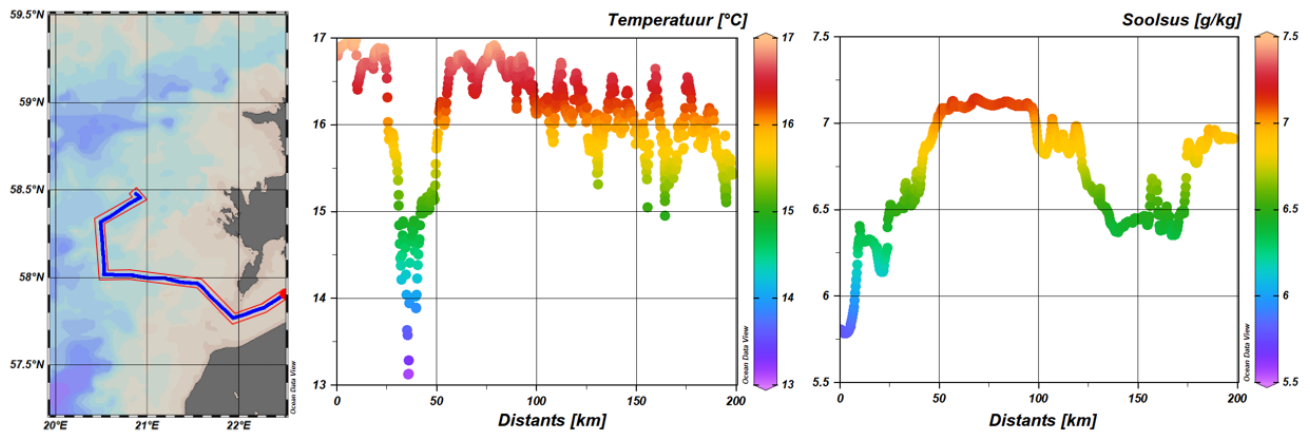
Salmeboxiga teostatud kõrglahutusega mõõtmistel on kasutatud temperatuuri ja soolsuse andmeid iseloomustamaks mere pinnakihi termohaliinseid omadusi 2019. ja 2020. aasta seirereiside põhjal. Mõõtmised Salmeboxiga toimusid põhja-lõunal suunal, kuid joonised esitatud vastupidisel suunal, algusega Liivi lahest, kus punane täpp näitab lõigu algust.

Aastal 2019 toimunud seirereisidest on esitatud andmed 22.01-23.01 ja 15.07-20.07.2019 reise kohta (katavad uuringuala osaliselt). Mõõdistuslõigul oli jaanuaris merevee madalaim temperatuur 2,02 °C Hiiu maast Kõpu poolsaarest põhjapool ja kõrgeim temperatuur 4,72 °C Saaremaast läänes. Merevee soolsus jäi vahemikku 6,61-7,22 g kg⁻¹ (Joonis 3.1.6.).



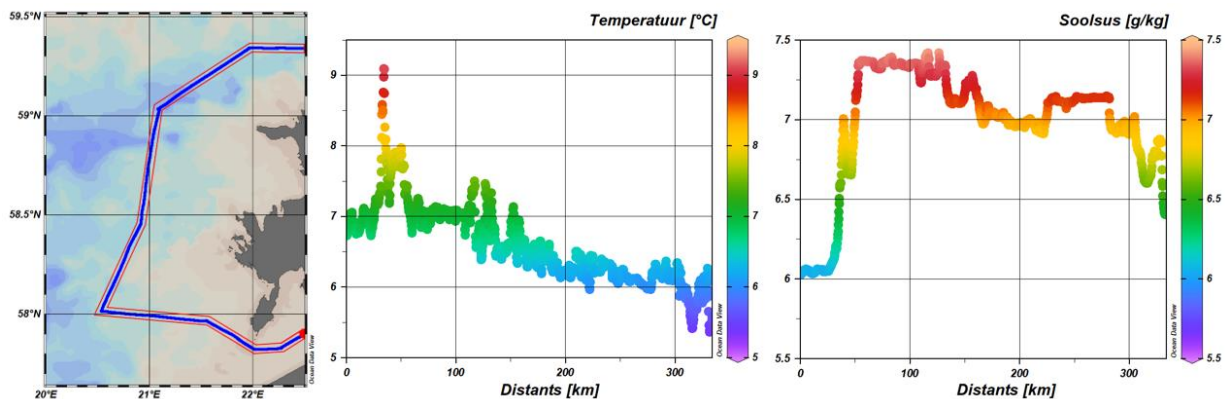
Joonis 3.1.6. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 22.01-23.01.2019. Mõõdistuslõigu alguspunkt tähistatud punase täpiga.

Juulis toimunud seirereisi andmetest on osaliselt olemas andmed 16.07-17.07.2019 kohta. Kõige madalam merevee temperatuur 13,12 °C mõõdeti Irbe väina Liivi lahe osas ja kõige kõrgem temperatuur lõike kõige idapoolsemas osas Liivi lahes 16,99 °C. Samuti registreeriti kõige madalam merevee soolsus Liivi lahes 5,69 g kg⁻¹, samas kui kõrgeim soolsus väärtusega 7,04 g kg⁻¹ registreeriti Saaremaast edelas (Joonis 3.1.7.).



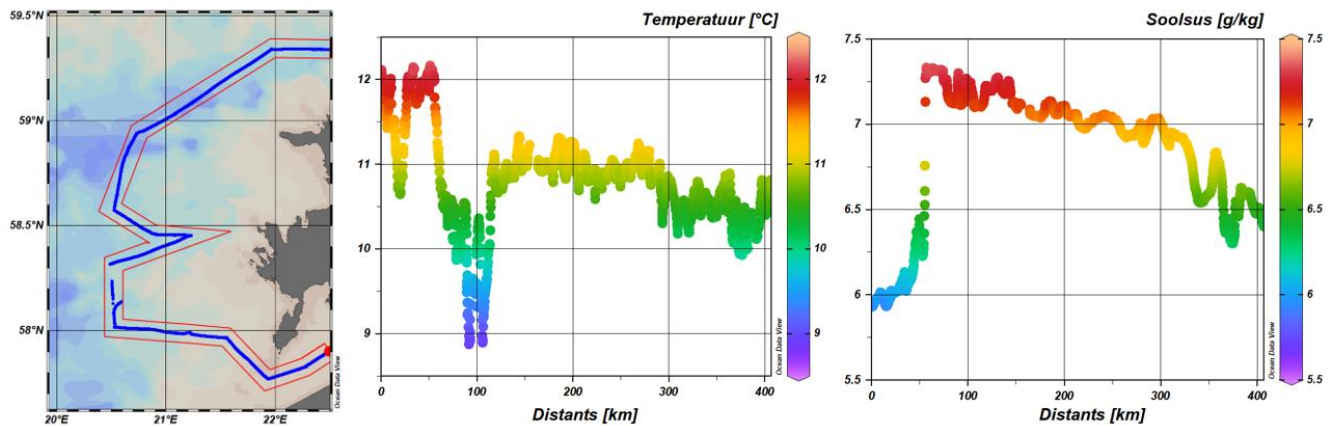
Joonis 3.1.7. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 16.07-17.07.2019. Mõõdistuslõigu alguspunkt on tähistatud punase täpiga.

2020. aasta seirereiside andmetest on esitatud andmed maist kuni oktoobrini. Mai reis registreeriti merevee madalaim temperatuur mõõdistuslõigu põhjapoolsemas osas, kus see oli 5,37 °C ja kõrgeim temperatuur registreeriti Irbe väina lähedal, 9,1 °C. Madalaim merevee soolsuse väärtus registreeriti samuti Irbe väina lähedal, kus see oli 5,92 g kg⁻¹ ja kõrgeim Saaremaast edelas, ulatudes kuni 7,32 g kg⁻¹.



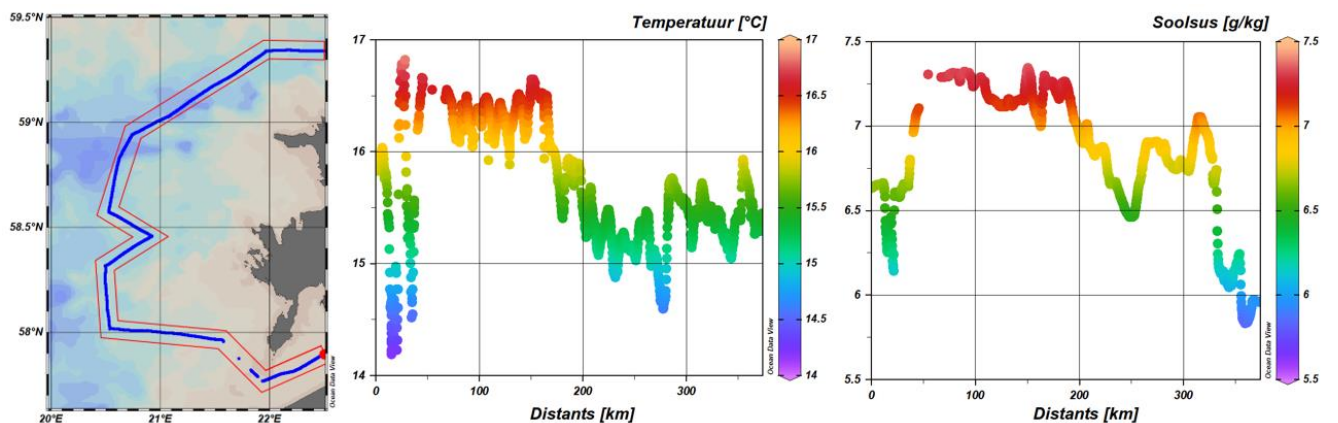
Joonis 3.1.8. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 05.05.-07.05.2020. Mõõdistuslõigu alguspunkt on tähistatud punase täpiga.

Juuni seirereis toimus ajavahemikul 01.06-06.06.2020, kuid esitatud on andmed 02.06-03.06.2020 kohta. Merevee temperatuur varieerus antud lõigul üle 3 °C, olles 8,88 °C juures Saaremaast edelas ning 12,23 °C Irbe väinas. Samuti registreeriti madalaim merevee soolsus Irbe väinas 5,83 g kg⁻¹, kuid kõrgeim väärtus vahetult enne Irbe väinast läänes; 7,32 g kg⁻¹ (Joonis 3.1.9.).



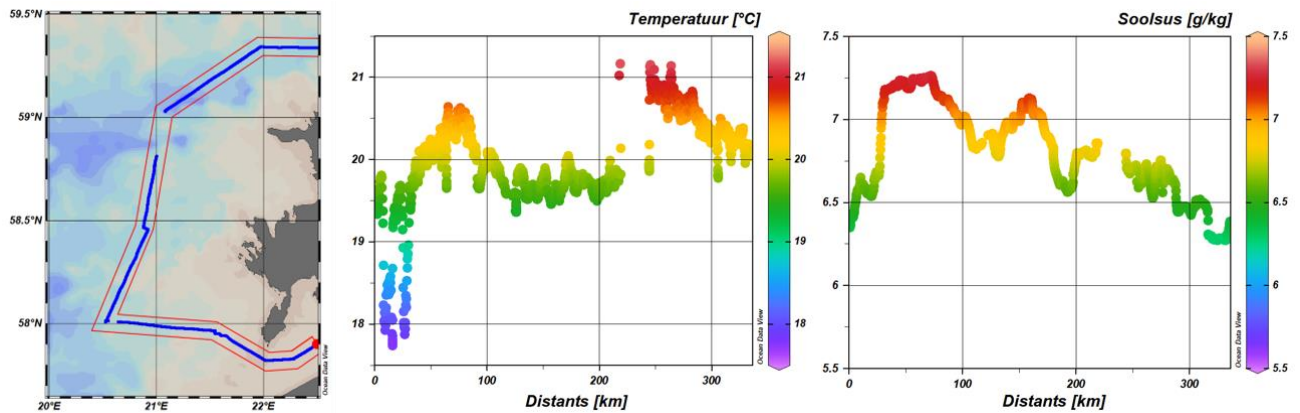
Joonis 3.1.9. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 02.06-03.06.2020. Mõõdistuslõigu alguspunkt on tähistatud punase täpiga.

Juuli seirereis toimus 13.07-17.07.2020, kuid esitatud andmed on mõõdetud 13.07-14.07.2020 (Joonis 3.1.10.). Juulis toimunud seirereisil mõõdeti kõrgeim merevee temperatuur 16,82 °C lõigu lõunapoolseimas osas ning madalaim temperatuur 14,19 °C Irbe väinas. Soolsus oli madalaim lõigu põhjapoolseimas osas; 5,74 g kg⁻¹, ning kõrgeim (7,23 g kg⁻¹) Läänemere avaosas.



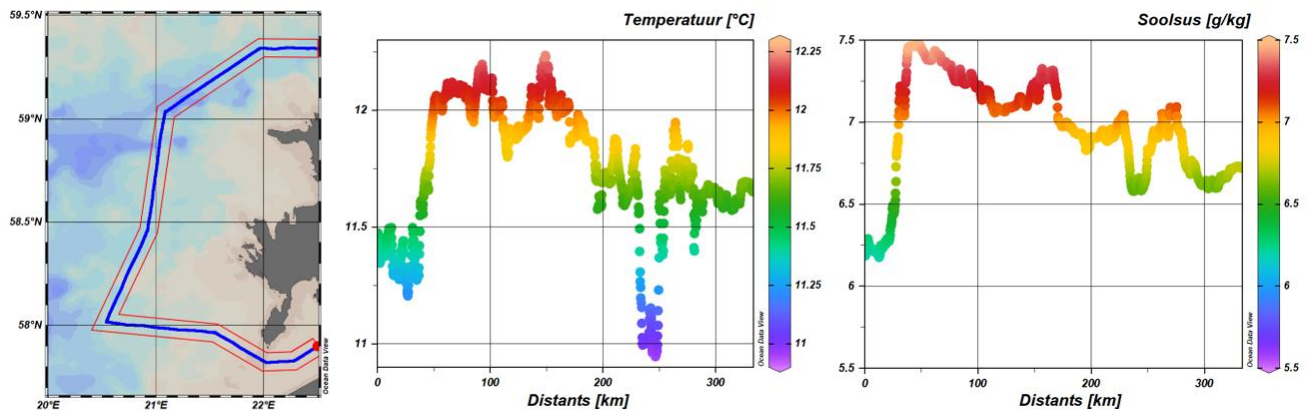
Joonis 3.1.10. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 13.07-14.07.2020. Mõõdistuslõigu alguspunkt on tähistatud punase täpiga.

Augusti seirereis toimus ajavahemikul 24.08-28.08.2020. Mõõdistusandmed on esitatud 24.08-26.08.20 kohta (Joonis. 3.1.11.). Läänemere avaosas kerkis merevee temperatuur kuni 21,16 °C. Madalama temperatuuriga veemass oli Irbe väinas, kus temperatuur oli 17,76 °C. Kõrgeimad soolsuse väärtused registreeriti Saaremast edelasse jääval mõõdistuslõigul, kus see ulatus kuni 7,16 g kg⁻¹.



Joonis 3.1.11. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 24.08-26.08.2020. Mõõdistuslõigu alguspunkt tähistatud punase täpiga.

Oktoobri seirereis toimus ajavahemikul 29.10-01.11.2020. Esitatud on mõõdistusandmed 30.10-31.10.20 kohta (Joonis 3.1.12.). Oktoobri kuu andmetest on näha jahedama veemassi olemasolu Kõpu poolsaarest läänes, kus registreeriti madalaim vee temperatuur 10,95 °C. Soolsus antud lõigul jäi vahemikku 6,08-7,37 g kg⁻¹.

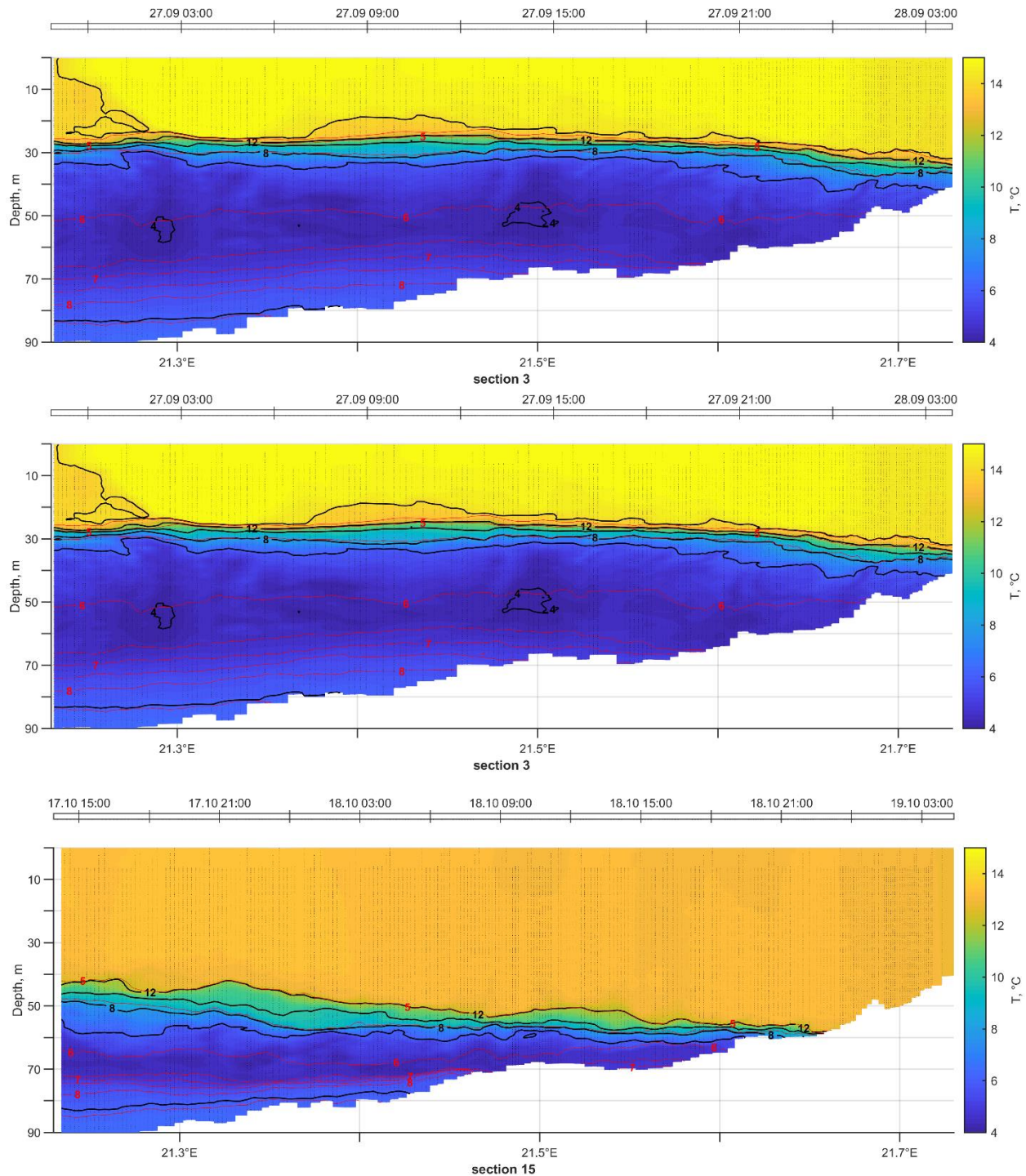


Joonis 3.1.12. Merevee temperatuur ja soolsus mõõdetud 30.10-31.10.2020. Mõõdistuslõigu alguspunkt tähistatud punase täpiga.

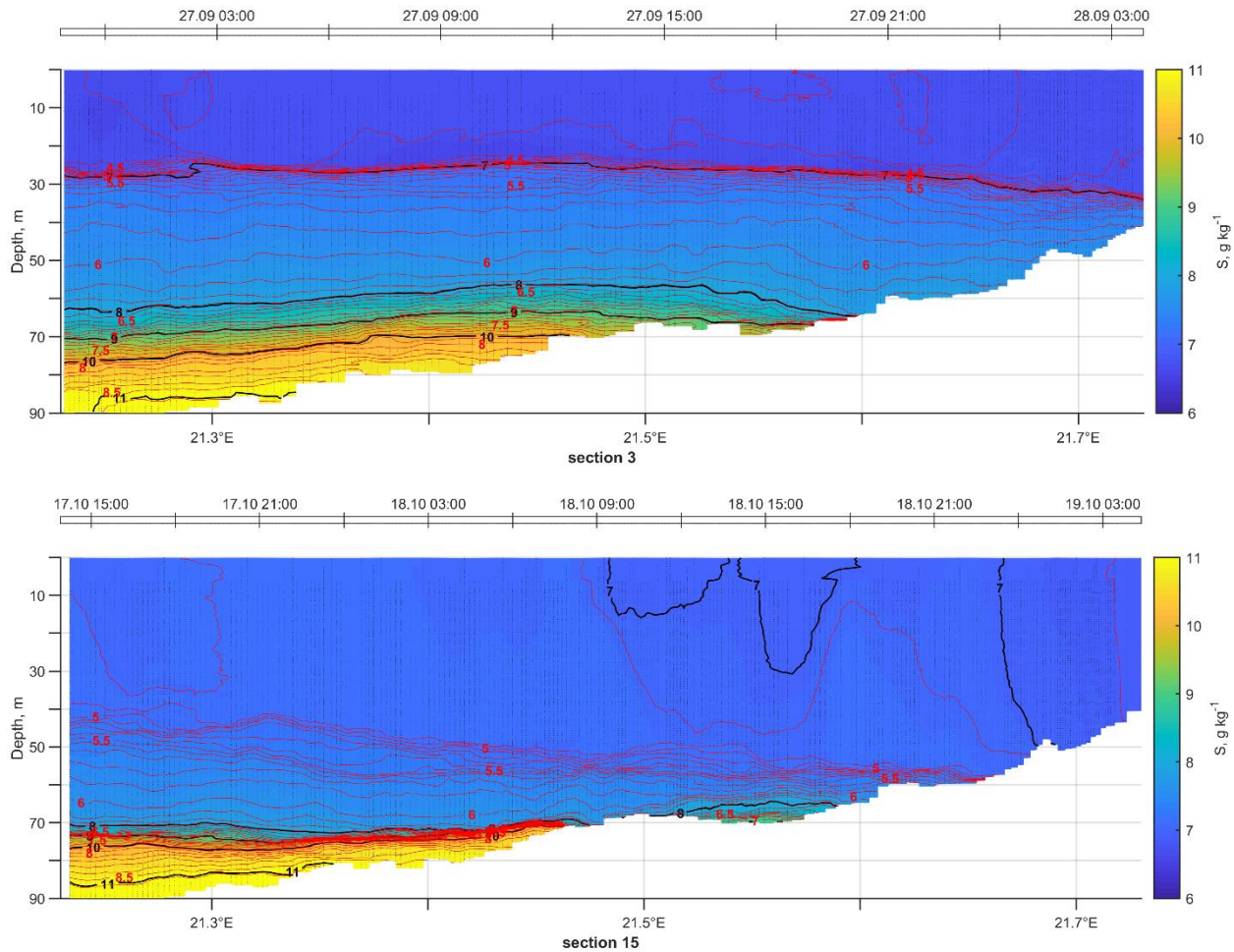
3.1.3. Allveeliuguri vaatlused

Järgnevas peatükis on käsitletud kolme allveeliuguri mõõdistuse tulemused. Sügis 2019, kevad 2020 ja suvi 2020 missioonide kohta on esitatud temperatuuri, soolsuse, tiheduse ja hapniku jaotused mõõdistuslõikel. Iga missiooni puhul esile tõstetud ajaliselt iseloomulik veesamba struktuur.

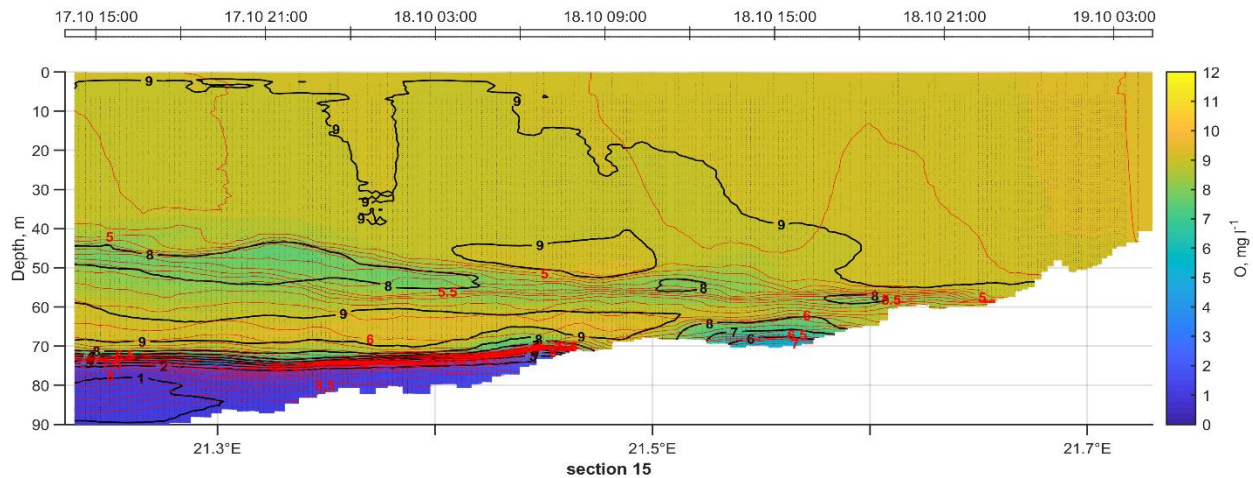
Sügisel iseloomustab merd veepinna jahtumine. Jahenev vesi muutub tihedamaks ning tekib vertikaalne segunemine. Pindmise segunenud veekihi paksus kasvab, sesoonne termokliin on surutud järjest allapoole ja selle tugevus väheneb. Mõõdistusperioodi jooksul langes mere pinnatemperatuur 15,5 °C-lt 12,1 °C-ni. Keskmine soolsus pinnakihis oli $6,8 \pm 0,1 \text{ g kg}^{-1}$. Joonisel 3.1.13 ja 3.1.14 on välja toodud temperatuuri, soolsuse ja tiheduse jaotused lõikel mõõdistusperioodi alguses ja lõpus. Joonisel 3.1.13 on näha vee jahenemine ning pindmise segunenud kihi paksuse kasv. Perioodi algul ulatus segunenud kiht peaaegu 30 m sügavusele, lõpus aga 40-55 m. Oktoobri lõpuks oli lõike rannikupoelses osas veesammas kuni 55 m läbisegunenud. Joonisel 3.1.14 on soolsuse jaotuse taustal esitatud samatihedusjooned tihedama sammuga. Termokliin langeb kokku ülemise püknokliiniga, millele viitavad tihedalt koos asetsevad isopüknid 30 m juures. Perioodi lõpuks oli termokliin peaaegu kadunud, aga halokliin (alumine püknokliin) ca 75 m sügavusel tugevnes seejuures oluliselt. Veesamba tiheduslik jaotus kujundab hapniku jaotumist veesambas. Jooniselt 3.1.15 on näha, et hapnikutingimused on head, 8–9 mg l⁻¹, ülemistes veekihtides, kuid kesised halokliinialustes veekihtides. Oktoobri keskel oli halokliini all hapniku sisaldus oluliselt alla hüpoksia piiri, 1–2 mg l⁻¹.



Joonis 3.1.13. Temperatuuri jaotus 2019. aasta sügisel missioonil. Ülemine joonis on lõige mõõdistusperioodi algusest, 27.09–28.09, ja alumine joonis on lõige mõõdistusperioodi lõpust, 17.10–18.10. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 2 °C) on esitatud temperatuur ning punaste kontuuridega tihedus (samm 0,5 kg m⁻³). Mõõdistuslõige kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).

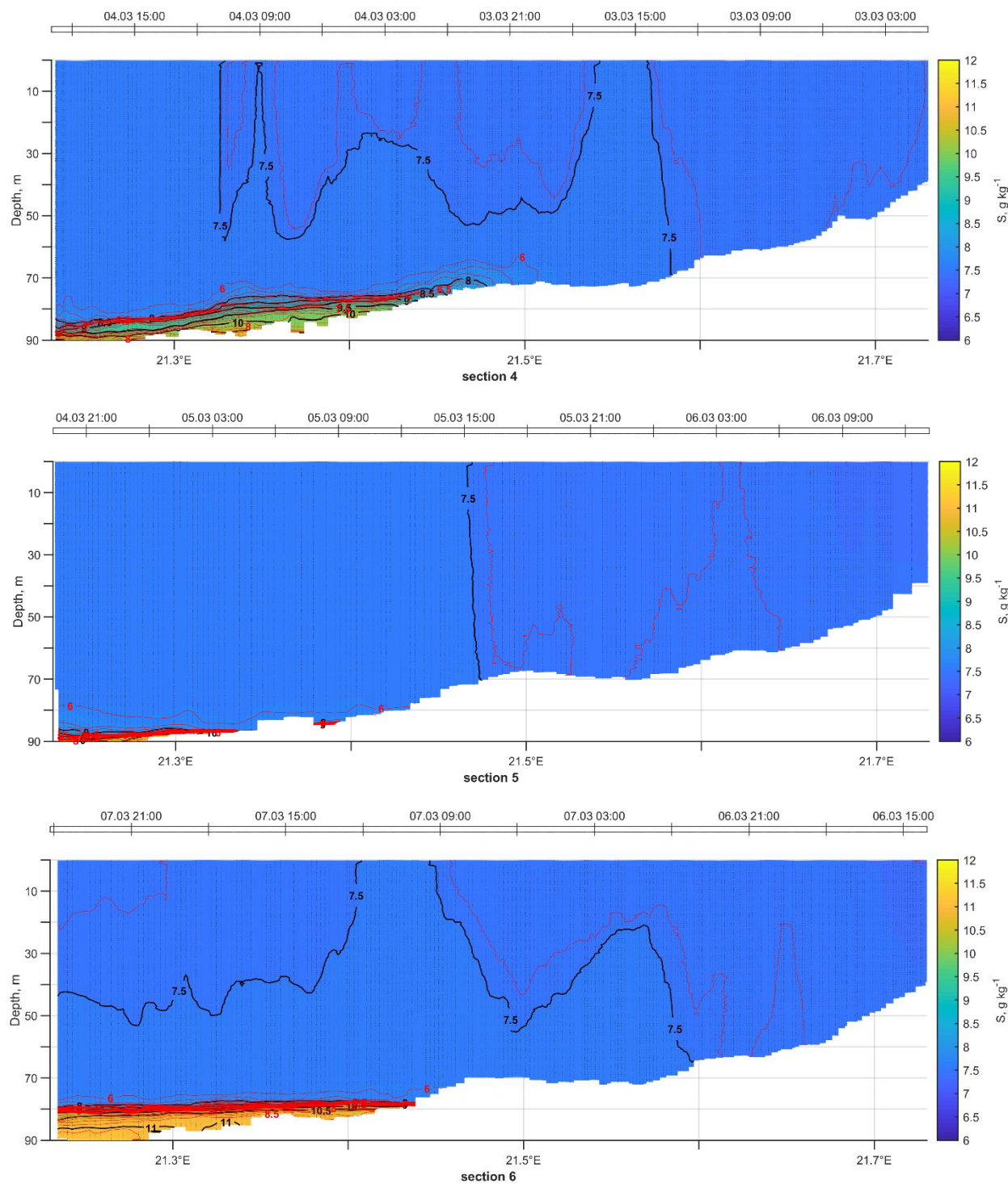


Joonis 3.1.14. Soolsuse jaotus 2019. aasta sügisel missioonil. Ülemine joonis on lõige mõõdistusperioodi algusest, 27.09–28.09, ja alumine joonis on lõige mõõdistusperioodi lõpust, 17.10–18.10. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 1 g kg⁻¹) on esitatud soolsus ning punaste kontuuridega tihedus (samm 0,1 kg m⁻³). Mõõdistuslõige kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).

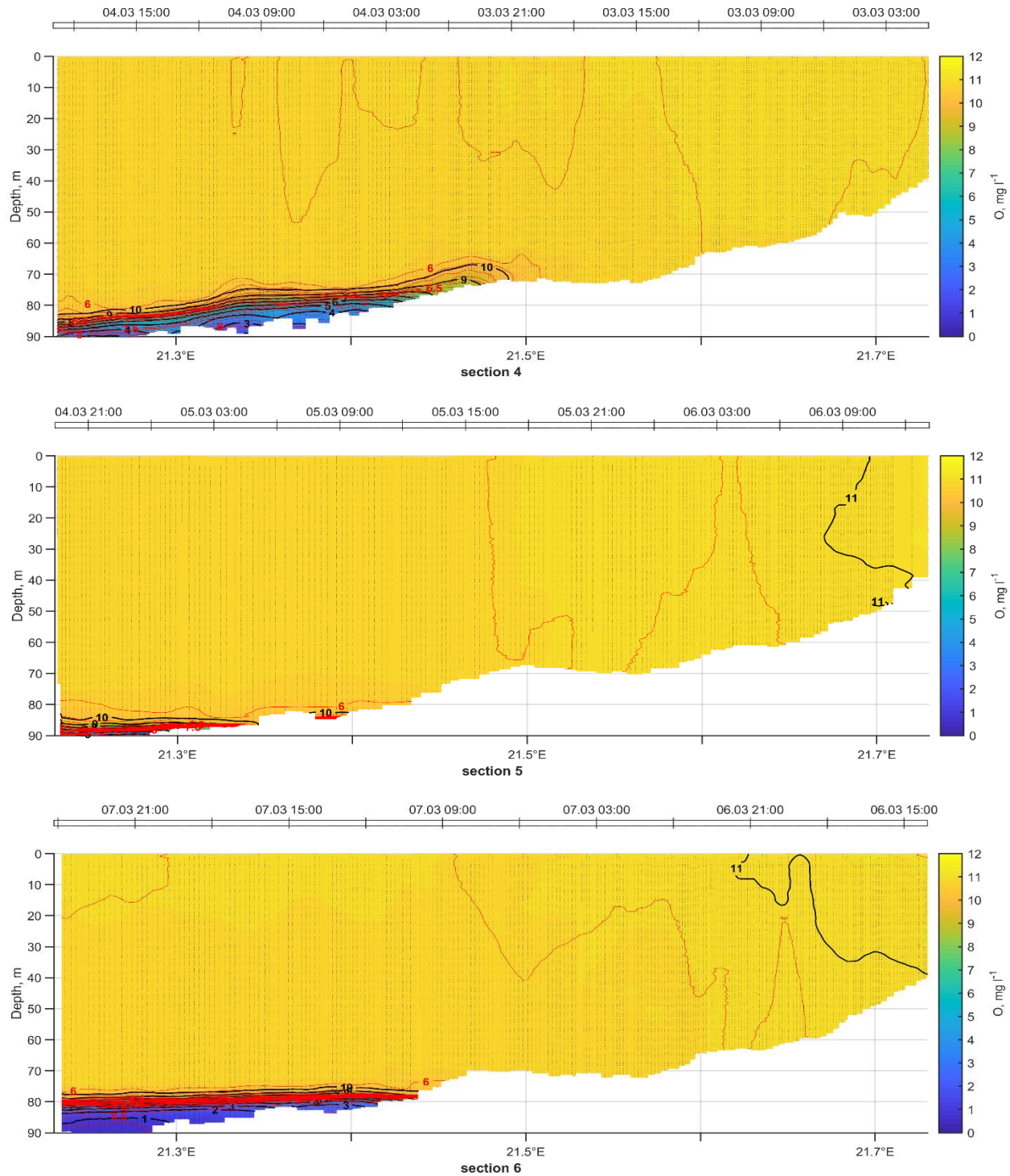


Joonis 3.1.15. Hapniku jaotus 2019. aasta sügisel missioonil. Lõige on mõõdistatud 17.10–18.10. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 1 mg l^{-1}) on esitatud hapniku kontsentratsioon ning punaste kontuuridega tihedus (samm $0,1 \text{ kg m}^{-3}$). Mõõdistuslõige kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).

Talvist veesammast iseloomustab kahekihiline struktuur püsiva halokliiniga aladel. Kuni halokliinini on veesamm läbisegunenud. Kevadel pinnakihi soojenedes hakkab kujunema sesoonne termokliin. Madalamatel aladel oli veesamm homogeenne. Keskmine temperatuur veesambas ülevalpool halokliini oli $4,6 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ja soolsus $7,5 \pm 0,05 \text{ g kg}^{-1}$. Halokliini all oli vesi soojem ja soolasem, vastavalt $6,2 \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $10,5 \pm 0,6 \text{ g kg}^{-1}$. Joonisel 3.1.16 on välja toodud soolsuse ja tiheduse jaotused lõikel perioodil 03.03–07.03. Mõõdistust iseloomustas halokliini märgatav muutlikkus päevade lõikes. 03.03–04.03 mõõdistatud lõikel järgis halokliin põhja kallet, olles umbes 75–85 m sügavusel. Järgmiseks päevaks on halokliin surutud väga põhja lähedale (>85 m) ja on seejuures tugevnenud. 06.03–07.03 mõõdistatud lõikel oli halokliin tõusnud 80 m juurde ning halokliini all kerkisid soolsuse väärtused 11 g kg^{-1} -ni. Koos halokliini liikumisega toimus selge muutus ka põhjalähedaste veekihtide hapnikutingimustes (joonis 3.1.17). Mõnepäevase perioodi jooksul jõudis hüpoksiline vesi mõõdistusalale. Kui 04.03 hapnikupuudust ei esinenud ja halokliini all oli hapniku sisaldus $3\text{--}4 \text{ mg l}^{-1}$, siis 07.03 oli põhja lähedal hapniku sisaldus langenud 1 mg l^{-1} -ni. Veesamba segunenud osas oli hapniku sisaldus $10\text{--}11 \text{ mg l}^{-1}$.

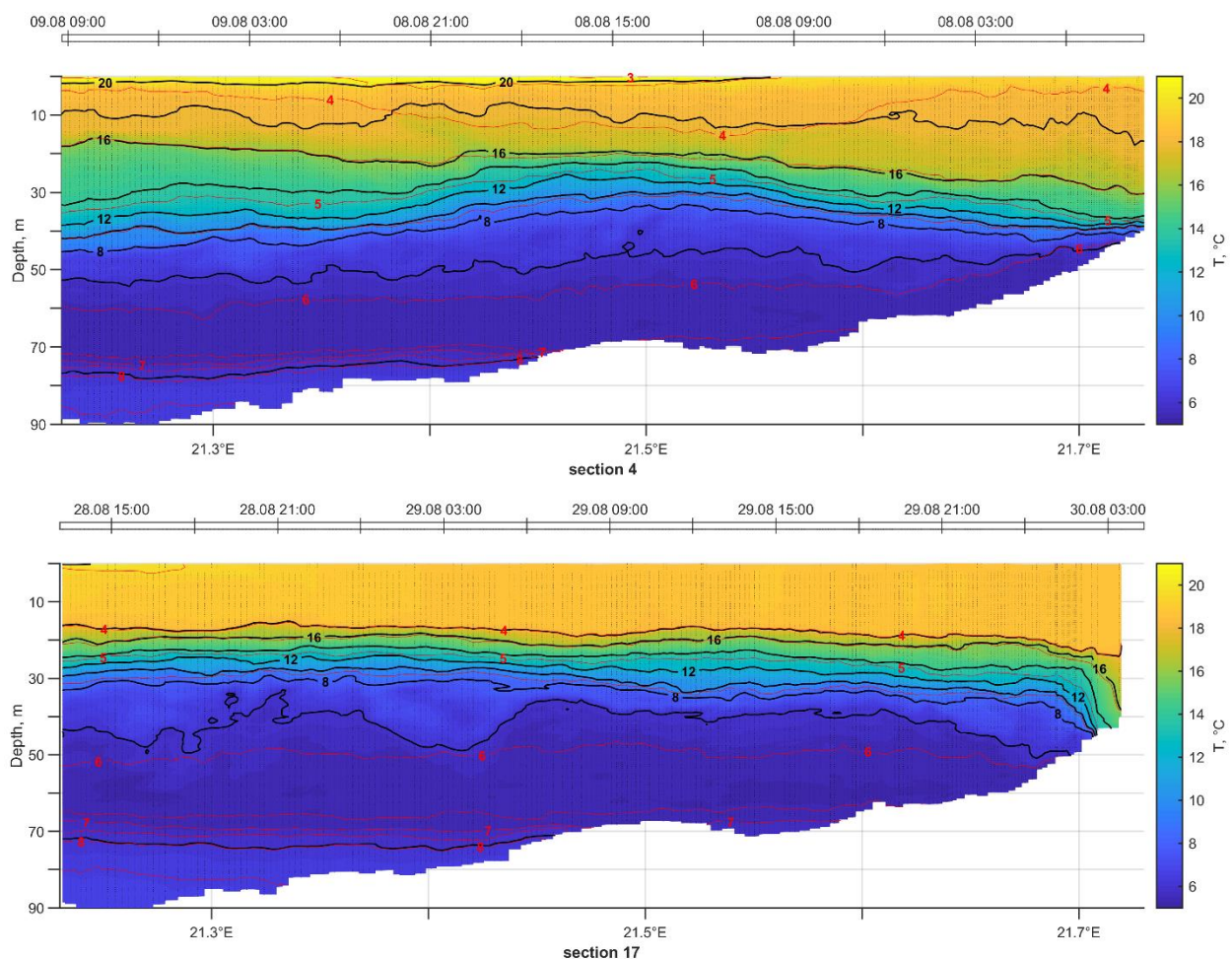


Joonis 3.1.16. Soolsuse jaotus 2020. aasta kevadisel missioonil perioodil 03.03–07.03 sügavuse suhtes. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm $0,5 \text{ g kg}^{-1}$) on esitatud soolsus ning punaste kontuuridega tihedus (samm $0,1 \text{ kg m}^{-3}$). Mõõdistuslõike kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).

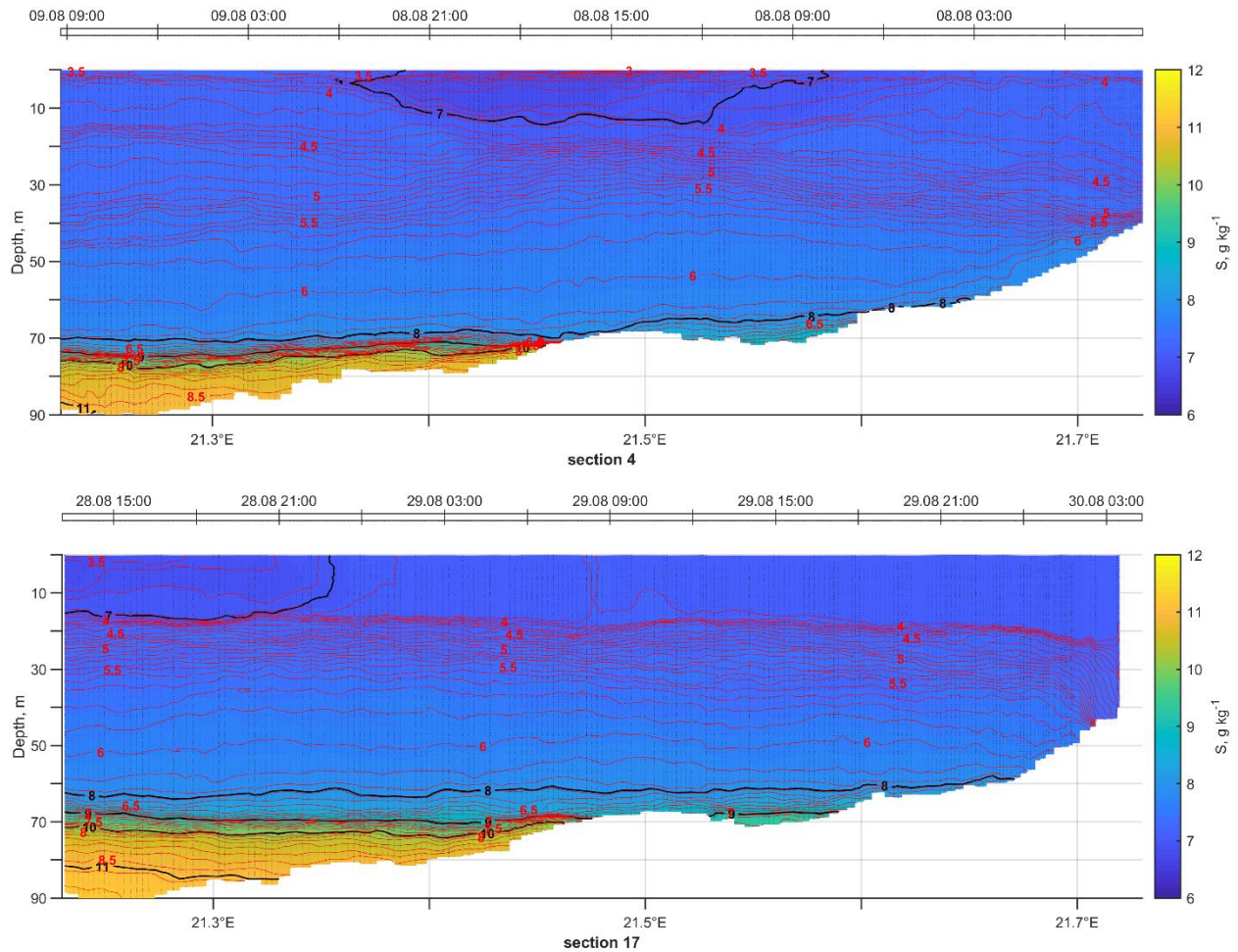


Joonis 3.1.17. Hapniku jaotus 2020. aasta kevadisel missioonil perioodil 03.03–07.03. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 1 mg l^{-1}) on esitatud soolsus ning punaste kontuuridega tihedus (samm $0,1 \text{ kg m}^{-3}$). Mõõdistuslõigete kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).

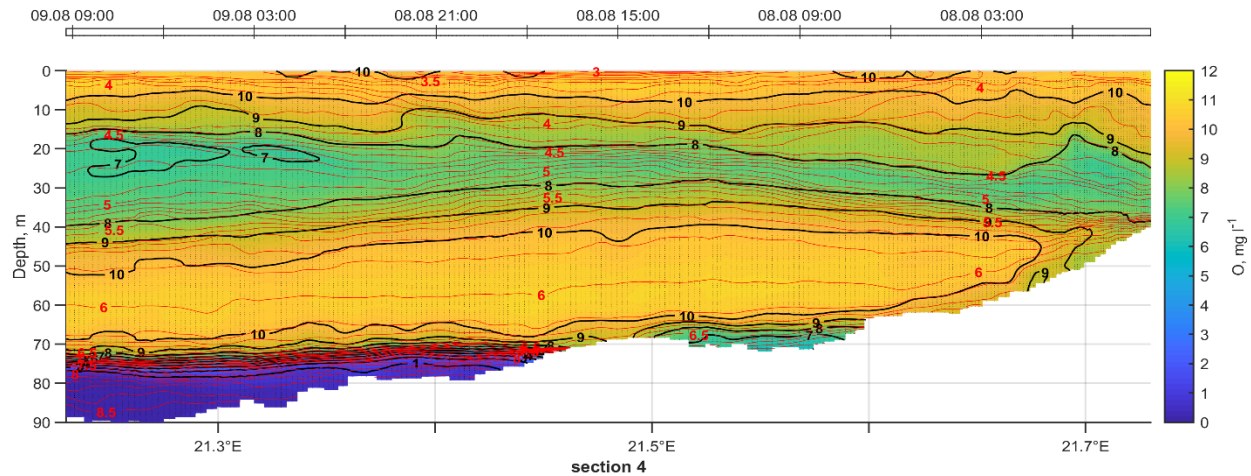
Suvised veesammast iseloomustab kolmekihiline struktuur, kuna püknokliinid takistavad erinevate veemasside segunemist. Madalamatel aladel alumine püknokliin puudub ja struktuur on kahekihiline. Suvi 2020 mõõdistusperioodil oli merepinna temperatuur keskmiselt $19,3 \pm 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ja soolsus $7,1 \pm 0,1 \text{ g kg}^{-1}$. Seseoone termokliini all külmas vahekihi oli temperatuur keskmiselt $5,5 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ja soolsus $8,0 \pm 0,6 \text{ g kg}^{-1}$. Halokliini all olev põhjalähedane vesi oli vahekihi veest soojem ja soolasem, vastavalt $6,4 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ja soolsus $10,8 \pm 0,3 \text{ g kg}^{-1}$. Joonisel 3.1.18 ja 3.1.19 on esitatud temperatuuri, soolsuse ja tiheduse jaotused lõikel mõõdistusperioodi alguses ja lõpus. Suvel on veesamba struktuur muutlik, sõltudes tuulest ja hoovustest. 08.08–09.08 mõõdistatud lõikel ulatus soe, 18–20 °C, pinnakiht 10 m sügavusele. Termokliinis esineb laineline struktuur ning see oli umbes 30 m paks. 28.08–29.08 mõõdistatud lõikel ulatus soe, 18 °C, pinnakiht ligi 20 m sügavusele. Termokliin oli lõike ulatuses ühtlane. Eelnevaga võrreldes oli see tugevam ning umbes 20 m paks. Joonisel 3.1.20 on näide hapniku jaotusest veesambas. Hapniku kontsentratsioon segunenud pinnakihis oli 10 mg l^{-1} . Termokliinis oli hapniku tase madalam, 7–8 mg l^{-1} . Põhja lähedal esines ulatuslik hapnikupuudus sisaldusega $<1 \text{ mg l}^{-1}$.



Joonis 3.1.18. Temperatuuri jaotus 2020. aasta suvisel missioonil. Ülemine joonis on lõige mõõdistusperioodi algusest, 08.08–09.08, ja alumine joonis on lõige mõõdistusperioodi lõpust, 28.08–29.08. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 2 °C) on esitatud temperatuur ning punaste kontuuridega tihedus (samm 0,5 kg m^{-3}). Mõõdistuslõige kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).



Joonis 3.1.19. Soolsuse jaotus 2020. aasta suvisel missioonil. Ülemine joonis on lõige mõõdistusperioodi algusest, 08.08–09.08, ja alumine joonis on lõige mõõdistusperioodi lõpust, 28.08–29.08. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 1 g kg⁻¹) on esitatud soolsus ning punaste kontuuridega tihedus (samm 0,1 kg m⁻³). Mõõdistuslõige kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).



Joonis 3.1.20. Hapniku jaotus 2020. aasta suvisel missioonil. Lõige on mõõdistatud 08.08–09.08. Värviskaalal ja mustade kontuuridega (samm 1 mg l^{-1}) on esitatud hapnik ning punaste kontuuridega tihedus (samm $0,1 \text{ kg m}^{-3}$). Mõõdistuslõige kulges piki laiuskraadi ning joonisel jääb Saaremaa rannik paremale ning avameri vasakule poole (ptk 2.2 joonis 2.2.1).

3.1.4. Fikseeritud jaamad

Lisaks liikuvatele platvormidele kasutati projekti piirkonnas fikseeritud hoovusmõõtjaid ja põhjalähedast merekeskkonna parameetreid mõõtvat sondi. Järgnevalt analüüsime hoovusmõõtmise tulemusi kahes asukohas: Valeport ja ADCP, kus meresügavused vastavalt 41 ja 71 m (joonis 3.1.21). Seejuures asus Valeport varem kirjeldatud liuguri sektsiooni idapoolseimas punktis ning ADCP selle sektsiooni keskel. Neist esimeses oli 5 m sügavusel punkthoovusmõõtja ja teises akustiline hoovuste profileerija. Viimane annab hoovusandmeid läbi veesamba, eri kihtidest. Mõõteulatusest välja jääb vaid pindmine veekiht, ca ülemised 10 m ja põhjalähedane kiht, ca 4 m. ADCP asukohta oli ankurdatud 67 m sügavusele ka temperatuuri, soolsust, hapnikku ja hägusust registreeriv sond. Mõõtmistega alustati veebruari lõpus 2020. Akustiline hoovusmõõtja ja sond mõõtsid kuni augusti lõpuni, punkthoovusmõõtja kuni mai keskpaigani. Lisaks kasutame analüüsis 2015. a aprilli lõpust kuni 2016. a jaanuari keskpaigani tehtud lainetuse mõõtmisi. Lainepoi asus liuguri sektsioonist ning hoovusmõõtjatest veidi põhjapool. Tuule iseloomustamiseks fikseeritud jaamade mõõtmisperioodil kasutame ERA-5 andmestikku (ERA5 / ECMWF, n.d.). Joonisel 3.1.22. on toodud 36-h filtriga silutud tuule vektorite aegread. Periood algas tugevate edela- ja läänetuulte domineerimisega, mis kestis kogu märtsi ning kuni aprilli keskpaigani. Vaid üksikutel päevadel esinesid sel perioodil ka põhjakaarte tuuled. Aprilli teises pooles prevaleerisid peamiselt põhjakaarte tuuled alla 10 m s^{-1} . Mais ja juunis jäid tuule kiirused enamasti alla 10 m s^{-1} , suund oli varieeruv, kuid juunis esines rohkem põhjakaarte tuuli. Juuni lõpus – juuli alguses esines nädalane tugev edelatuulesündmus. 10. juulist kuni augusti lõpuni oli vaiksamate ja mõõdukate tuulte periood.

Hoovuse kineetilisest energiast moodustavad arvestatav osa erinevad võnkumised (seišid, inertsivõnkumised), millede periood jääb 26-27 h lühemaks (Suhhova et al., 2018). Kuue kuu keskmine

hoovuse kiirus 10 m sügavusel oli $11,3 \text{ cm s}^{-1}$, see väheneb sügavusega, olles $10,2 \text{ cm s}^{-1}$ 20 m sügavusel, $9,0 \text{ cm s}^{-1}$ 40 m sügavusel ja $8,3 \text{ cm s}^{-1}$ 60 m sügavusel. Kõige sügavamas mõõdetud kihis (67 m) oli keskmine kiirus $7,0 \text{ cm s}^{-1}$. Maksimaalse kiiruse vertikaalses jaotuses on samasugune tendents, suurim maksimaalne kiirus 48 cm s^{-1} esines 10 m sügavusel ja väikseim 33 cm s^{-1} 67 m sügavusel. Suuremad kiirused registreeriti Valeport asukohas 5 m sügavusel. Ühest küljest oli see tingitud madalamast mõõtmis sügavusest (5 m), teisalt võis panustada ka asukoht, piki rannikut võivad aset leida tugevamad hoovused. Edaspidi on analüüsis kasutatud 36-h madalasagedusliku filtriga silutud hoovusandmeid.

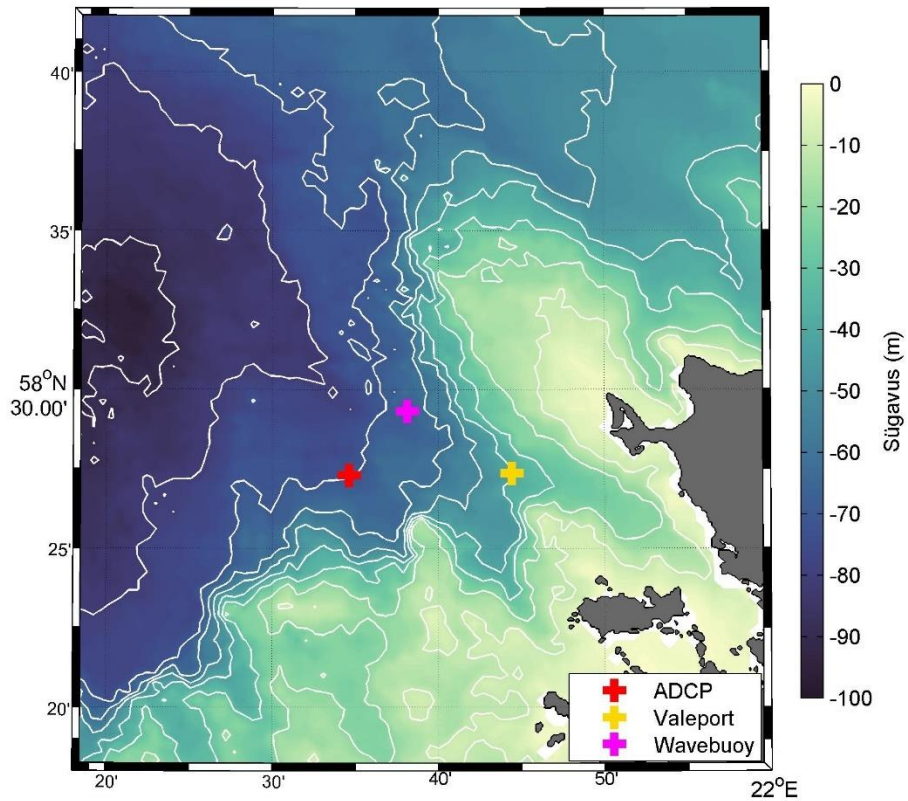
Tuule sündmused kajastuvad küllalt selgelt ka hoovuste aegridades. Lisaks tuulele mõjutab hoovuseid veetaseme gradient ja tiheduse jaotusest tulenev voolamine. Laias laastus võib hoovuste aegrea jagada kaheks. Kuni aprilli keskpaigani domineeris hoovuse barotroopne voolamine, see on hästi näha ADCP asukohas registreeritud kõige ülemise ja alumise kihi aegreas (joonis 3.1.23). Sel perioodil on voolamine mõlemas kihis enamasti ühesuunaline. Erandiks on märtsi lõpp, kui põhjakaarte tuuled tekitasid ülemises kihis lõunasuunalise triivhoovuse. Ülemise ja alumise kihi voolamine ei lange kokku ülejäänud perioodil. Varasemad uuringud Soome lahes (Suhhova et al., 2018) näitavad, et voolamise kihilisus on tugevalt seotud stratifikatsiooni olemasoluga.

Edela- ja lõunakaarte tuuled tekitasid ülemise kihi hoovuse piki rannikut kirde suunas, põhjakaarte tuuled tekitasid vastassuunalise hoovuse. Alumistes kihtides ei olnud tuule ja hoovuse seos nii selge. Stratifikatsioonita perioodil oli voolamine nagu ülemises kihis, stratifikatsiooniga perioodil tekitasid põhjakaarte tuuled pigem ranniku suunas voolamist. Selliseid episoode võis näiteks märgata märtsi lõpus, aprilli lõpus, mai lõpus – juuni alguses, augusti keskpaigas. See viitab, et põhjakaarte tuuled, mis tekitavad Saaremaa rannikul apvellingu, ülemise kihi hoovuse rannikust eemale ja/või piki rannikut lõunasse voolamise, toovad kaasa ka süvakihi vee voolamise ranniku suunas. Sarnane mehhanism on hästi dokumenteeritud pikliku kujuga Soome lahes, kus idakaarte tuuled toovad süvakihtidesse soolasemat ja hapnikuvaest vett Läänemere avaosast, aga läänekaarte tuuled põhjustavad ülemise kihi vee akumulatsioonide lahes ja hapnikuvaese vee väljasurumise lahest (Taavi Liblik et al., 2013; Lips et al., 2017). Läänemere avaosas ei ole selle protsessi mõju ulatus põhjalähedastele vee karakteristikutele väheste püsimumõtmiste tõttu selge. Allveeliuguri mõõtmistes, aga ka ADCP asukohas 67 m sügavusel tehtud püsimumõtmiste aegridades on kirjeldatud protsessi mõjud selgelt näha. Varem mainitud perioodidel (märtsi lõpus, aprilli lõpus, mai lõpus – juuni alguses, augusti keskpaigas) on näha sooluse ja temperatuuri tõusu ning hapniku järsku langemist (joonis 3.1.24). Osadel juhtudel on näha ka hägususe tõusu. See tähendab, et põhjakaarte tuultega tungib hüpoksiline ja soolasem vesi Saaremaa rannikunõlva mööda ülesse. Liuguri mõõtmiste järgi ulatus hüpoksiline vesi augusti keskpaigas 65 m sügavusele.

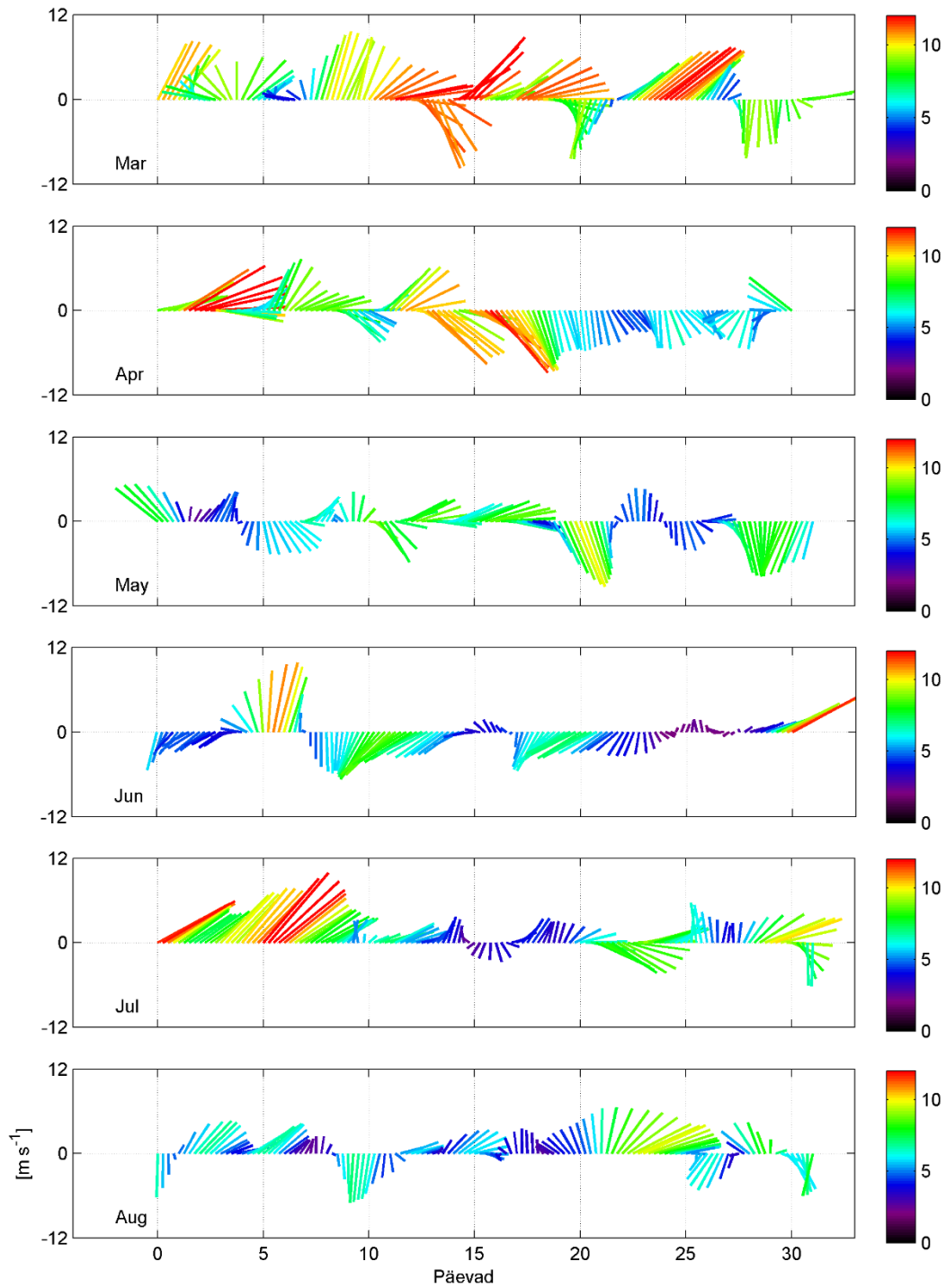
Hoovusmõõtmiste ja simulatsioonide võrdluses näitame mudelitulemustest Copernicuse mereteenuse operatiivse mudeliprodukti tulemusi ja TalTech merefüüsika osakonna poolt tsirkulatsioonimudeliga GETM (Burchard & Bolding, 2002) saadud tulemusi (joonis 3.1.25). Copernicuse mudeli lähimas võrgupesas ulatub sügavus ainult 55 m, reaalses looduses oli sügavus 71 m. Seetõttu ei ole antud punktis enamasti näha halokliinialust vett ja sellega kaasnevat hoovuste vertikaalset struktuuri. Copernicuse produkti hoovuste u-komponent oli enamasti negatiivne, st. esines tunduvalt rohkem läänesuunalist voolamist võrreldes reaalse loodusega. Samasugune kõrvalekalle on v-komponendis, st. mudeliandmed näitavad rohkem lõunasuunalist voolamist kui reaalset mõõdetud. Progressiivvektordiagrammilt (Joonis 3.1.26) ilmneb, et kui mõõdetud rea keskmine hoovusvektor oli suunatud idasse-kirdesse 10 m ja 49 m sügavusel ja kirdesse 67 m sügavusel, siis mudeli tulemuste järgi oli hoovus 10 m sügavusel keskeltläbi edelasse, ehk vastassuunas võrreldes mõõtmistega. 47 m peal olid mudeli hoovused tunduvalt nõrgemad

võrreldes loodusega, modelleeritud hoovuste progressiivvektori lõpp-punkt sel sügavusel asus 4-5 korda lähemal nullile võrreldes mõõdetuga. GETM hoovuste struktuur on reaalselt mõõdetule sarnasem, seda nii vertikaalset struktuuri kui ka arenguid ajas vaadates. Sarnaselt Copernicuse produktiga on GETM andmetes rohkem lõunasuunalist voolamist kui looduses. Seejuures on näha, et põhjasuunaliste hoovussündmuste puhul on voolamine mudelis aeglasem kui looduses, aga lõunasuunaliste puhul kiirem kui reaalses looduses. Selget seletust nendele kõrvalekalletele ei ole. Ühe põhjusena võib spekuloida, et hoovuste tsonaalses lateraalses struktuuris esineb Läänemere avaosa idarannikul lõunasuunaline voolamise piirkond nagu on Ida-Gotlandi basseini mudeliandmete põhjal pakutud (Placke et al., 2018). Siit võib edasi spekuloida, et mudelis on võrreldes reaalse loodusega nimetatud voolamise struktuur nihkes. On ka võimalus, et sellist struktuuri looduses ei eksisteerigi. Kokkuvõttes võib öelda, et simuleeritud hoovuste usaldusväärseks muutmisel nii projektialal, kui ka Läänemeres üldiselt on veel palju tööd teha.

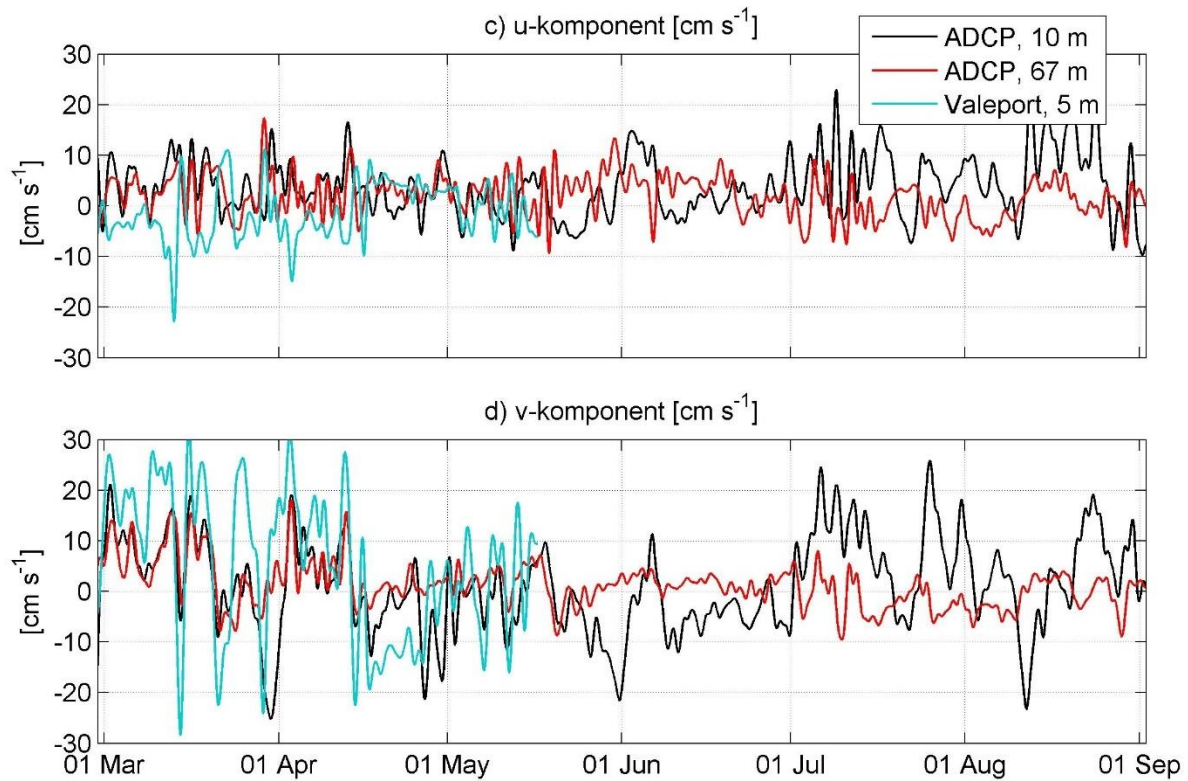
Lainemõõtmised piirkonnas on kõrvutatud Copernicuse *hindcast* produktiga. Lainemõõtmised näitavad, et kevadel-suvel 2015 ulatusid laine olulised kõrgused piirkonnas 3-3,5 m (joonis 3.1.27). Novembris ulatusid ühes tormis laine kõrgused 4 m ning detsembris kahe tormi jooksul vastavalt ligi 7 ja 5 meetrini. Nii tunni kaupa kui ka 24-h silutud olulise laine kõrguse mudeli aegread lähevad mõõtmistega väga hästi kokku. Võib märgata väikest tendentsi, et mudel näitab veidi kõrgemat lainetust võrreldes mõõtmisega kevadel-suvel ja väiksemat sügisel-talvel. Mudel alahindab veidi ekstreemsemaid laine kõrguseid. Näiteks aegrea maksimaalse laine kõrgust alahindas mudel ca 0.5 m. Siin on osaline põhjus ilmselt ka mudeli ja mõõtmiste ajalise lahutuse erinevuses. Mõõtmiste puhul registreerisime poole tunni keskmised laine karakteristikud, mudelis on sammuks 1 h. Kokkuvõttes võib öelda, et Copernicuse produkt töötab vähemalt avamere tingimustes väga hästi ning elupaikade kirjeldamiseks nii projektialal, kui Eesti merealadel lainetuse info hankimiseks sobib. Sarnast väga head kokkulangevust on näidatud ka teistes Läänemere osades (Bjorkqvist et al., 2020). Seega ilmselt ei ole mõistlik lainetuse simuleerimise arendamiseks edasisi suuremaid investeeringuid teha. Erandiks on kõrgemat ruumilist lahutust vajavad ülesanded (väiksemad lahed, vesiehitised), kus on vaja modelleerida peenemal võrgul ja mudelitulemusi ka mõõtmistega valideerida.



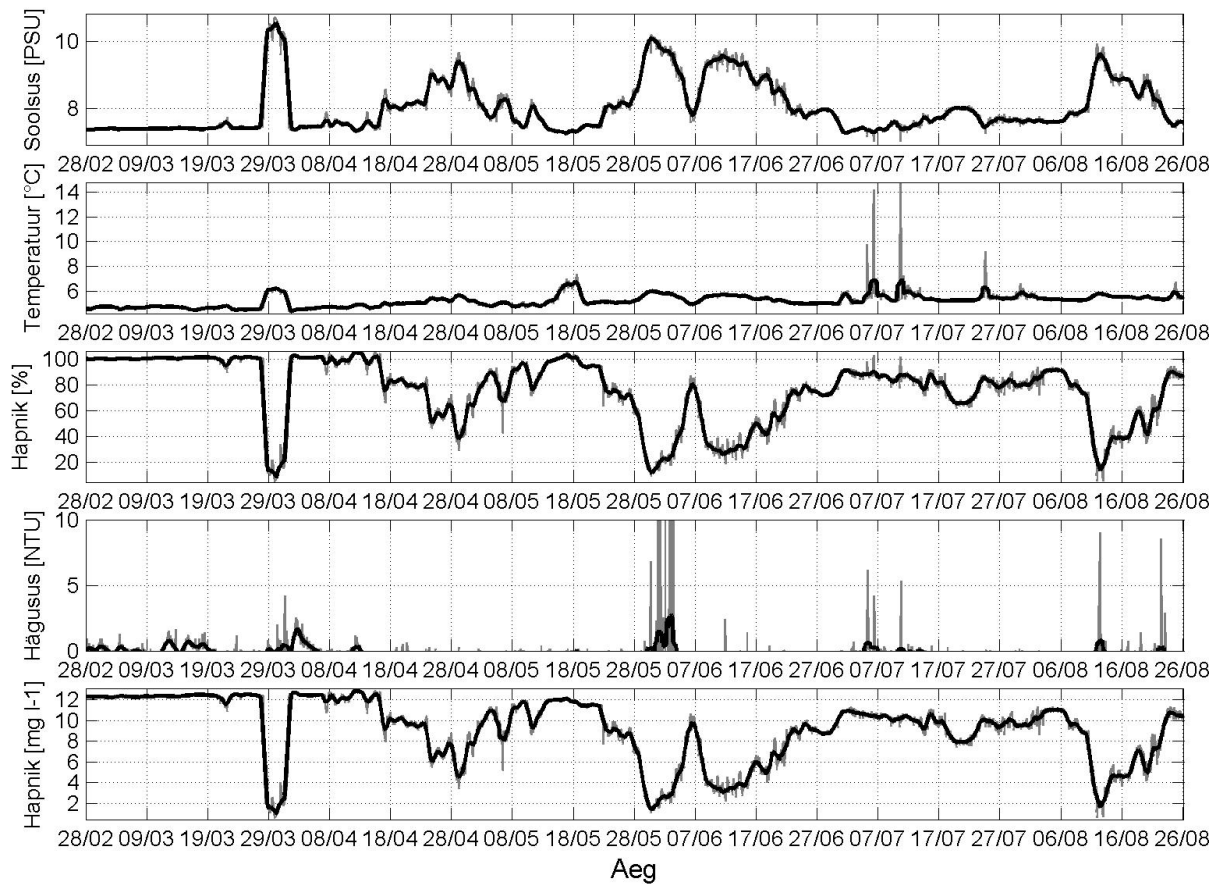
Joonis 3.1.21. Poijaamade asukohad. ADCP- akustilised hoovus- ja põhjalähedased keskkonnaparameetrite mõõtmised, Valeport- punkthoovusmõõtmised, Wavebuoy- lainetuse mõõtmised.



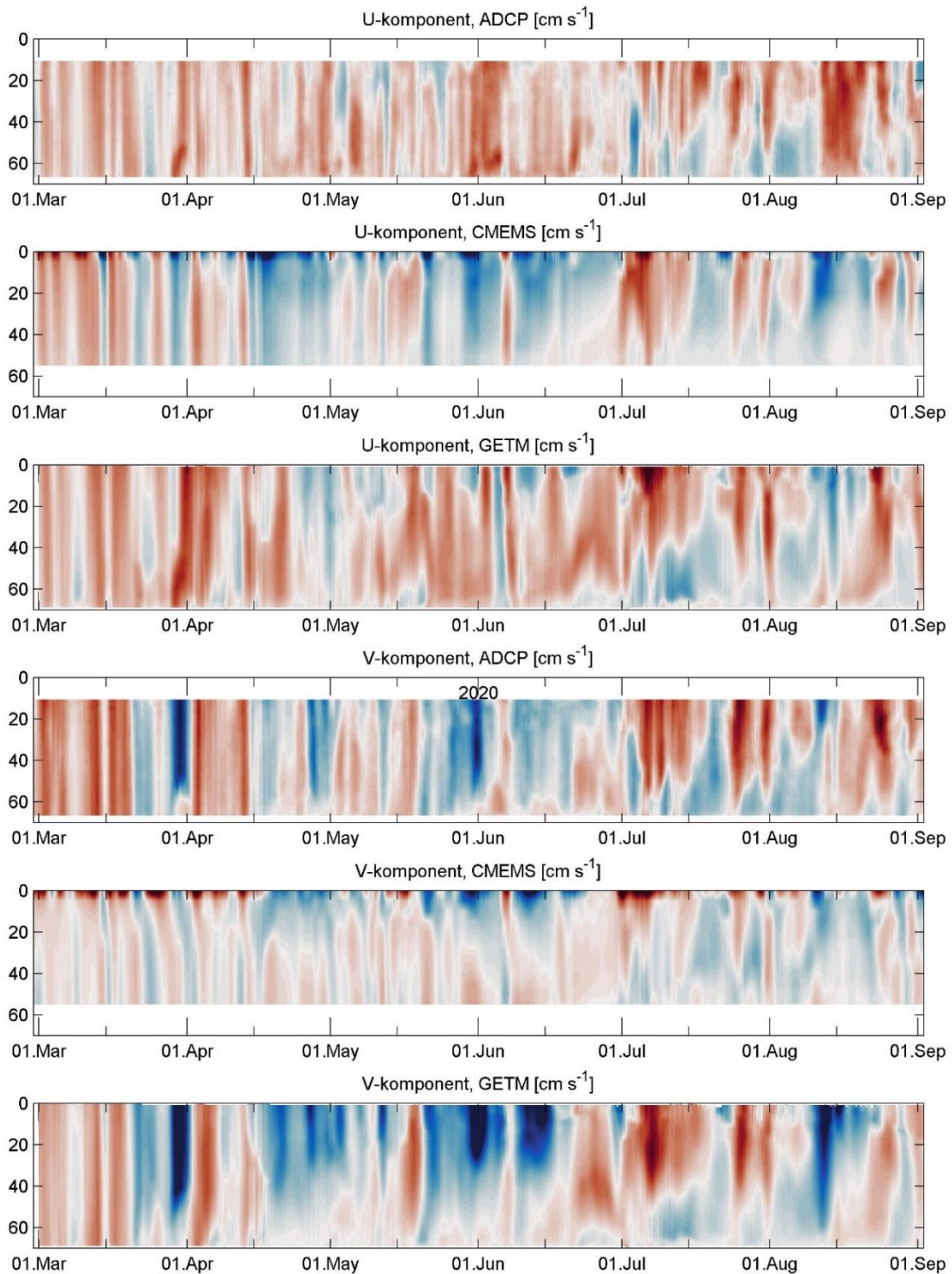
Joonis 3.1.22. Tuule vektorid ERA 5 andmetel. Tuule andmed on silutud 36 h madalsagedusliku filtriga. Värviskaala näitab tuule kiirust.



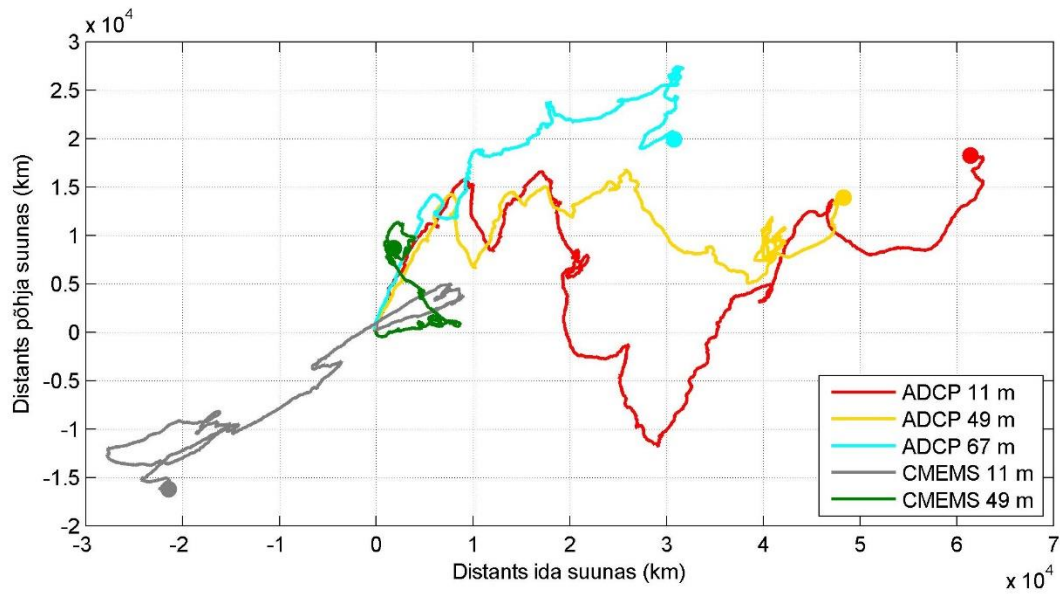
Joonis 3.1.23. Hoovuse u-komponendi (c, ida-läänesuunaline) ja d-komponendi aegrida ADCP (10 m) ja Valeport (5 m) asukohas ning alumise kihi hoovus (67 m) ADCP asukohas. Hoovused on silutud 36-h filtriga.



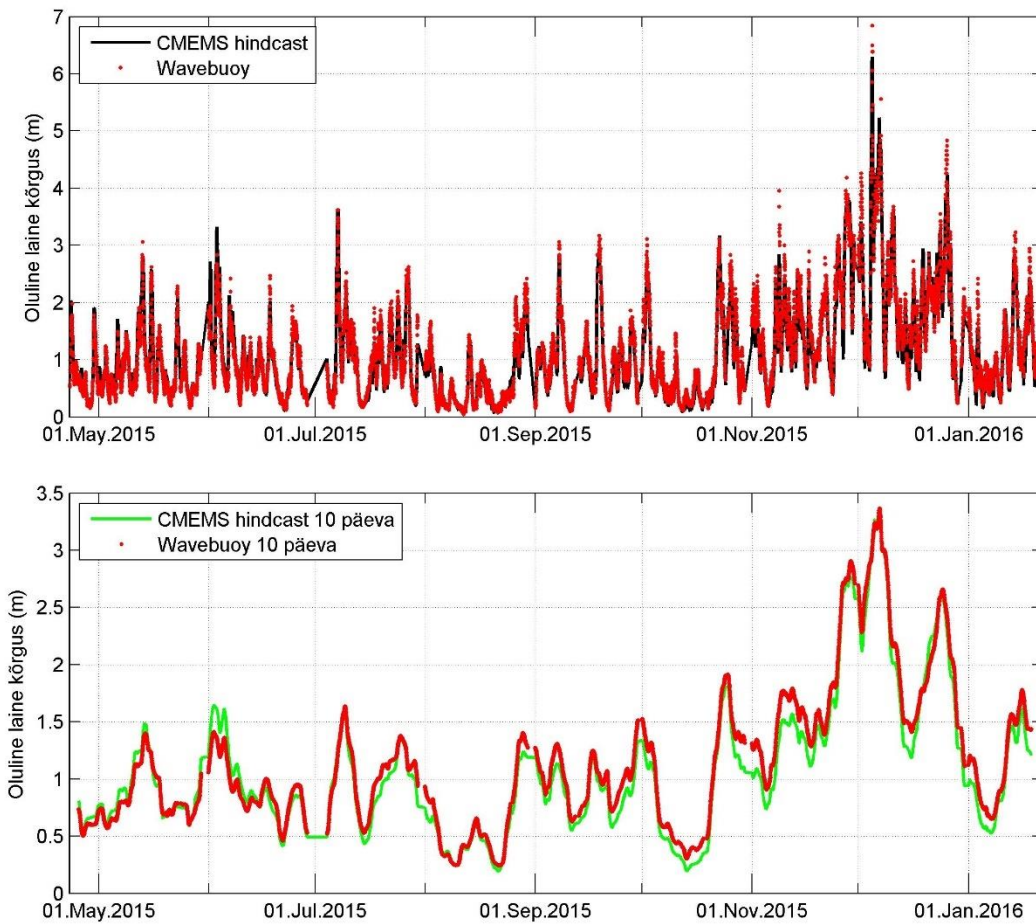
Joonis 3.1.24. Soolisus, temperatuur, hapnik ja hägusus ADCP asukohas (vt. joonis 2.1.21.) 67 m sügavusel.



Joonis 3.1.25. Hoovuse u- ja v-komponendid mõõdetud ja modelleeritud ADCP asukohas. Andmeid on silutud 36-h madalsagedusliku filtriga. U-komponent näitab ida-läänesuunalist ja v-komponent põhja-lõunasuunalist voolamise komponenti.



Joonis 3.1.26. Mõõdetud (ADCP) ja modelleeritud (CMEMS- Copernicuse mereteenus) hoovuste progressiivvektorid ADCP asukohas.



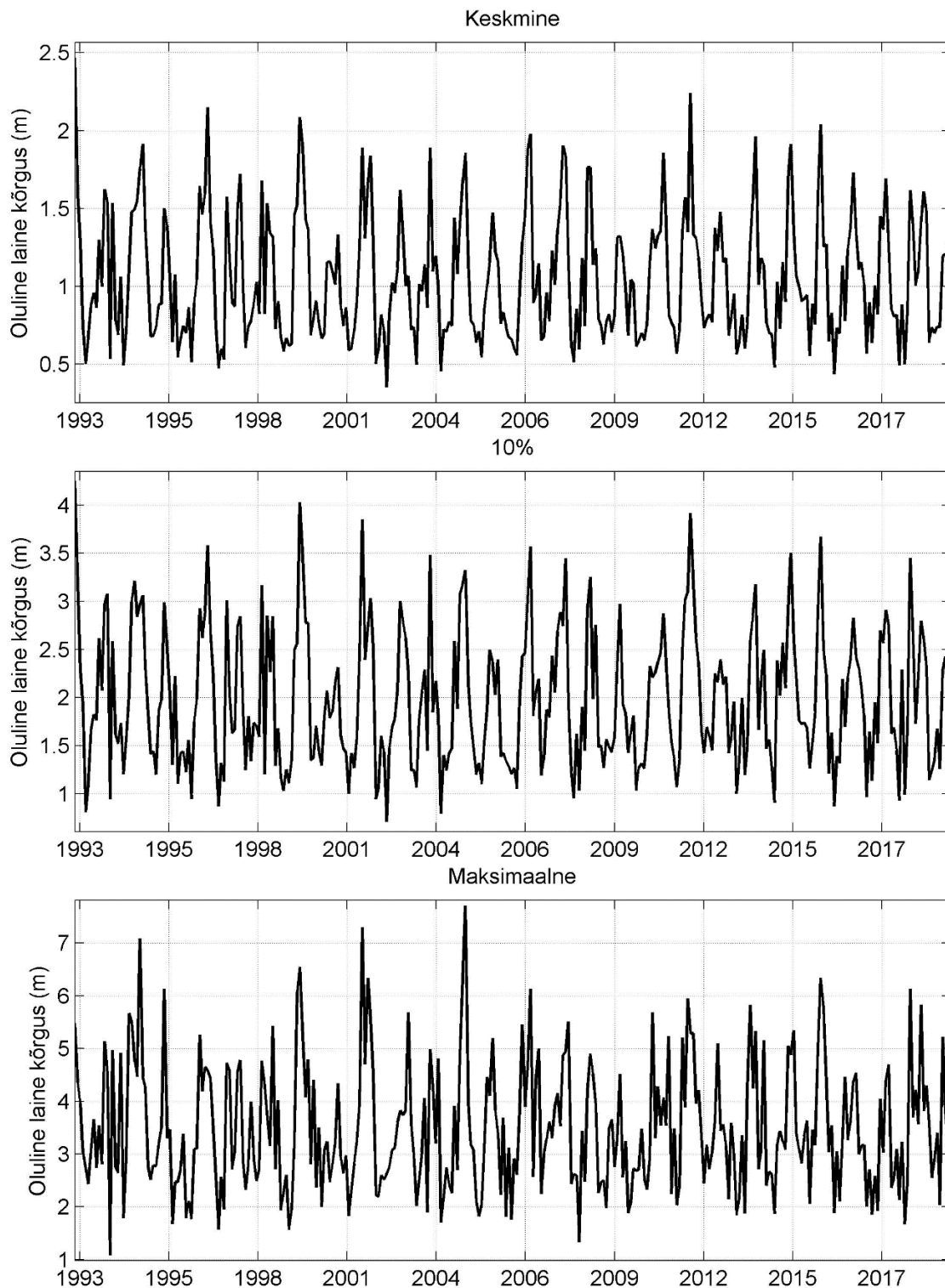
Joonis 3.1.27. Mõõdetud ja modelleeritud laine oluline kõrgus Wavebuoy asukohas. Alumisel paneelil on toodud 10-h madalsagedusliku filtriga silitud laine kõrguse aegread.

3.2. Pikaajaline, sh. aastatevaheline muutlikkus

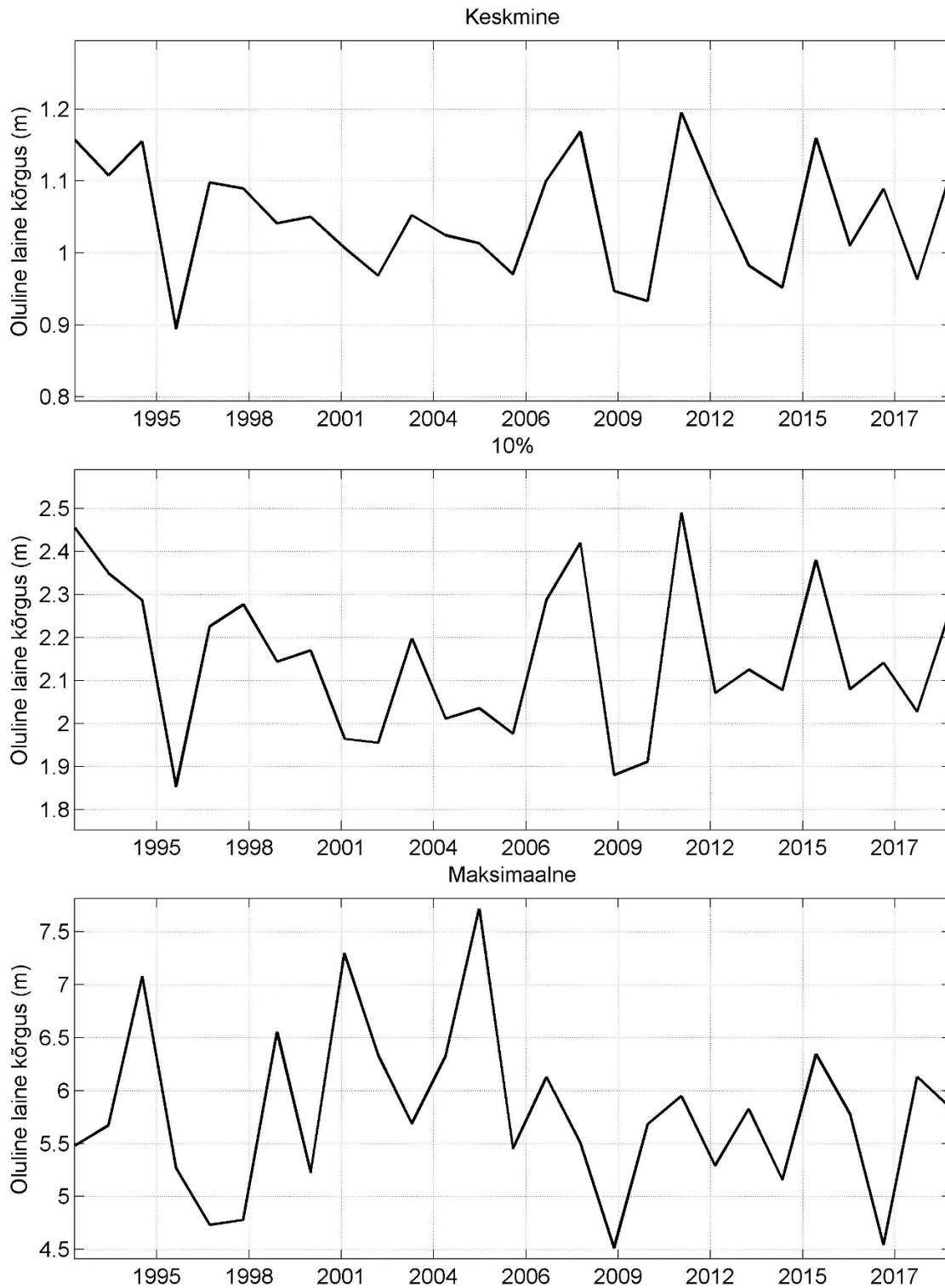
Lainetus

Olulise laine kõrguse kuu keskmised perioodil 1993-2019 jäävad vahemikku 0.4 – 2.2 m (joonis 3.2.1). Kuu keskmine laine kõrgus ületab kord aastas tavaliselt 1.5 m, kuigi leidub ka erandlikke aastaid, kui seda ei juhtu. Tugevamate lainesündmuste iseloomustamisel kasutame 90-protsentiili, mis näitab laine olulise kõrguse väärtust, millest vaadeldaval kuul esines 10% ajast kõrgemaid väärtuseid. Üksikutel kuudel ületab protsentiil 3.5 m või jääb alla 1 m, enamasti jääb nendesse piiridesse. Kolmel kuul on protsentiil 4 m ligidal. Kuu maksimaalse olulise laine kõrguse read näitavad, et enamasti ületab tunni keskmine oluline laine kõrgus kuus 2 m. Üle 6 m olulist laine kõrgust, nagu registreerisime mõõtmistega 2015. a, ei tule ette igal aastal. Maksimaalne laine kõrgus esines 2005. a alguses, võttes arvesse, et mudel veidi alahindab ekstreemseid laine kõrguseid võib arvata, et tunni keskmine laine kõrgus selles tormis ulatus või isegi veidi ületas 8 m, mis on kooskõlas varasemate maksimaalse olulise laine kõrguse hinnangutega piirkonnas (Alari & Raudsepp, 2010; Tuomi et al., 2010). Arvestades maksimaalse üksiklaine kõrguse ja olulise laine kõrguse suhet (Sulisz et al., 2016) ületavad ekstreemsemate üksiklainete kõrgused tugevates tormides piirkonnas 10 m ja võivad ulatuda ligi 15 m. Kokkuvõttes võib öelda, et projektiala on Läänemere mõistes väga aktiivse lainetusega piirkond.

Olulise laine kõrguse aastate vaheline muutlikkus on tagasihoidlik (joonis 3.2.2). Väikseimad aasta keskmised (1996, 2009, 2010) olulise laine kõrgused jäävad vahemikku 0,9-1,0 m; keskmisest kõrgem lainetus (1,1-1,2 m) esines 1993-1995, 2008, 2011, 2015 ja 2019 aastal. Sarnane muster esineb kui vaadata 90-protsentiili. Madalama lainetusega aastatel oli see alla 2 m, kõrgema lainetusega aastatel üle 2,4 m. Olulise laine kõrguse aastased maksimumid kõiguvad küllalt suurtes piirides. On aastaid kui oluline laine kõrgus ei ületanud 5 m (1997, 1998, 2009, 2017), samas kolmel aastal (1995, 2001, 2005) ületas see 7 m.



Joonis 3.2.1. Olulise laine kõrguse kuude keskmised, maksimaalsed ja 10% väärtuste 1993-2019. 10%-väärtused näitavad, milledest suuremat olulist lainet kõrgust esines 10% ajast.

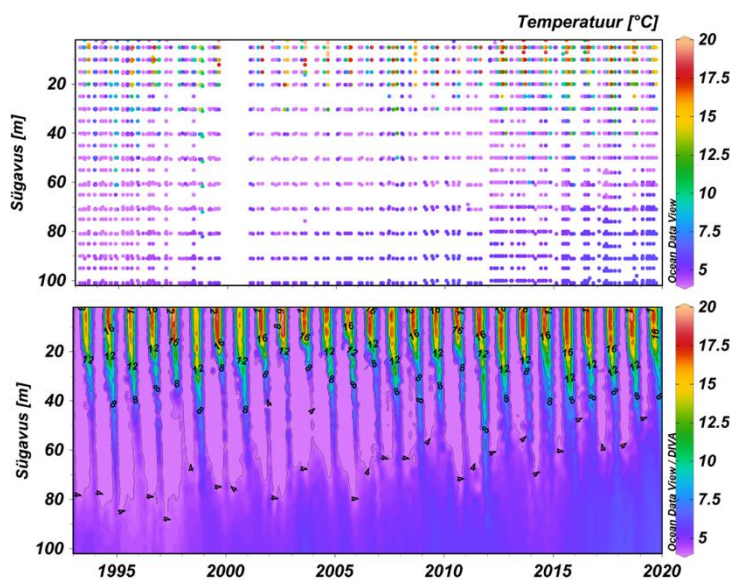


Joonis 3.2.2. Olulise laine kõrguse aasta keskmised, maksimaalsed ja 10% väärtuste 1993-2019. 10%-väärtused näitavad, milledest suuremat olulist laine kõrgust esines 10% ajast.

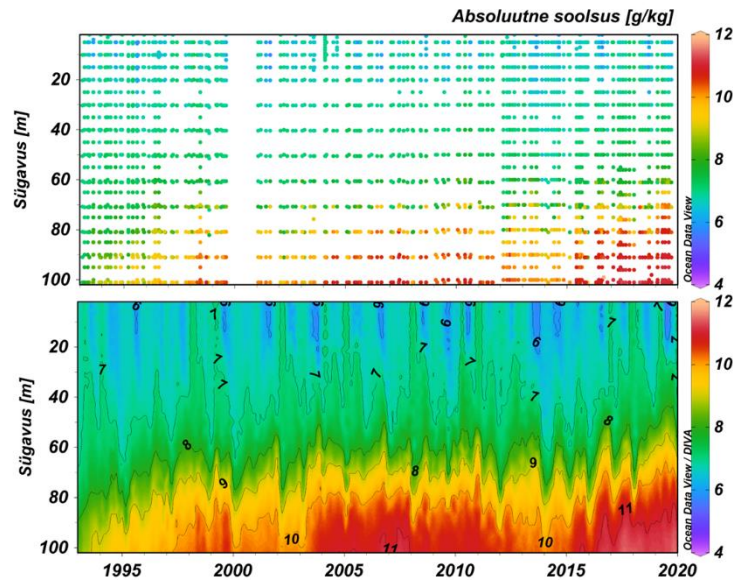
Veesamba parameetrid

Järgmisena võrreldi in situ kontaktmõõtmiste käigus saadud andmeid reanalüüsi mudeli andmetega jaamades H2, 85 ja 32 (joonised 3.2.3 - 3.2.15). Koheselt ilmneb ka suurim probleem in situ mõõtmistega, milleks on nende teostamine väikese sagedusega. Seetõttu ei ole võimalik ka neid andmeid kujutada sarnasel interpoleerimise meetodil võrreldes mudeli päevaste andmetega, kuna in situ andmetes esineb mitme aasta pikkuseid perioode, kus mõõtmised täielikult puuduvad või kus esineb ühe aasta jooksul ainult üks mõõtmine. Taolised augud andmeridades põhjustavad interpoleerimisel ebaloomulike väärtuseid ja seetõttu kujutati siin in situ andmed reaalsete mõõtmispunktide väärtustena. Reanalüüsi mudelisse on assimileeritud in situ mõõtmiste tulemused, st. need peaksid suhteliselt hästi olema kooskõlas situ andmetega.

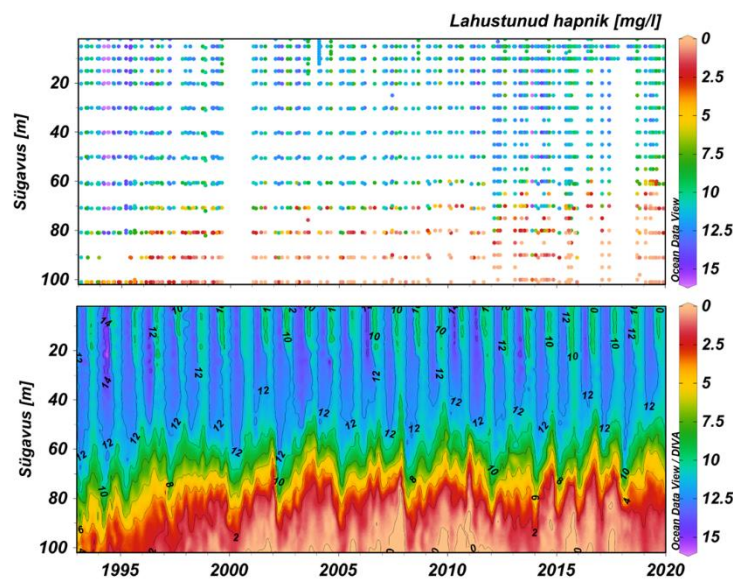
Jaamades nagu H2, kus on teostatud palju ja pidevalt in situ mõõtmisi, tuleb selgelt välja ka parameetrite sesoonsus, mis ühtib ka mudeli tulemustega. See on eelkõige näha temperatuuri, lahustunud hapniku ja $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ aegridades. Reanalüüsi tulemused järgivad mõõtmiste pikaajalisi tendentse põhjalähedastes kihtides. Jaamas H2 on heaks näiteks põhjalähedased suuremad sooluse ja PO_4 kontsentratsioonid ja $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ maksimum aastate 1995 ja 2000 vahel, kuigi mudel tundub sealset kontsentratsiooni alahindama.



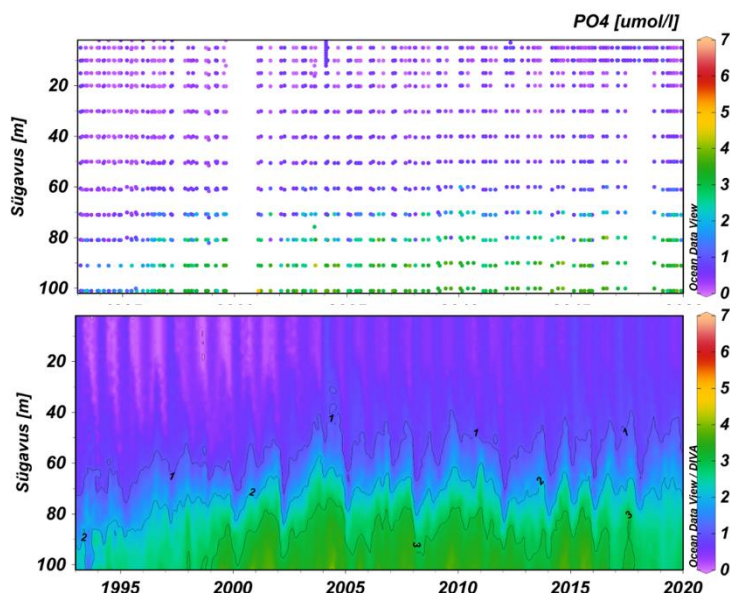
Joonis 3.2.3. Temperatuuri andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas H2. Kuigi jaam H2 on sügavam kui graafikutele kujutatud, olid CMEMS mudel andmed saadaval kuni sügavuseni 102 m, ning seetõttu tehti ka võrdlus kuni sarnase sügavuseni.



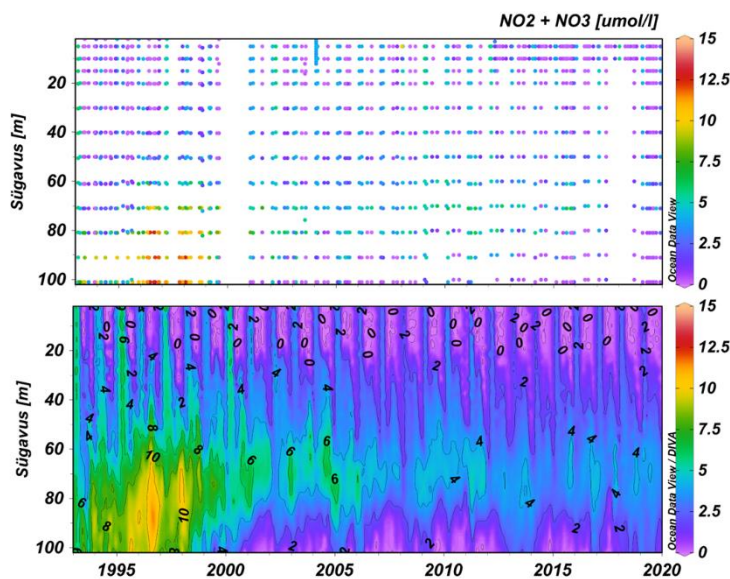
Joonis 3.2.4. Soolsuse andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas H2. Kuigi jaam H2 on sügavam kui graafikutele kujutatud, olid CMEMS mudel andmed saadaval kuni sügavuseni 102 m, ning seetõttu tehti ka võrdlus kuni sarnase sügavuseni.



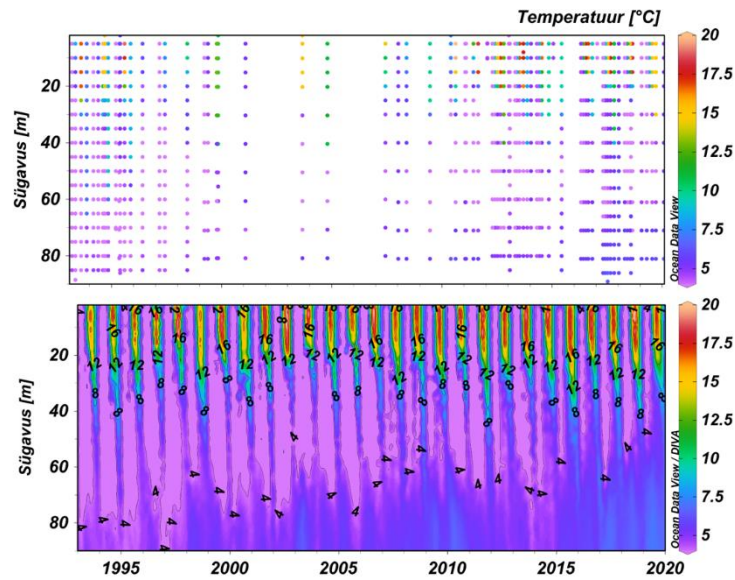
Joonis 3.2.5. Lahustunud hapniku andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas H2. Kuigi jaam H2 on sügavam kui graafikutele kujutatud, olid CMEMS mudel andmed saadaval kuni sügavuseni 102 m, ning seetõttu tehti ka võrdlus kuni sarnase sügavuseni. Negatiivne hapnik näitab väävelvesiniku esinemist.



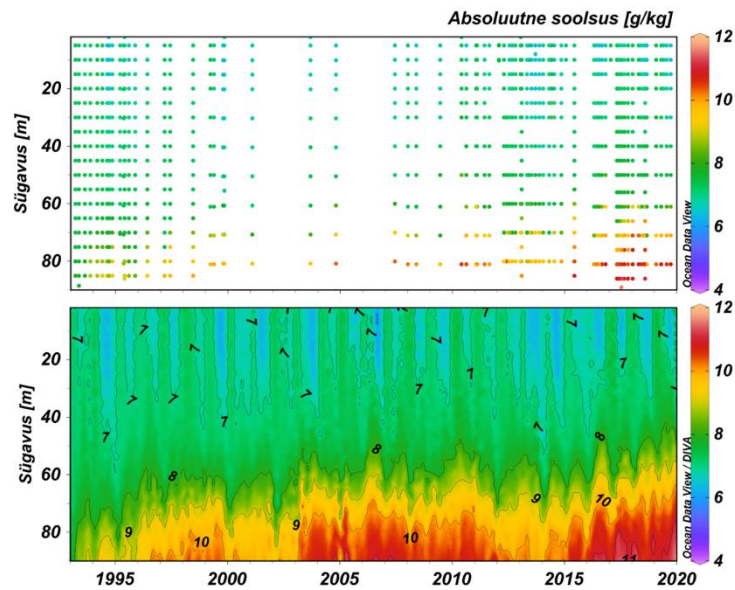
Joonis 3.2.6. Fosfaatide andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas H2. Kuigi jaam H2 on sügavam kui graafikudel kujutatud, olid CMEMS mudel andmed saadaval kuni sügavuseni 102 m, ning seetõttu tehti ka võrdlus kuni sarnase sügavuseni.



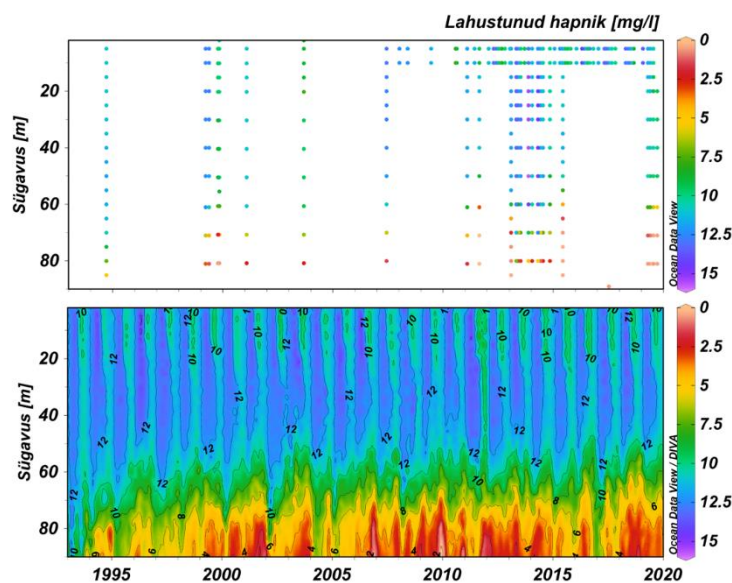
Joonis 3.2.7. Nitrit- ja nitraat summa andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas H2. Kuigi jaam H2 on sügavam kui graafikudel kujutatud, olid CMEMS mudel andmed saadaval kuni sügavuseni 102 m, ning seetõttu tehti ka võrdlus kuni sarnase sügavuseni.



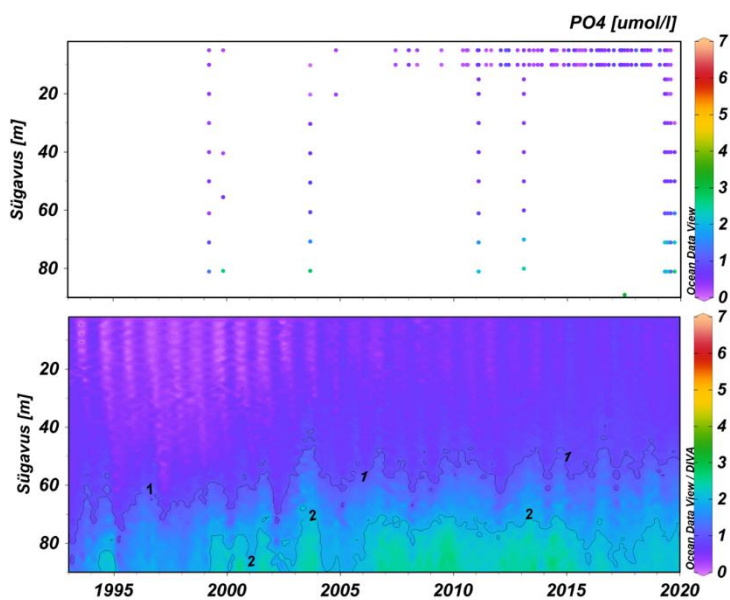
Joonis 3.2.7. Temperatuuri andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 32.



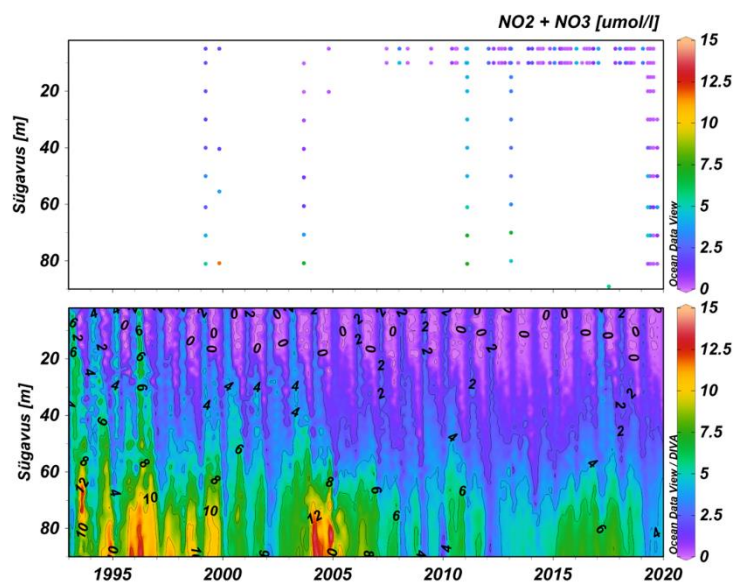
Joonis 3.2.8. Soolsuse andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 32.



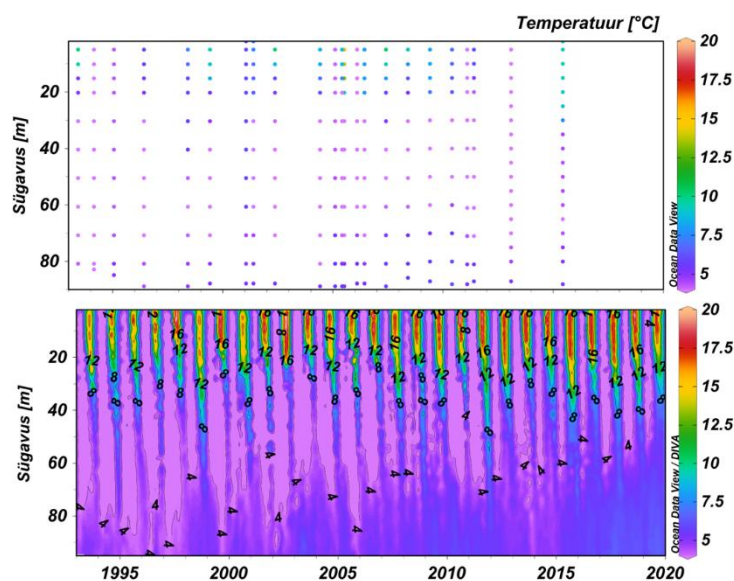
Joonis 3.2.9. Lahustunud hapniku andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 32.



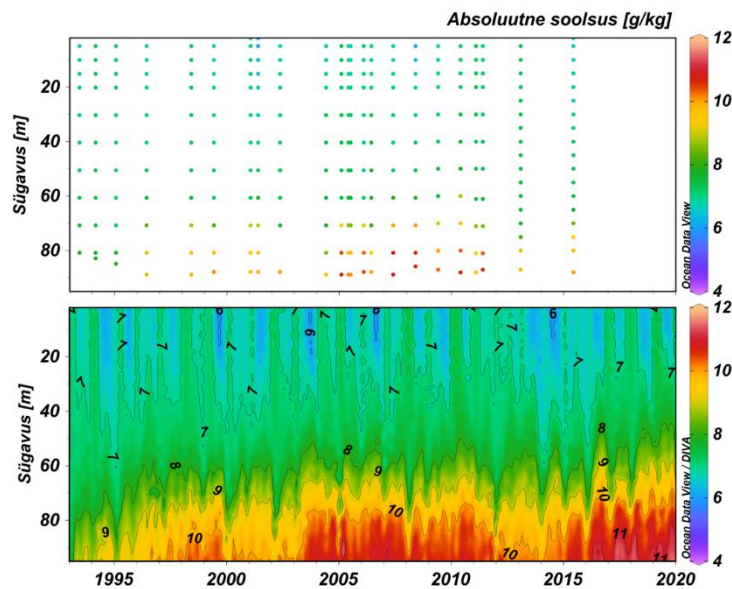
Joonis 3.2.10. Fosfaatide andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 32.



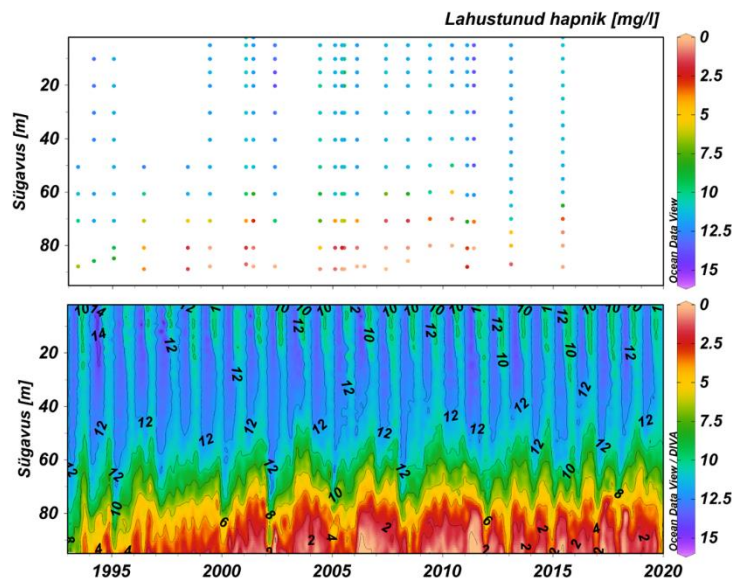
Joonis 3.2.10. Nitritide ja nitraatide summa andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 32.



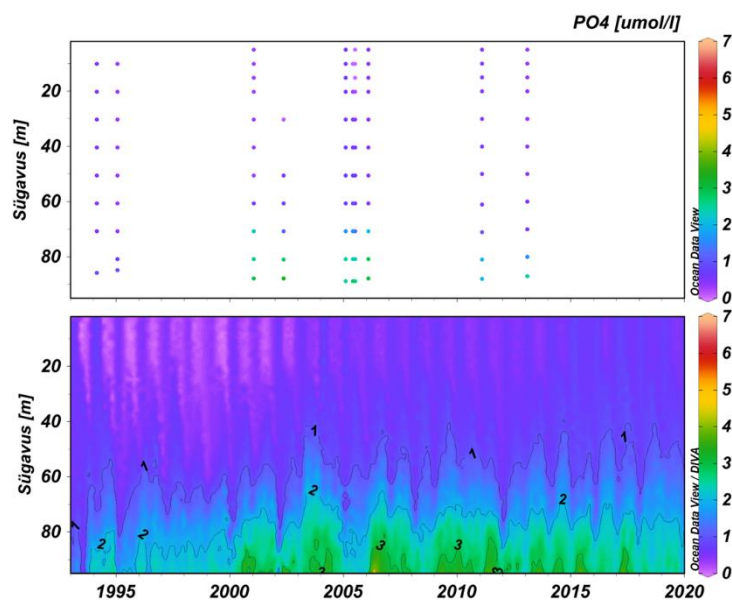
Joonis 3.2.11. Temperatuuri andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 85.



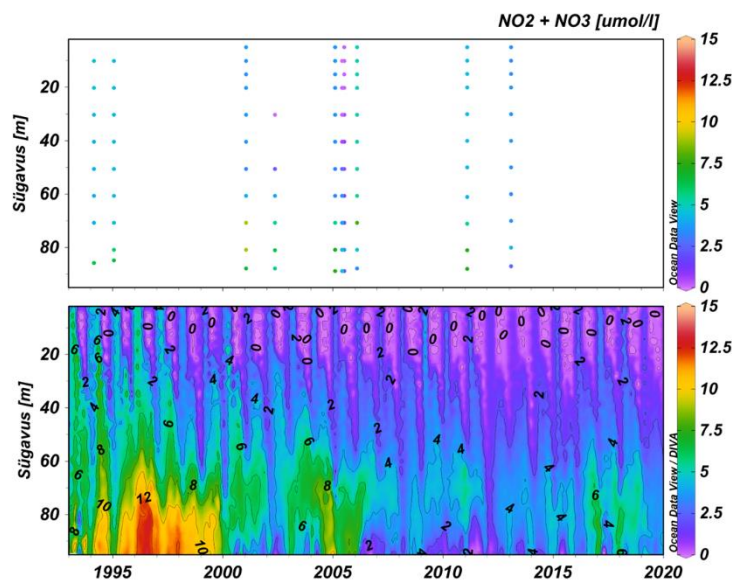
Joonis 3.2.12. Soolsuse andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 85.



Joonis 3.2.13. Lahustunud hapniku andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 85.



Joonis 3.2.14. Fosfaatide andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 85.



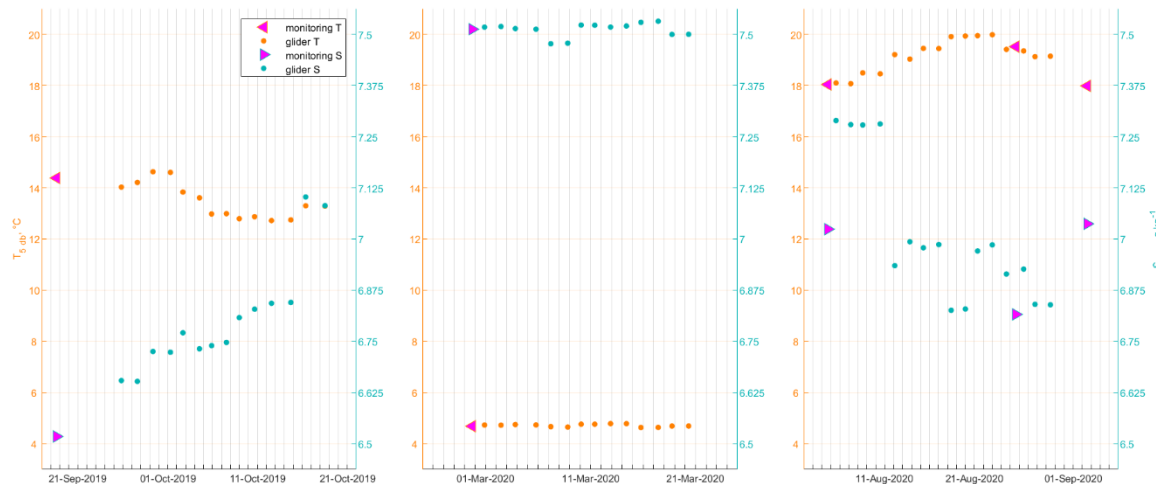
Joonis 3.2.15. Nitritide ja nitraatide summa andmete võrdlus ICES andmebaasi in-situ mõõtmiste (ülemine) ja CMEMS reanalüüsi mudeli andmete (alumine) vahel jaamas 85.

3.3. Sünoptilist mastaapi muutlikkus

Käesolevas peatükis on hinnatud, mida annavad juurde autonoomsed vaatlused võrreldes tavapärase seirega. Liuguri ja fikseeritud punktmõõtja andmete põhjal koostati aegread nii, et need täiendavad seiret uuritaval merealal, näidates ajaliselt tihedama seirevõrgu eeliseid.

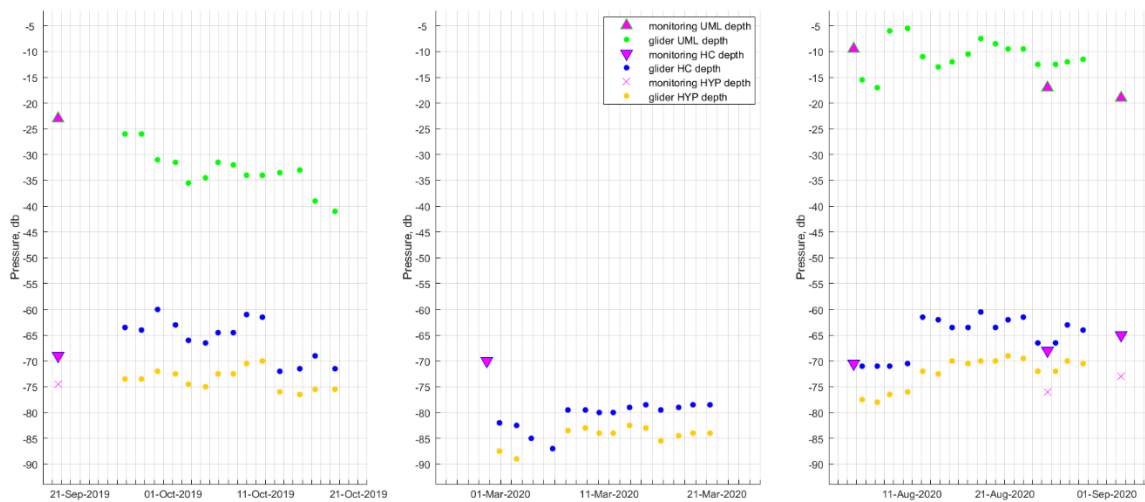
Järgnevalt on seirejaam 85 andmed kõrvutatud liuguri mõõtmistega. Liuguri mõõdistuslõigetel on valitud üks avamereseirepunkt (58,47° N, 21,238° E), mis on lähim jaamale 85 (58,45° N, 20,91° E). Punktide vahemaa on 19 km. Seirepunkti iseloomulik sügavus on 85 m, ent liuguri mõõtepunktis 95 m. Hindasime pinnalähedase (5 dbar) temperatuuri ja soolsuse, segunenud kihi paksuse, halokliini sügavuse ning hüpoksia piiri ehk sügavust, kus hapniku sisaldus vees on $\leq 2,9 \text{ mg l}^{-1}$, ajalist muutlikkust. Saadud aegread ilmestavad tulemusi, mis saadaks, kui jaamas 85 teostataks mõõtmisi kuu aega järjest igapäevaselt.

Joonisel 3.3.1 on esitatud pinnalähedane temperatuur ja soolsus. Sügis 2019 avamereseire käigus registreeritud temperatuur oli 14,4 °C ja soolsus 6,5 g kg⁻¹. Oktoobri jooksul langes temperatuur 1,3 °C ning soolsus kasvas 0,4 g kg⁻¹. Kevadel 2020 mõõdeti seirereisi käigus temperatuuriks 4,7 °C ja soolsuseks 7,5 g kg⁻¹. Märtsi jooksul muutusid parameetrid vähe ning keskmiselt oli temperatuur 4,7 ± 0,05 °C ja soolsus 7,5 ± 0,02 g kg⁻¹. Sügis 2019 ja kevad 2020 liuguri missioonide juures oli võrdluseks üks seirejaamas tehtud mõõtmine, ent 2020. a suvise missiooni ajal oli neid kolm. Suvel 2020 näitas seire temperatuuri kasvu 18,0 °C-lt 19,5 °C-ni ning seejärel langust tagasi 18,0 °C-le. Soolsuses oli muutus vastupidine: 7,0 g kg⁻¹ langus 6,8 g kg⁻¹-ni ja seejärel tõus tagasi 7,0 g kg⁻¹-le. On selge, et juba kolm mõõtmist annavad aimu lühiajalisest muutlikkusest. Liuguri mõõtmised kinnitavad muutusi temperatuuris, aga näitasid soolsuse oluliselt suuremat päevast muutlikkust antud piirkonnas.



Joonis 3.3.1. Temperatuur (°C) ja soolsus (g kg⁻¹) 5 m sügavusel seire (kolmnurk) ja liuguri (täpp) andmete põhjal. Seire andmete puhul on temperatuur esitatud vasakule ja soolsus paremale suunatud roosa kolmnurgaga. Liuguri andmed on esitatud vastavalt oranži ja türkiissinisega.

Joonisel 3.3.2 on esitatud segunenud kihi paksus, halokliini sügavus ning hüpoksia piir. Sügis 2019 seire põhjal ulatus segunenud kiht 23 m sügavusele, halokliin algas 69 m sügavuselt ja sügavamal kui 74 m esines hapnikupuudus. Oktoobri jooksul segunenud kihi paksus kasvas oluliselt (18 m), ulatudes oktoobri lõpuks 41 m sügavusele. Halokliini piir sügavnes oktoobri lõpuks 8 m võrra ning vähemalt 10 m paksuses põhjalähedases veekihis püsisid hüpoksilised tingimused terve kuu jooksul. Kevad 2020 kohta ei ole esitatud segunenud kihi paksust veesamba talvise kahekihilise struktuuri tõttu. Veesammas oli kuni halokliinini läbisegunenud ehk segunenud kihi sügavus langes kokku halokliini piiriga. Kevad 2020 seire põhjal algas halokliin 70 m sügavuselt ja põhjas hapnikupuudust ei täheldatud. Liuguri kuuajalise mõõtmise põhjal nähtus, et märtsi alguses oli halokliin mingisuguse sündmuse tõttu surutud põhja lähedale (87 m), aga tõusis siis 79 m juurde, kus jäi stabiilseks. Süvakihtides (>85 m) oli hapnikupuudus tuvastatav. See tähendab, et jaam 85 ei pruugi suhtelise madaluse tõttu kirjeldada ümbritseva mereala põhjalähedaseid tingimusi. Suvi 2020 seire põhjal segunenud kihi paksus kasvas 9,5 m-lt 19 m-ni, halokliin tõusis 70,5 m-lt 65 m-ni. Augusti alguses hapnikupuudust ei tuvastatud, aga augusti lõpus küll. Liuguri mõõtmistest oli näha, et päevade lõikes kõikus segunenud kihi paksus vahemikus 5,5–17 m. Halokliin kerkis kõrgemale ning sellega kaasnes ka hüpoksiliste tingimuste laienemine. Augusti algul mõjutas hüpoksia 17 m paksust kihti põhjalähedal, aga augusti lõpus juba 24 m paksust. See seletab, miks seirejaamas täheldati hapnikupuudust ainult augusti lõpus. Kuu alguses jäi hüpoksia piir seirejaama sügavusest allapoole. Võrdlusest nähtub, et juba natuke tihedam seiramine võimaldab hinnata parameetrite lühiajalisi muutuseid. Eriti oluline on see hapnikupuuduse uurimisel. Isegi kui ümbritsevast merealast madalamas seirejaamas hapnikupuudust ei tuvastatud, siis liuguri mõõtmistes tuli välja, et hapnikupuudus põhjalähedastes kihtides oli suuremal või vähemal määral kogu aeg olemas. Seega kui meil oleks olnud sarnaselt teiste missioonidega ka suvel ainult üks esimene seirejaamas tehtud mõõtmine, siis selle põhjal ei saaks teha järeldust, et antud piirkonnas augustis hapnikupuudust ei esinenud.

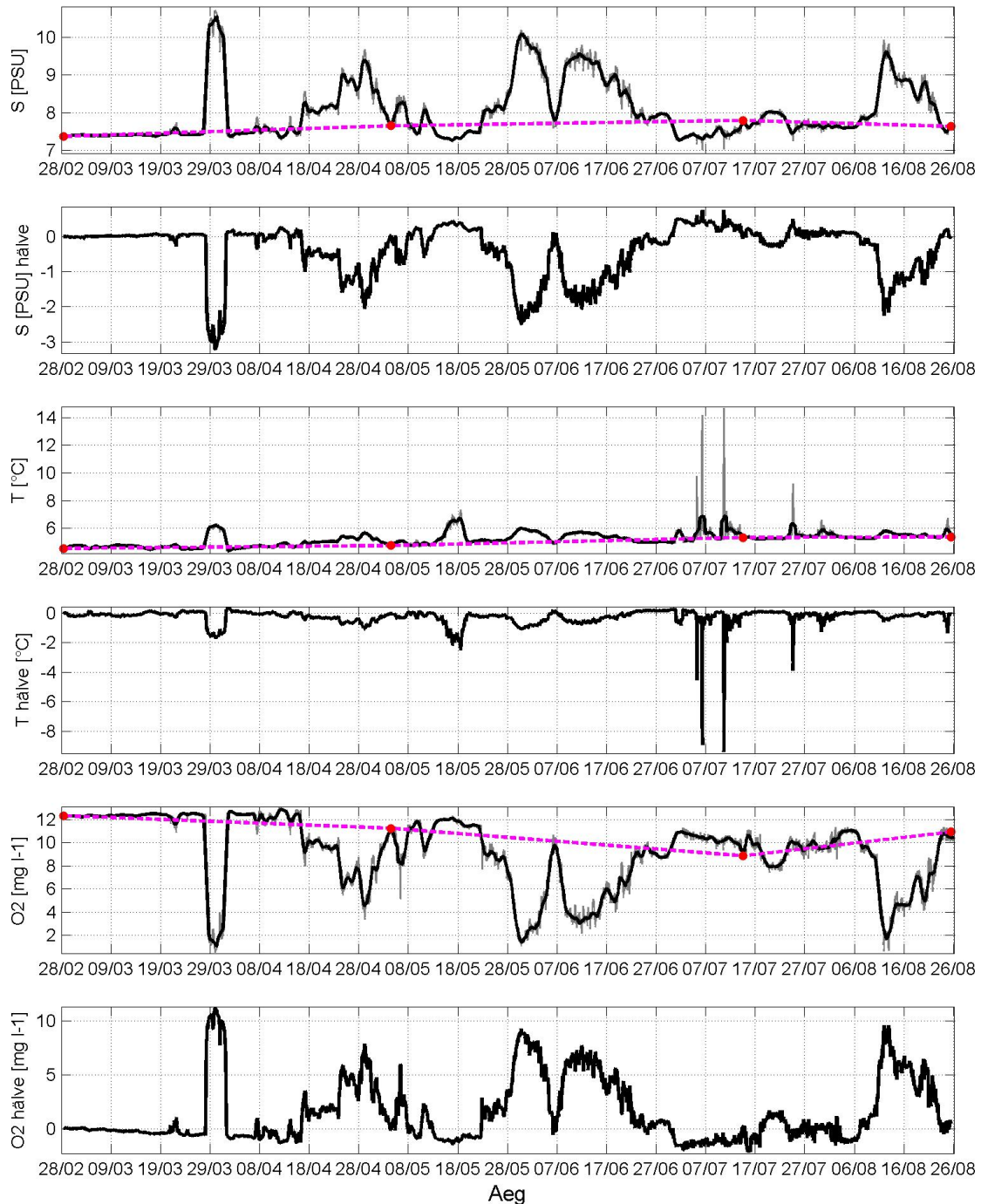


Joonis 3.3.2. Segunenud kihi paksus, halokliini sügavus ja hüpoksia piir seire (kolmnurk, rist) ja liuguri (täpp) andmete põhjal. Seire andmete puhul on segunenud kihi paksus esitatud üles ja halokliini sügavus alla suunatud roosa kolmnurgaga ning hüpoksia piir roosa ristiga. Liuguri andmed on esitatud vastavalt rohelise, sinise ja kollasega.

Järgmiseks vaatame, kui palju lisainfot merekeskkonna kohta annab 67 m sügavusel asunud punktmõõtja. Punktmõõtja annab infot ainult ühelt sügavuselt, kuid kõrge sagedusega. Kuna punktmõõtja asukohas avamere seire mõõtmisi ei teostata, siis võtame arvesse avamere seire reaalsed piirkonnas viibimise päevad (28. veebruar, 4. mai, 14. juuli, 25. august ja 30. oktoober 2020) ja võtame nendel päevadel kell 12:00 punktmõõtja andmetest temperatuuri, soolsuse ja hapnikuväärtused. See tähendab, me loome pildi, milline oleks meie andmestik antud asukohas, kui seda mõõdetaks ainult avamere seire raames, nii nagu seda kogu Eesti merealal erinevates mõõtmisjaamades tehakse. Kõigi kolme parameetri osas kujuneb loodud fiktiivne aegrida väga stabiilseks. Avamere seire reisirid on sattunud perioodidele kui esines suhteliselt madal soolsus (7,3–7,8 PSU) ja temperatuur (4,5–5,4 °C) ja kõrge hapnik (8,8–12,3 mg l⁻¹). Tegelikult näitasid kõrgsageduslikud mõõtmised, et esines terve rida perioode, kui soolsus ja temperatuur olid oluliselt kõrgemad ja hapnik madalam kui varem kirjeldatud. Need sündmused olid tõenäoliselt seotud halokliini tõusmisega. Hapniku kontsentratsioon langes neljal juhtumil hüpoksia tasemeni (2,9 mg l⁻¹). Need sündmused leidsid aset märtsi lõpus, mai lõpus, juuni esimeses pooles ja augusti keskel. Juuli esimeses pooles leidis ka periood kui soolsus langes, temperatuur ja hapniku sisaldus tõusid. See sündmus oli ilmselt seotud tugeva edelatuule poolt tekitatud daunvellinguga, st. ülemise kihi vesi akumuleerus ranniku lähedal ja see suruti alla.

Kogu perioodi peale hälbis avamereseire kuupäevadel tehtud mõõtmiste järgi soolsus keskmiselt 0.52 PSU, temperatuur 0.31 °C ja hapnik 2.12 mg l⁻¹, seejuures kogu perioodi peale alahindas see meetod temperatuuri -0,25 °C, soolsust -0.39 PSU ja hapnikku 1,48 mg l⁻¹. Kuue kuu peale kokku keskmistatult ei ole hälbed väga suured, kuid teatud perioodidel, näiteks juunis, olid erinevused arvestatavad. Hapniku puhul oli juunis erinevus ca 3 nädala jooksul enam kui 5 mg l⁻¹, veidi lühem selline periood esines augusti keskel. Märtsi lõpus, aprilli algul oli erinevus ligi 10 mg l⁻¹, mis tähendab, et avamereseire kuupäevade järgi hinnates oli vesi hapnikuga ligi 100% rikastatud, aga punktmõõtjaga mõõdetud aegrida näitas, et hapniku kontsentratsioon langes kohati alla 1 mg l⁻¹, st. oluliselt alla hüpoksia piiri. Suured episoodilised hälbed esinesid ka soolsuse aegreas. Erinevused üle 1 PSU esinesid kõigil kuudel, v.a. juulis. Temperatuuris olid hälbed enamus ajast 1-2 °C või väiksemad. Vaid daunvellingu ajal mõõdeti üksikud oluliselt kõrgemad temperatuuri näidud, mida seire kuupäevadel ei registreeritud.

Kokkuvõttes võib öelda, et punktmõõtja täiendab oluliselt seirereisi episoodilisi mõõtmisi. Punktmõõtja aegread võimaldavad näha, millises loodusliku varieerumise faasis seirereis tehti. Selliste andmete olemasolul on võimalik oluliselt vähendada seirereisi mõõtmiste määramatust.

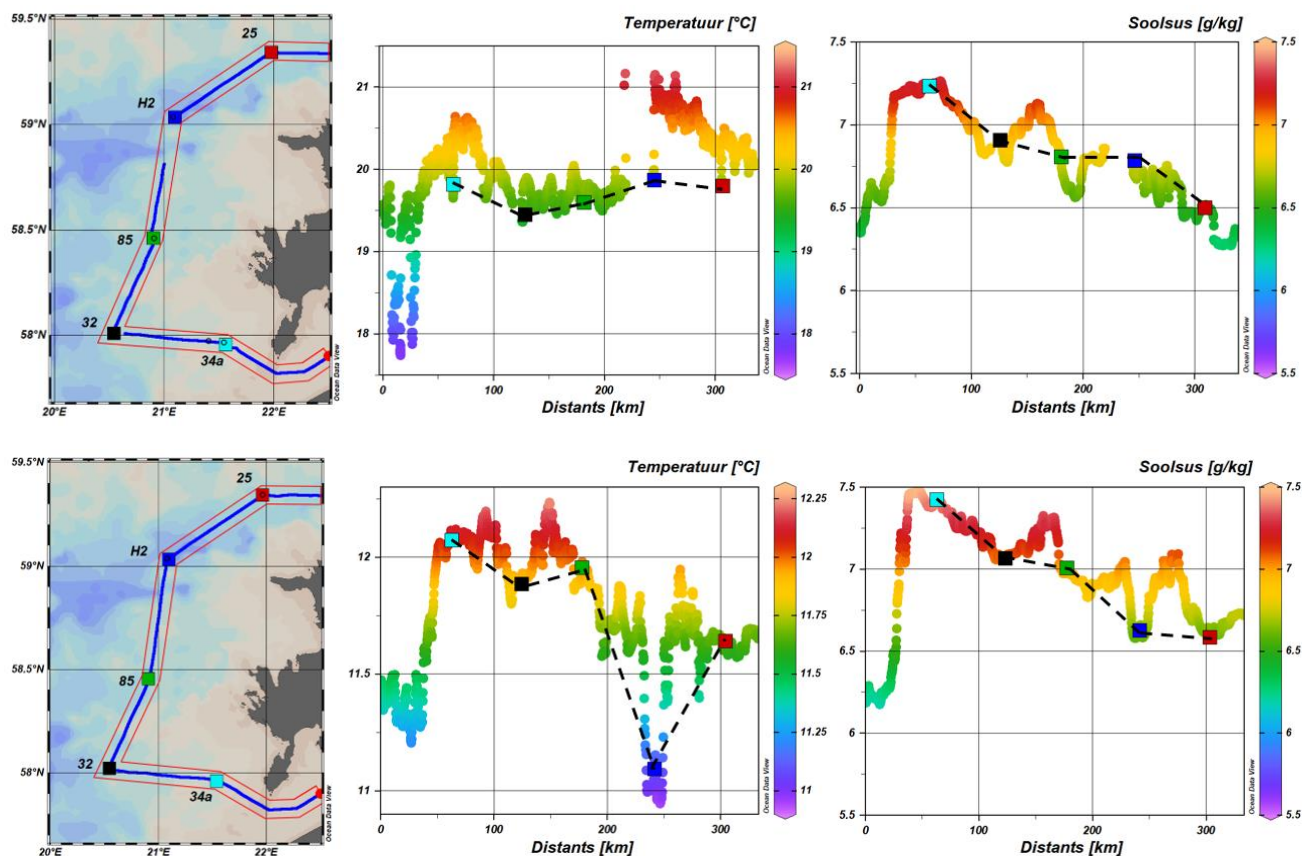


Joonis 3.3.3. Temperatuur, soolsus ja hapnik ADCP poijaamas 67 m sügavusel. Halli peene joonega on märgitud tunnise sammuga mõõdetud näidud, musta paksema joonega 24 h silutud andmed. Punased punktid tähistavad fiktiivseid mõõtmisi samas asukohas avamere seire toimumise ajal, st. kui avamere seire oleks teinud antud asukohas mõõtmise (tegelikult oli lähim jaam „85“). Lillad kriipsjooned näitavad avamereseire mõõtmiste vahele interpoleeritud väärtuseid. Hälbed näitavad fiktiivsete interpoleeritud avamereseire mõõtmiste ja reaalsete mõõtmiste erinevust. Mõõtmised toimusid veebruari lõpust kuni augusti lõpuni 2020.

3.4. Ruumiline muutlikkus

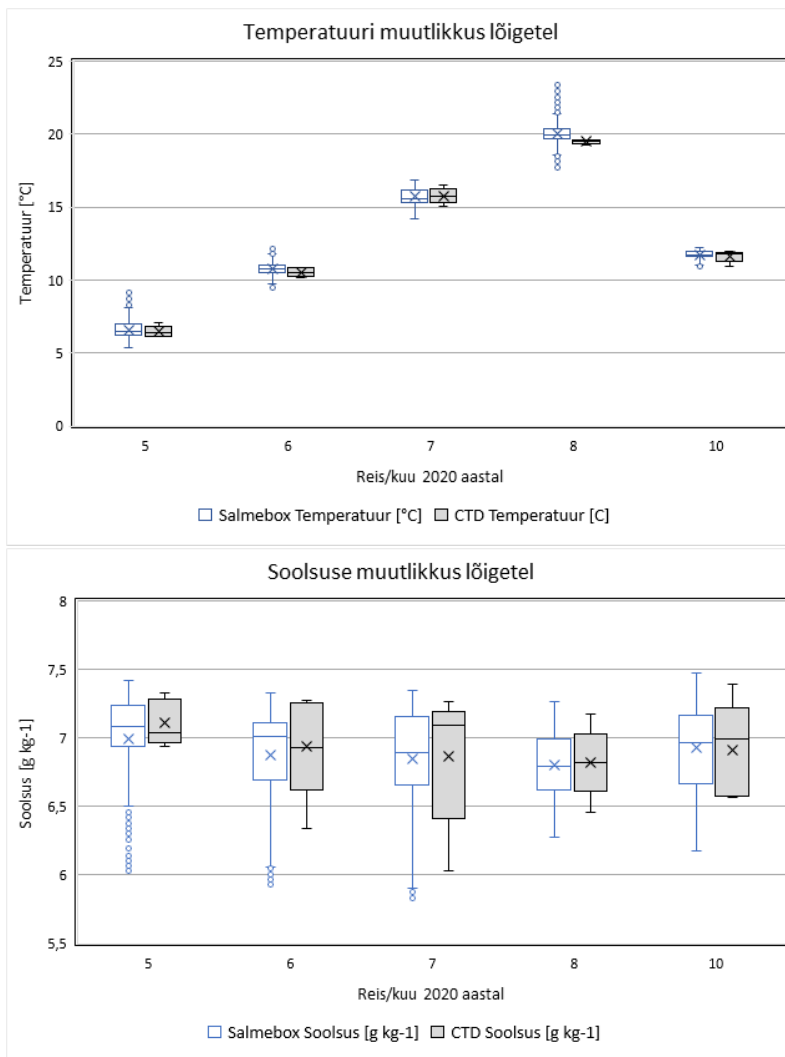
Salmebox ja seireandmed

Järgnevalt vaatame, kuidas täiendavad mõõtmised parandavad arusaamist piirkonna ruumilisest muutlikkusest. Joonisel 3.4.1 on toodud temperatuuri ja soolsuse muutlikkus Salmeboxiga teostatud kõrgsageduslike autonoomsete mõõtmiste ja seirereisi raames tehtud punktmõõtmiste näitel. Esitatud on kahe seirereisi andmed 4.08 - 6.08.2020 ja 30.10 - 31.10.2020. Kõrgsageduslike mõõtmistega on võimalik näha meres toimuvaid temperatuuri ja soolsuse muutuseid suuremas ulatuses. Eriti hästi tuleb see välja augusti seirereisi merevee temperatuuri andmetes, kus on näha jaamade H2 ja 85 vahele jääva veepinna temperatuure üle 20 °C, maksimumiga 21,16 °C, samas kui jaamas H2 mõõdeti temperatuuriks 19,60 °C. Samuti pole seirejaamas tehtud mõõtmistega võimalik näha mere pinnakihis toimuvat soolsuse muutlikkust. Erinevalt tegelikkusest vähenes seire andmete põhjal merevee pinnakihi soolsus Soome lahe suunas võrdlemisi stabiilselt. Samamoodi pole erineva temperatuuri ja soolsusega pinnakihi veemasse võimalik näha ka oktoobri kuu seirereisi jaamade andmete põhjal. Peaaegu kõigi jaamade vahel olid kõrgema temperatuuri ja soolsusega veemassid, mida pole võimalik näha seirejaama andmetes.



Joonis 3.4.1. Temperatuuri ja soolsuse joonised reise 4.08-6.08.2020 (ülemine) ja 30.10-31.10.2020 (alumine) kohta. Võrdluseks märgitud kaardile seirejaamade 25, H2, 85, 32 ja 34a asukohad ning vastava jaama temperatuuri ja soolsuse mõõdetud väärtused.

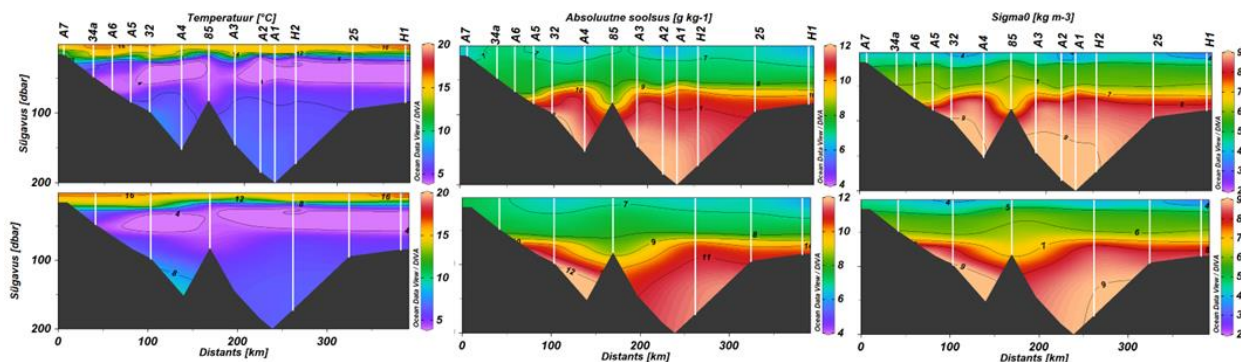
Kõrgsageduslike autonoomsete Salmeboxi mõõtmistega ja seirejaamades mõõdetud punktmõõtmistega saadud temperatuuri ja soolsuse muutlikkus jaanuar kuni oktoober 2020. aastal on ära toodud joonisel 3.4.2. Tänu kõrgsageduslikele mõõtmistele võib näiteks temperatuuri andmetes näha minimaalsetes ja maksimaalsetes väärtustes suuremat muutlikkust kui jaamades tehtud punktmõõtmistes.



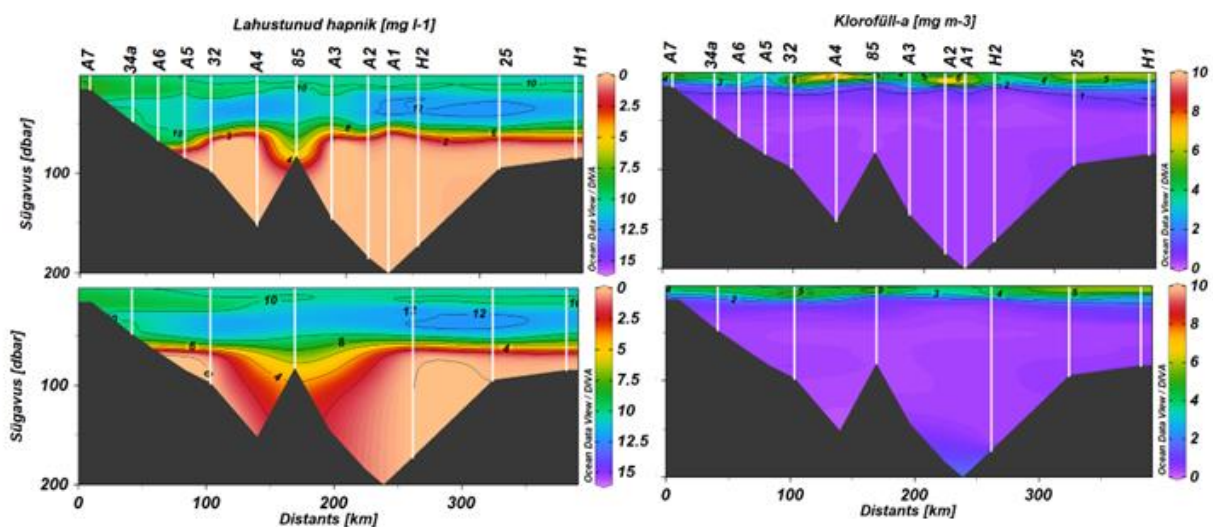
Joonis 3.4.2. Temperatuuri, °C (ülemine) ja soolsuse g kg⁻¹ (alumine) muutlikkus Salmeboxiga mõõdistatud lõigetel (sinised kastid) ja samale lõikele jäävades seirejaamades (25, H2, 85, 32, 34a; hallid kastid). Joonisel on näidatud x-teljel reis/kuu 2020 aastal; karpdiagrammina mediaanekeskmsed, kvartiilid (25% ja 75%), miinimumid-maksimumid (sinised ja mustad kriipsud) ja nendest välja jäävad üksikud väärtused (sinised ringid) ning aritmeetilised keskmised (ristikestega).

Riikliku seire jaamad ja lisajaamad

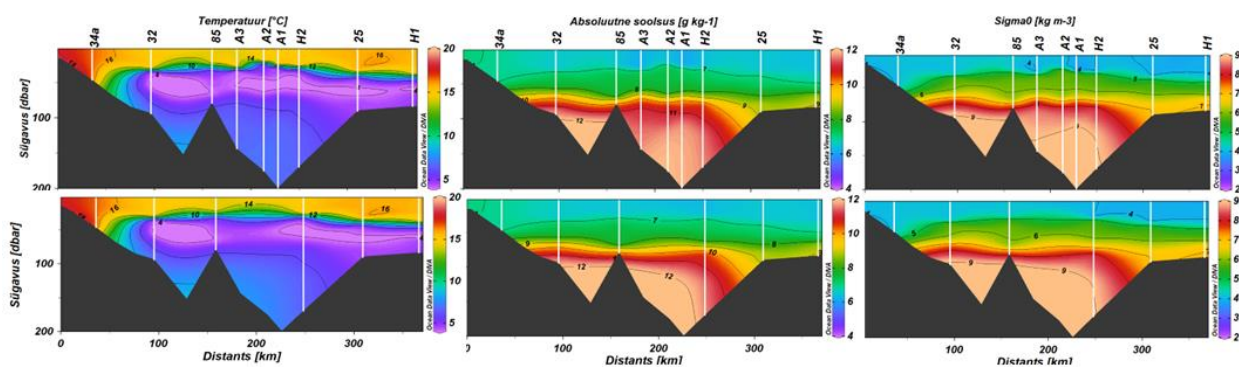
Antud töös kasutataval lõikel teostati mõõtmised lisaks seirejaamadele (H1, 25, H2, 85, 32, 34a) ka nende vahel paiknevates lisajaamades (Ava1 – 7) perioodidel juuli ja august 2019, ning jaanuar, juuni ja juuli 2020. Täiendavate mõõtmisjaamade ja ainult seireprogrammi jaamades tehtud mõõtmistega saadud vertikaalsete lõigete võrdlused on toodud joonistel 3.4.3. - 3.4.12. Kõikidel perioodidel, kus on kaasatud lisajaamad, võib näha märgatavat paranemist antud piirkonna keskkonna parameetrite kirjeldamises ja seda läbi terve veesamba. Joonisel 3.4.3 on näha, et ilma lisajaamadeta tekib interpoleerimise tõttu jaama 85 ja 32 vahel ebareaalne temperatuuri ja soolsuse maksimum. Lisaks saab välja tuua ka asjaolu, et halokliini sügavam asend jaamas 85 on pigem lokaalne ja teistes sügavamates piirkondades seda taoliselt ei esine. Joonisel 3.4.4 tekitab interpoleerimine sarnaselt ka vea hapnikuga jaama 85 ümber. Joonisel 3.4.7 on kasutades lisajaamu jaama Ava7 piirkonnas madalamad temperatuuri, soolsuse ja tiheduse väärtused, kui kasutades ainult seirejaamade kaudu interpoleerimist. Lisaks on seireandmetest näha jaamast 85 kummalgi pool ebareaalselt kõrgele tekitatud soolsuse ja tiheduse maksimume. Sarnast tendentsi joonisega 3.4.7 on märgata ka joonisel 3.4.9 soolsuse ja tiheduse andmetega jaamas Ava7. Joonisel 3.4.10 on näha, et nulli lähedased hapnikutingimused ulatusid tegelikult lõunapool (jaama Ava7 suunas) palju kõrgemale kui ainult seireandmetest võis järeldada. Lisajaamadega tulevad klorofüll-a kontsentratsioonides välja ka lokaliseeritud maksimumid, mitte peaaegu poolt lõiget kattev tervik. Sellest järeldub, et selles piirkonnas peaks olema tihedam jaamade võrk, kuna kaugused jaamade vahel on arvestades meres toimuvaid protsesse liiga pikad. Seega, lisajaamad muudavad mõõdistuse tulemused usaldusväärsemaks.



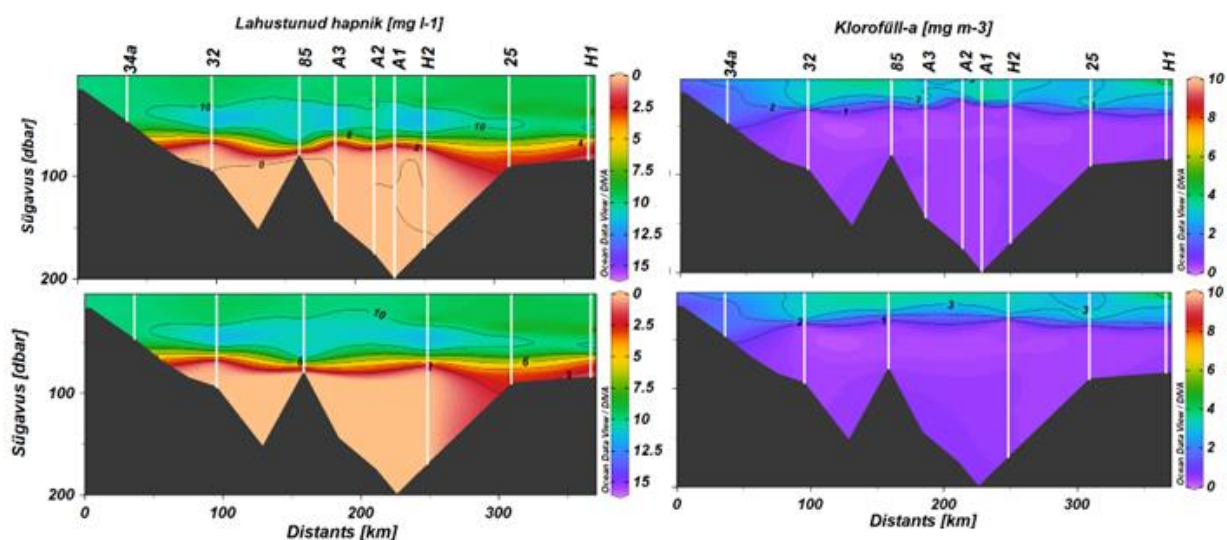
Joonis 3.4.3. Temperatuuri, soolsuse ja tiheduse andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) juuli 2019.



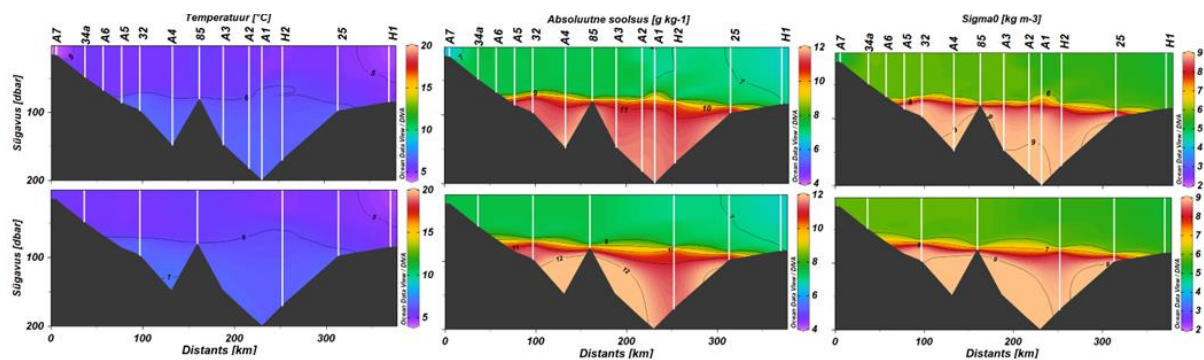
Joonis 3.4.4. Lahustunud hapniku ja klorofüll-a andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) juuli 2019.



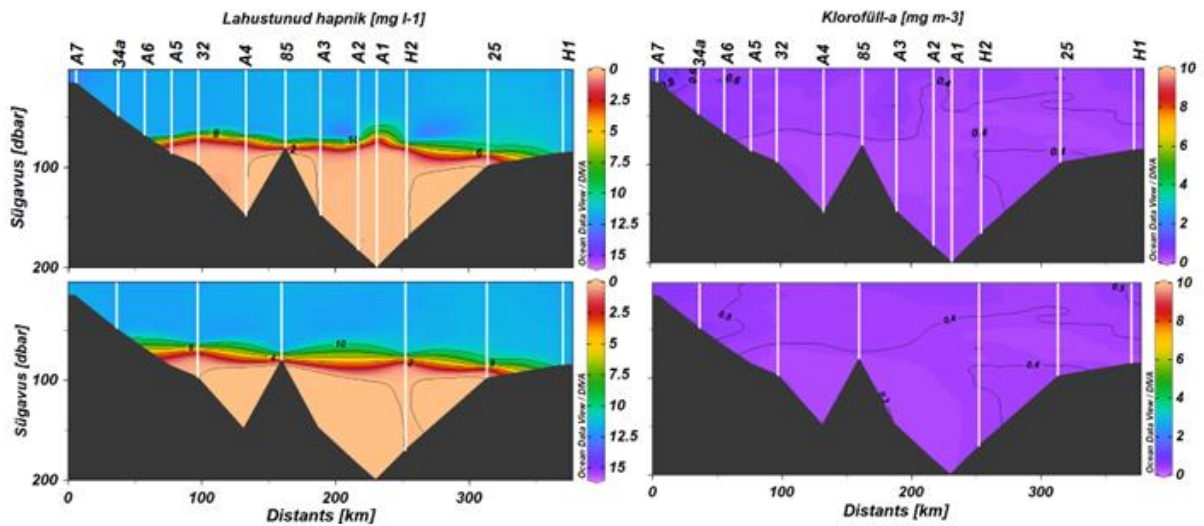
Joonis 3.4.5. Temperatuuri, sooluse ja tiheduse andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) august 2019.



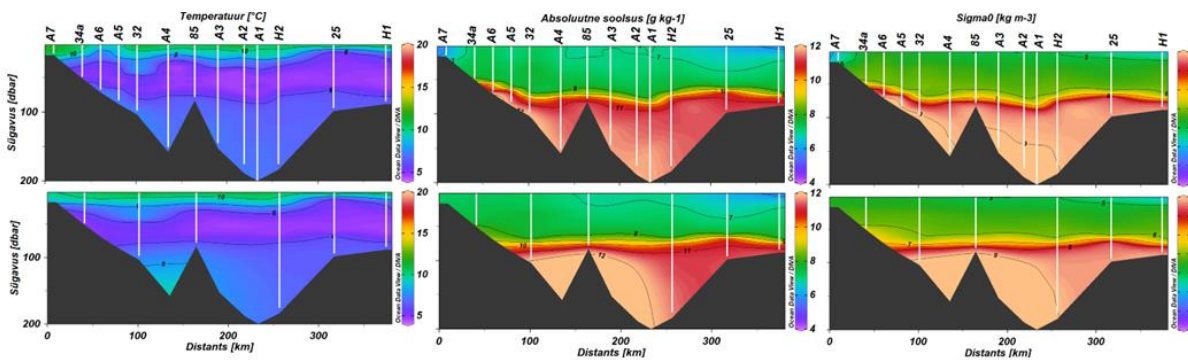
Joonis 3.4.6. Lahustunud hapniku ja klorofüll-a andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) august 2019.



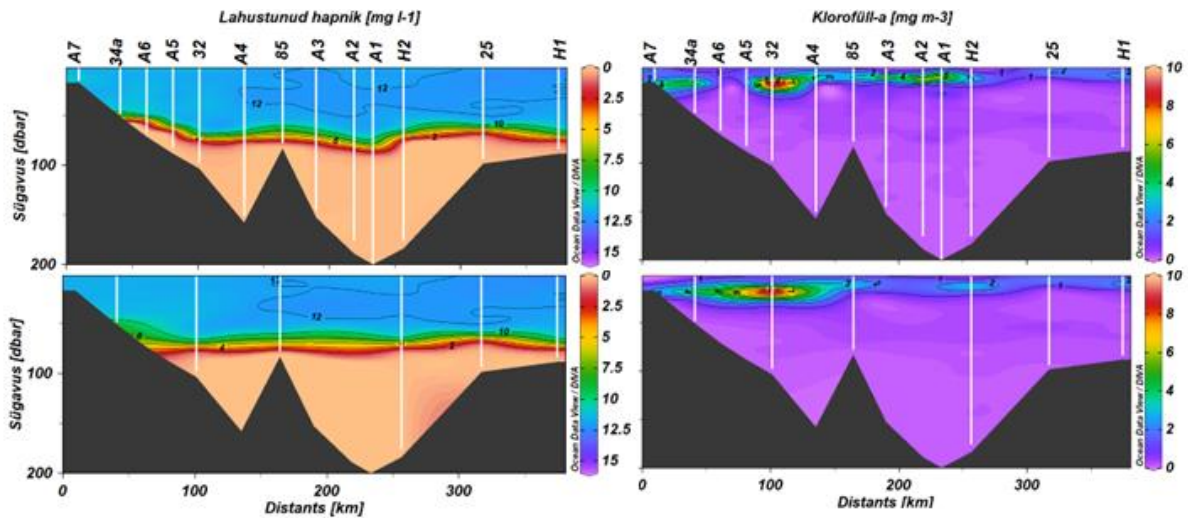
Joonis 3.4.7. Temperatuuri, soolsuse ja tiheduse andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) jaanuar 2020.



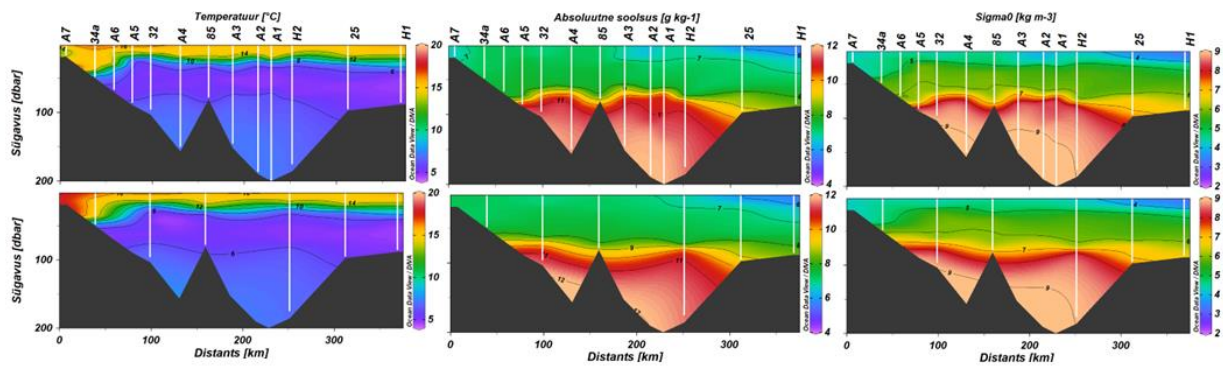
Joonis 3.4.8. Lahustunud hapniku ja klorofüll-a andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) jaanuar 2020.



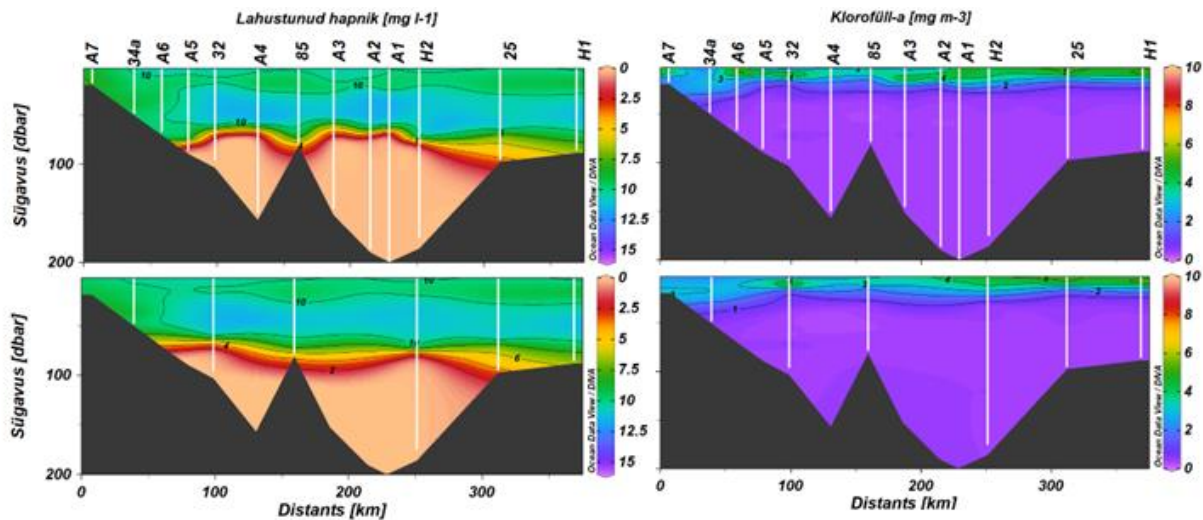
Joonis 3.4.9. Temperatuuri, soolsuse ja tiheduse andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) juuni 2020.



Joonis 3.4.10. Lahustunud hapniku ja klorofüll-a andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) juuni 2020.



Joonis 3.4.11. Temperatuuri, soolsuse ja tiheduse andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) juuli 2020.



Joonis 3.4.12. Lahustunud hapniku ja klorofüll-a andmete ruumiline võrdlus kasutades seirejaamu koos lisajaamadega (ülemine) ja ainult seirejaamu (alumine) juuli 2020.

Liugur ja seireandmed

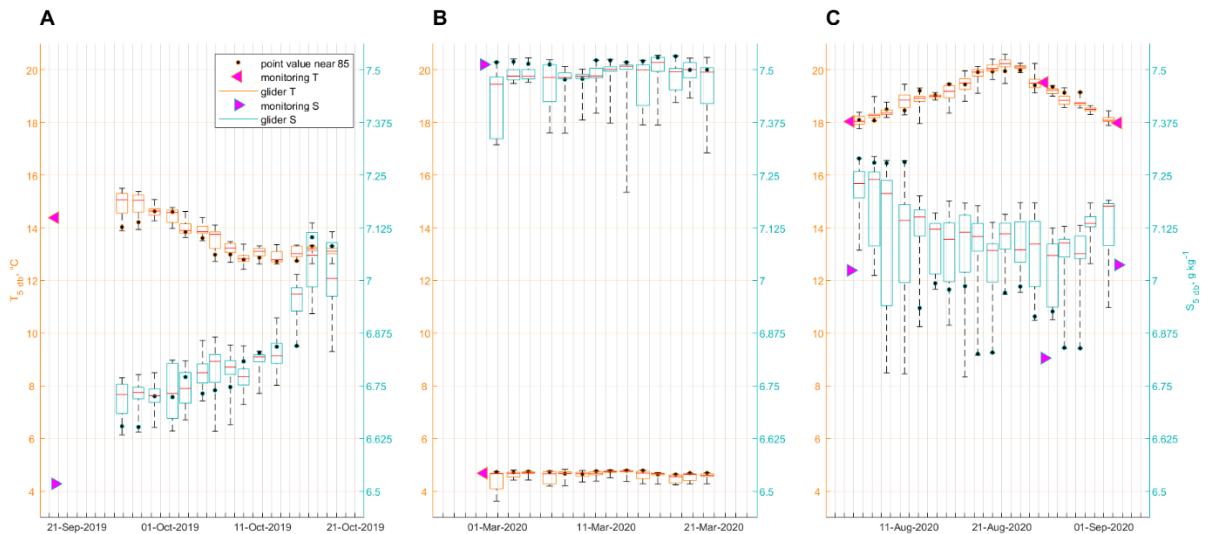
Hindmaks, kui hästi kirjeldavad seirejaamad vaadeldavat mereala, on peatükis 3.3 esitatud seirejaama 85 ja liuguri mõõtepunkti aegridadele (joonised 3.3.1 ja 3.3.2) lisatud iga punkti juurde antud parameetri ruumiline muutlikkus liuguri mõõdistuslõikel. Lõike rannikupoolsem punkt on seirejaamast 48 km kaugusel. Järgnevate jooniste põhjal saab hinnata, kui hästi võimaldab seirejaam hinnata rannikupoolset mereala, kus sügavused kahanevad ühtlaselt 95 m kuni 40 m. Esitatud on pinnalähedane (5 m) temperatuur ja soolsus, segunenud kihi paksus, halokliini sügavus ning hüpoksia piiri sügavus. Parameetri jaotumise hajuvust lõikel iseloomustab karpdiagramm, kus keskmine värviline karp moodustub 25- ja 75-protsentiili piiridest, keskel on punase horisontaaljoonega 50-protsentiil (ehk mediaan) ning kastist ulatuvad välja vertikaaljooned miinimum- ja maksimumväärtusteni. Joonisel 3.4.13 on esitatud pinnalähedase temperatuuri ja soolsuse muutlikkus liuguri mõõdistuslõikel. Joonisel 3.4.14. on esitatud segunenud kihi paksuse, halokliini sügavuse ning hüpoksia ülemise piiri (sügavuse) muutlikkus liuguri mõõdistuslõikel. Segunenud kihi sügavus näitab ka termokliini ülemist piiri. Seega segunenud kihi paksuse muutumine viitab termokliini asetusele lõikel.

Temperatuuri ruumiline muutlikkus merealal on enim mõjutatud soojusvahetusest atmosfääriga. Sügisel 2019 toimunud avamere-seire käigus mõõdetud temperatuur oli sarnane 8 päeva hiljem liuguri mõõdetud temperatuuriga avamerepoolses punktis, vastavalt 14,4 °C ja 14,0 °C (joonis 3.4.13 A). Seejuures esines lõikel ka märgatavalt kõrgemaid temperatuure kuni 15,5 °C. See tähendab, et lõikel oli mingi ala ümbritsevast veidi kõrgema temperatuuriga. Oktoobrikuu jooksul esines rohkem perioode, mil avamere pool oli temperatuur pigem madalam kui ülejäänud lõikel. Kuu vältel temperatuur üldiselt langes ja muutlikkus vähenes. Seega seire andmete põhjal on sügisene ülemise kihi temperatuur merealal ülehinnatud. Soolsust saab piirkonnas enim mõjutada veemasside liikumine. Sügisel 2019 seirel mõõdetud

soolsus $6,5 \text{ g kg}^{-1}$ on madalam kui liuguri mõõdetud väärtused terve oktoobri jooksul, mis jäid vahemikku $6,6\text{--}7,1 \text{ g kg}^{-1}$. See tähendab, et seire toimumise ajal oli soolsus madalam kui merealale iseloomulik sel perioodil.

Kevadel 2020 langes seirel mõõdetud temperatuur $4,7 \text{ }^\circ\text{C}$ kokku liuguri mõõdetud temperatuuriga avamerepoolses punktis (joonis 3.4.13 B). Samas esines lõikel madalamaid temperatuure kuni $3,6 \text{ }^\circ\text{C}$, mis oli ka miinimum. Märtsi jooksul nii madalaid temperatuure enam ei esinenud. Avamere pool mõõdetud temperatuuri väärtused olid pigem kõrgemad kui ülejäänud lõikel. Ka soolsus oli mõõdistuse alguses seirel ja liuguri avamerepoolses punktis võrdne, $7,5 \text{ g kg}^{-1}$. Märtsis varieerus soolsus vahemikus $7,2\text{--}7,5 \text{ g kg}^{-1}$ ning märksa enam kui temperatuur. Avamere pool olid soolsuse väärtused enamasti kõrgemad kui ülejäänud lõikel. Seega kevadel oli pinnakiht avamerel pigem soojem ja soolasem kui ranniku pool.

Augusti alguses 2020 langes seirel mõõdetud temperatuur $18,0 \text{ }^\circ\text{C}$ kokku liuguri mõõdetud temperatuuriga avamerepoolses punktis ning lõikel oli muutlikkus väike vahemikus $17,8\text{--}18,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (joonis 3.4.13 C). Kuu jooksul esines ka perioode, mil pinnakihis varieerus temperatuur rohkem; ca $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Augusti lõpus ja septembri alguses toimunud seirel mõõdetud ülemise veekihi temperatuurid jäid liuguri poolt mõõdetud temperatuuride vahemikku. Avamere pool ei esinenud ühtset kalduvust minimaalsete või maksimaalsete väärtuste lähedale. Soolsuse puhul nähtus, et kõik kolm seire käigus mõõdetud soolsuse väärtust erinevad liuguri mõõtmistest. Augusti alguses oli seirel mõõdetud soolsus $7,0 \text{ g kg}^{-1}$ madalam lõikel mõõdetud soolsuse vahemikust, $7,1\text{--}7,3 \text{ g kg}^{-1}$. Lisaks mõõtis liugur avamerepoolses punktis soolsuseks vahemiku maksimumi $7,3 \text{ g kg}^{-1}$. Kõikide missioonide puhul tuli esile, et mõõdistuslõikel on soolsus temperatuurist muutlikum. Augusti esimeses kolmandikus on avamere pool soolsuse väärtused kõrgemad kui ülejäänud lõikel ning ülejäänud kuu jooksul on tendents vastupidine. Olenemata seire ja liuguri mõõtmiste suhtelisest erinevusest soolsuse puhul, olid kuu lõikes mõõtmised kooskõlas. Augusti esimeses kahes kolmandikus liikus temperatuur tõusvas joones ning langes seejärel. Soolsus oli augusti esimeses kahes kolmandikus languses, misjärel tõusis veidi.



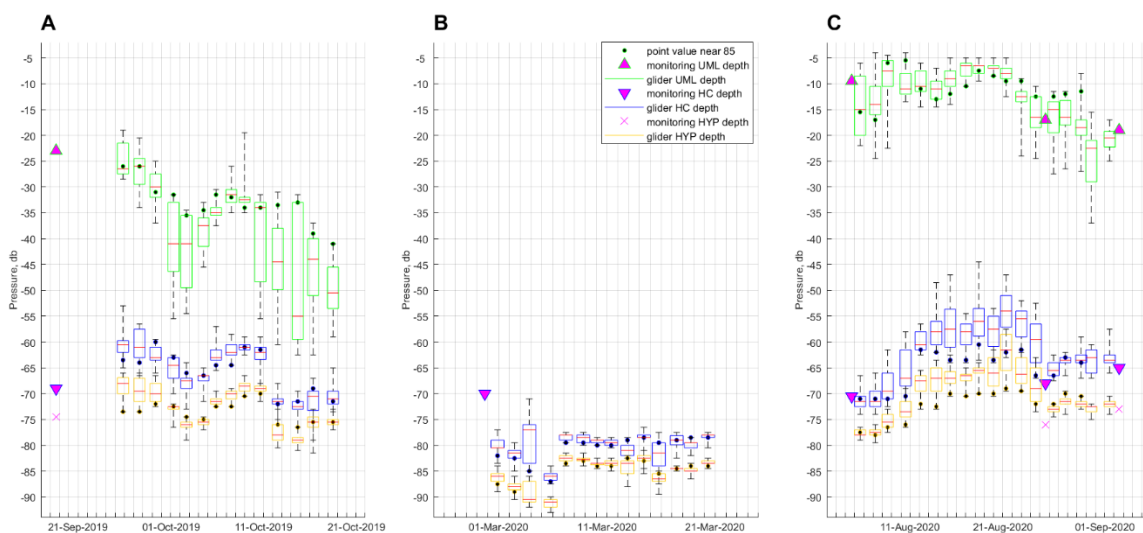
Joonis 3.4.13. Temperatuur ($^{\circ}\text{C}$) ja soolsus (g kg^{-1}) 5 m sügavusel seire (kolmnurk) ja liuguri (karpdiagramm) andmete põhjal. Seire andmete puhul on temperatuur esitatud vasakule ja soolsus paremale suunatud roosa kolmnurgaga. Liuguri andmed on esitatud vastavalt oranži ja türkiissinisega. Musta täpiga on esitatud joonistel 3.3.1. ja 3.3.2. valitud liuguri punkti (lähim seirejaamale) andmed. Karpdiagrammi keskmine värviline karp moodustub 25- ja 75-protsentiili piiridest, punase horisontaaljoonega on 50-protsentiil ning kastist ulatuvad välja vertikaaljooned miinimum- ja maksimumväärtusteni.

Sügisel 2019 nähtus liuguri mõõtmistest, et peale avamereseiret on 8 päeva jooksul segunenud kihi paksus kasvanud 3 m, 23 m kuni 26 m (joonis 3.4.14 A). Oktoobris varieerus segunenud kihi paksus kohati laias vahemikus. Nt 2. okt kõikus segunenud kiht lõike piires vahemikus 34–55 m ja 4. okt vahemikus 33–45 m. Kuna avamerepoolses punktis on nendel lõigetel segunenud kihi paksus ca 35 m, siis segunenud kihi paksus vähenes kahe ööpäevaga 10 m võrra lõike rannikupoolses osas. Kuu jooksul oli avamere pool segunenud kiht enamasti õhem kui rannikupoolses osas. Kui kihi muutlikkus lõike piires oli väiksem, siis segunenud kiht oli pigem õhem. Kui muutlikkus oli lõike piires suurem, siis segunenud kiht oli pigem paksem. Mõõtmiste alguses oli halokliini piir võrreldes avamereseirega tõusnud 6 m, 69 m kuni 63 m sügavusele. Hüpoksia piir tõusis seejuures 1 m, 74 m kuni 73 m. Lõike piires kõikus halokliini piir keskmiselt 8 m võrra. Kuu lõikes ilmnes, mida õhem ja seejuures väiksema muutlikkusega oli segunenud kiht, seda kõrgemale ulatus halokliin. Selliseid episoode oli mõõdistuse jooksul kaks ning seejuures oli avamerepoolses punktis halokliini piir sügavamal võrreldes ülejäänud lõikega. See tähendab, et õhema segunenud kihi korral halokliini piir tõuseb nõlval kõrgemale ning halokliinis võib esineda nõlva järgiv kalle. Hüpoksia piiri kõikumine oli kooskõlas halokliini liikumisega. Lõike piires oli muutlikkus suurem mõõdistuse alguses.

Kevadel 2020 oli seire andmete järgi halokliini piir oluliselt kõrgemal kui seda liuguri avamerepoolses punktis, vastavalt 70 m ja 82 m (joonis 3.4.14 B). Seirejaamas hüpoksiat ei tuvastatud, aga liuguri mõõtmiste järgi asus hüpoksia piir 87 m juures. Lõikel jäi halokliini piir vahemikku 77–83 m ja hüpoksia piir vahemikku 84–89 m. Märtsi alguses toimus avamere pool halokliini piiri sügavnemine 87 m juurde.

Sellele eelnes aga väga suure muutlikkusega mõõdistuslõige, kus halokliini piir kõikus 71 m kuni 85 m. See tähendab, et halokliini piir oli liikunud nõlval märkimisväärselt kõrgemale 1-2 päeva vältel. Ülejäänud kuu jooksul jäi halokliini piir avamerepoolses punktis ca 78 m juurde. Lõike piires oli varieeruvus enamasti paar meetrit. Hüpkosia oli seejuures põhjakihis kogu aeg tuvastatav.

2020 augusti alguses erines segunenud kihi paksus seire ja liuguri avamerepoolses punktis 6 m võrra, vastavalt 9 m ja 15 m (joonis 3.4.14 C). Mõõdistuslõikel oli segunenud kihi paksus vahemikus 6 m kuni 22 m. Lõigetel esines suurem muutlikkus kuu esimeses ja viimases kolmandikus. Kuu teises kolmandikus oli segunenud kihi paksuse muutlikkus väiksem, st erinevus lõike eri osades oli alla 10 m. Seejuures avamerepoolses punktis oli segunenud kiht pigem paksem võrreldes ülejäänud lõikega. Kuu lõpus erines segunenud kihi paksus seirejaamas ja liuguri avamerepoolses punktis 4 m, vastavalt 17 m ja 13 m. See tähendab, et võrreldes kuu algusega oli erinevus vastupidine. Seire ja liuguri avamerepoolses punktis oli augusti alguses halokliini piir samal sügavusel, 71 m. Kuu lõpus oli erinevus ainult 1 m, vastavalt 68 m ja 67 m. Halokliini piiri kõikumine toimus sarnaselt nagu sügisel 2019 - mida õhem ja seejuures väiksema muutlikkusega oli segunenud kiht, seda kõrgemale ulatus halokliin. Suvel oli aga segunenud kihi paksus enamasti väiksem ning halokliini piir ulatus mõnel juhul isegi 50 m juurde. Kõrge halokliini piiri (kuni 50–55 m) korral oli avamerepoolses punktis halokliini piir sügavamal, allpool 60 m. Seega suvisele mõõdistusele oli iseloomulik halokliini suur muutlikkus lõike piires. Liuguri mõõtmistes tuli esile põhjalähedane hapnikupuudus terve kuu vältel. Kuu alguses asus avamerepoolses punktis hüpkosia piir 77 m juures, kuid seirejaamas siis hüpkosiat ei tuvastatud. Augusti jooksul tõusis hüpkosia piir kooskõlas halokliini piiriga. Lõikel oli hüpkosia piiri muutlikkus suur kuu keskel, kui halokliini piir oli kõrgel. Seega suvel tungis halokliin kõrgele merenõlvale ning võimaldas hapnikupuuduses oleva ala laienemist.



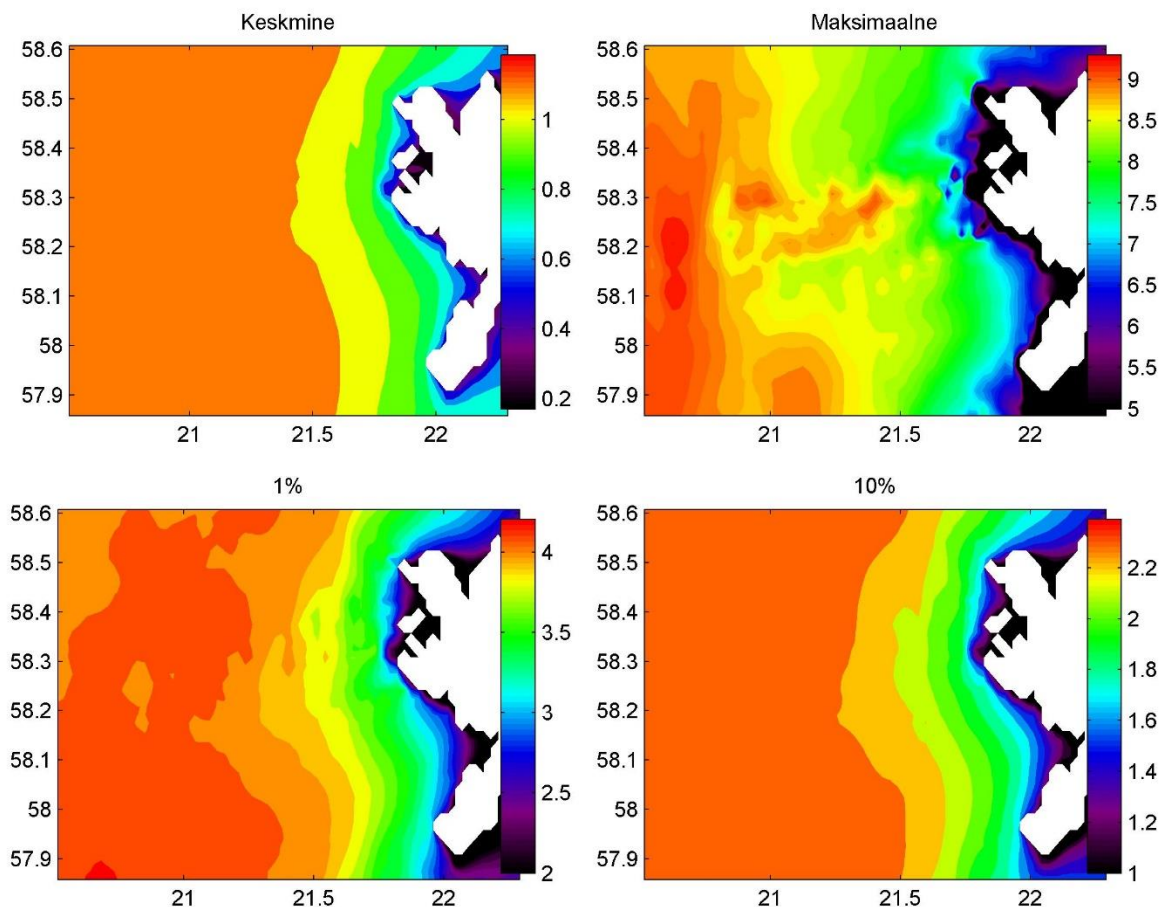
Joonis 3.4.14. Segunenud kihi paksus, halokliini sügavus ja hüpkosia piir seire (kolmnurk, rist) ja liuguri (karpdiagramm) andmete põhjal. Seire andmete puhul on segunenud kihi paksus esitatud ülles ja halokliini sügavus alla suunatud roosa kolmnurgaga ning hüpkosia piir roosa ristiga. Musta täpiga on esitatud joonistel 3.3.1. ja 3.3.2. valitud liuguri punkti (lähim seirejaamale) andmed. Karpdiagrammi keskmine värviline karp moodustub 25- ja 75-protsentiili piiridest, punase horisontaaljoonega on 50-protsentiil ning kastist ulatuvad välja vertikaaljooned miinimum- ja maksimumväärtusteni.

Seirejaam on iseloomulik antud piirkonnale, kuid võrdlusest liuguri mõõdistustega nähtus, et seirejaama infot ei saa ekstrapoleerida ranniku poole, kus domineerivad rannaäärsed protsessid. Termokliini ja halokliini omadused, nagu asetus, paksus ja tugevus, on muutlikud nii ajas kui ka ruumis. Suur osa on soojusvahetusel atmosfääriga ja tuulepingel ning mesomastaapsetel keeristel. Samuti mõjutavad merenõlval toimuvad füüsilised protsessid, nagu ap- ja daunvelling või halokliini aluse vee kerkimine, oluliselt termokliini ja halokliini käitumist. Autonoomsed vaatlused võimaldavad koguda informatsiooni, mida hõredalt jaotatud punktmõõtmised ei suuda edasi anda. Kuuajaline liuguri missioon täiendaks tavapärast seiret oluliselt. Pikk mõõtmisperiood võimaldab hinnata, millistest tingimustes seire oli teostatud, ning lai ruumiline katvus parendab seirejaama ümbritseva mereala kirjeldamise võimalusi.

3.5. Veesamba karakteristikute kaardistamine kombineerides in-situ mõõtmisi ja mudelprodukte

Lainetus

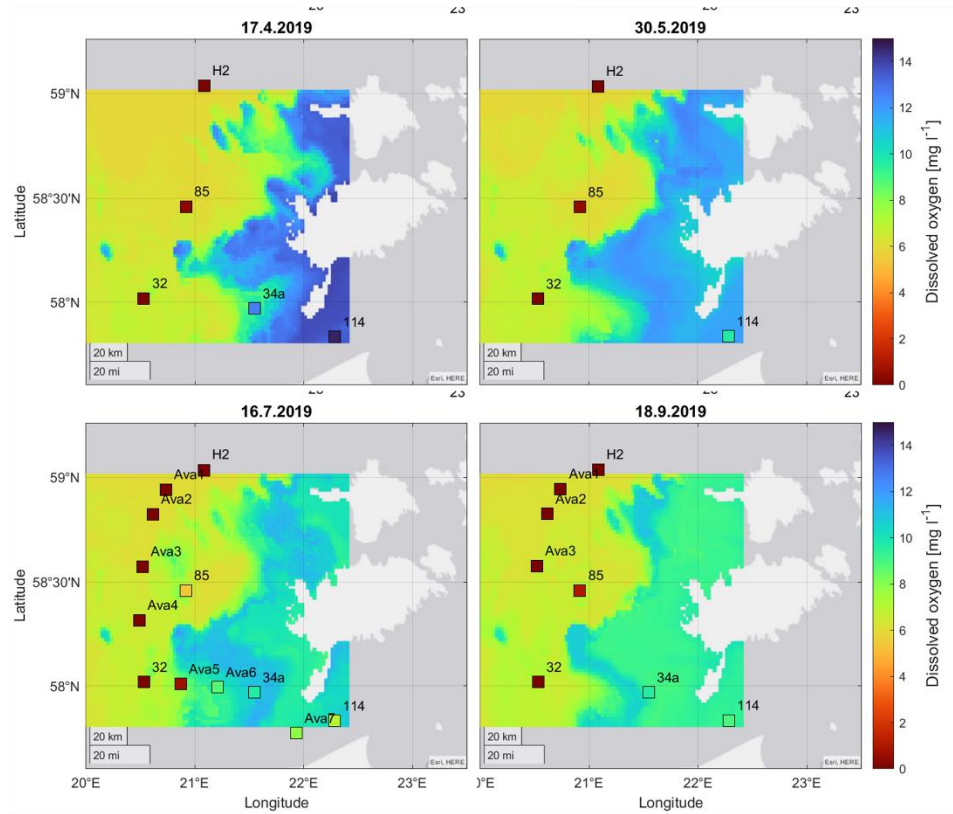
Olulise laine kõrguse statistikud 1993-2019 näitavad selgelt avamere ja rannikulähedase tsooni erinevusi (joonis 3.5.1). Joonisel toodud jaotused on eelkõige tingitud piirkonna morfoloogiast, batümeetriast ja tuulerežiimist, mille kohaselt domineerivad piirkonnas edelatuuled. Kuna mereala on sellesse ilmakaarde lainetusele avatud, siis võib väga tugevates tormides pea kogu piirkonnas esineda laine kõrgust üle 8 m. Laine maksimaalne kõrgus rannalähedases madalamas tsoonis on piiratud sügavusega. Teatud laine kõrguse ja sügavuse suhte juures lained murduvad. Kuna mereala on avatud ka põhjakaarde, siis esineb siin arvestatava kõrguse lainetust ka põhja- ja loodetormidega. Laine keskmise kõrguse avamere-rannatsooni erinevusse panustavad ilmselt ka laineolukorrad, mis tekivad idakaarte tuultega. Sellisel juhul on laine kõrguse piirajaks lainete hoovõtumaa, mis ranniku lähedal on väike, kuid kasvab avamere suunas.



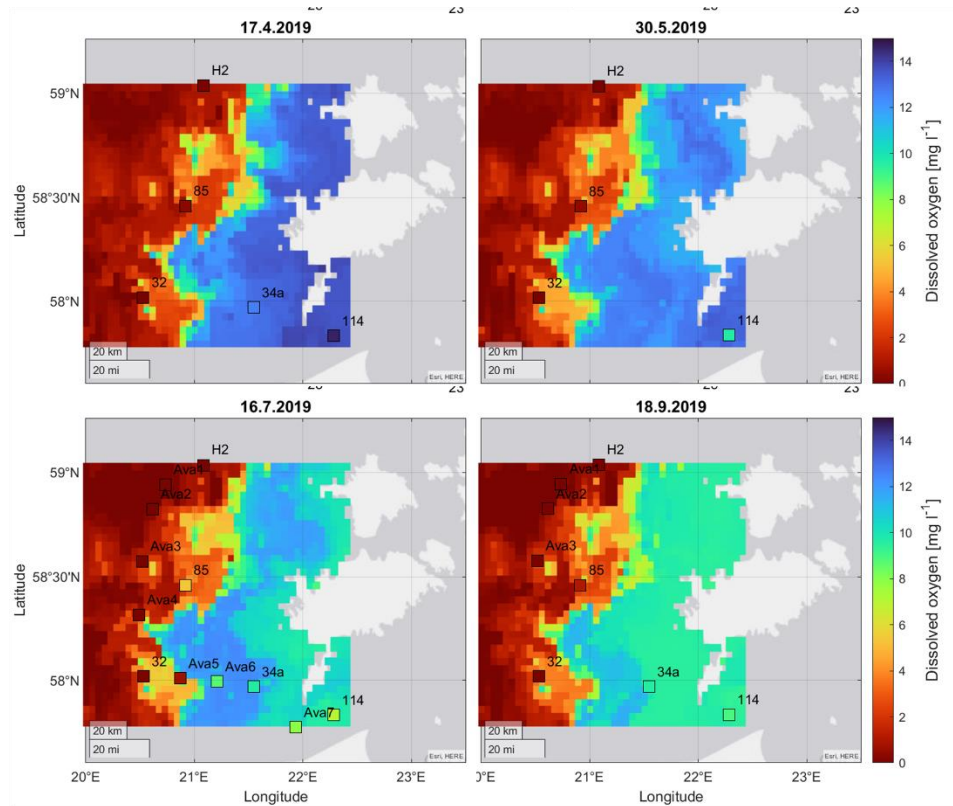
Joonis 3.5.1. Olulise laine kõrguse keskmise, maksimaalsete väärtuste jaotused ning jaotused, milledest suuremat olulist laine kõrgust esinemist vastavalt 1% ja 10% ajast. Statistika on tehtud 1993-2019 mudelarvutuste põhjal.

Hapnik

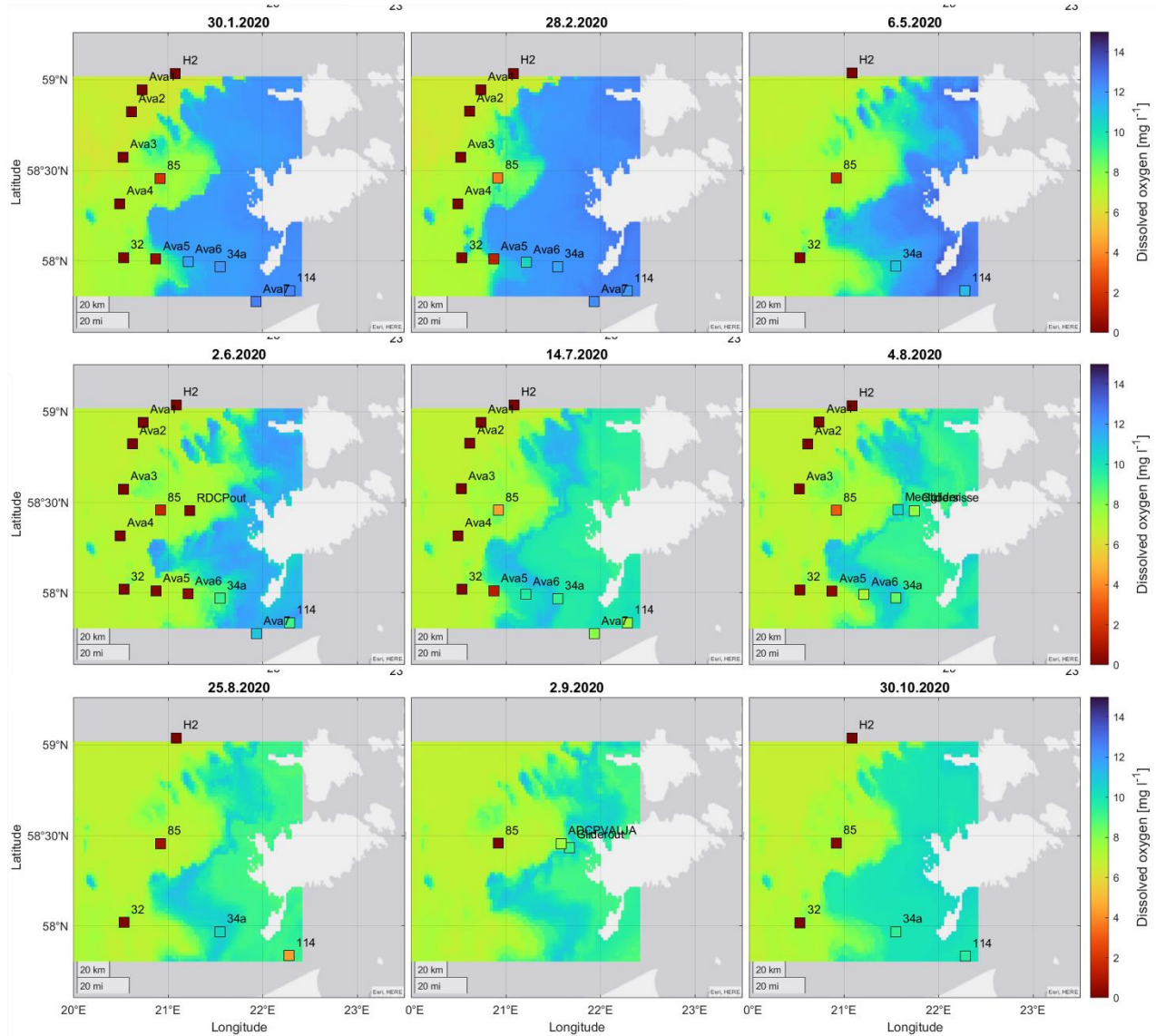
Mudeli ja seire andmete võrdluseks kasutasime lahustunud hapniku puhul CMEMS reanalüüsi (2019.a) ja prognoosi (2019 ja 2020.a.) ning seirejaamade (CTD profiilide) kõige sügavamaid väärtusi. Võrdlesime iga seirejaama sügavaima punkti hapnikuväärtusi mudeliandmetega samast päevast (+/- 1 päev) (joonised 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4). Põhjakihi seireandmete põhjal on hapnikutase jaamades H2, 85, 32 ja Ava1-5 enamasti alla hüpoksia piiri ($< 2,9 \text{ mg l}^{-1}$), erandiks on mõnedel juhtudel 85 (vt. joonis 3.5.5, paneel C ja joonis 3.5.6, paneelid B, E, F). Jaamades 34a, 114, Ava6 ja Ava7 seire käigus hüpoksilisi tingimusi ei tuvastatud. Prognoosimudeli andmed sarnanevad seireandmetega enamasti jaamades, kus ei esine hüpoksiat/anoksiat (joonis 3.5.2, 3.5.4). Sügavamates jaamades ei esine mudelprognoosi puhul $< 5,8 \text{ mg l}^{-1}$ väärtusi (joonis 3.5.5, 3.5.6). Mudeli prognoos hindas hapnikuandmeid seireandmetest keskmiselt $4,3 \text{ mg l}^{-1}$ (2019) ja $4,6 \text{ mg l}^{-1}$ (2020) võrra suuremaks (tabel 3.5.1). Kui jagada jaamad kahte gruppi, vastavalt hüpoksia esinemisele ja mitte-esinemisele, siis näeme, et mudelitulemuste keskmised väärtused (nii prognoos kui ka reanalüüs) hindavad seireandmetega võrreldes hapnikku $0,7\text{-}1,6 \text{ mg l}^{-1}$ suuremaks mitte-hüpoksilistes jaamades. Jaamades, kus esineb põhjakihis hüpoksia, hinnatakse prognoosi puhul hapnikuväärtusi keskmiselt $6,0$ ja $6,2 \text{ mg l}^{-1}$ suuremaks, vastavalt 2019. ja 2020. a-l. 2019.a reanalüüsi keskmine väärtus on seireandmete keskmisest $1,4 \text{ mg l}^{-1}$ suurem. Sügavamatel aladel on reanalüüsi hapnikuväärtused hüpoksia piiri lähedal, kohati ka alla nulli (vt joonis 3.5.5, paneel C ja D), sest mudelisse on kaasatud H_2S moodustumise protsess. Negatiivne hapniku väärtus näitab, kui palju hapniku oleks vaja vette lisada, et hapnikukontsentratsioon oleks null.



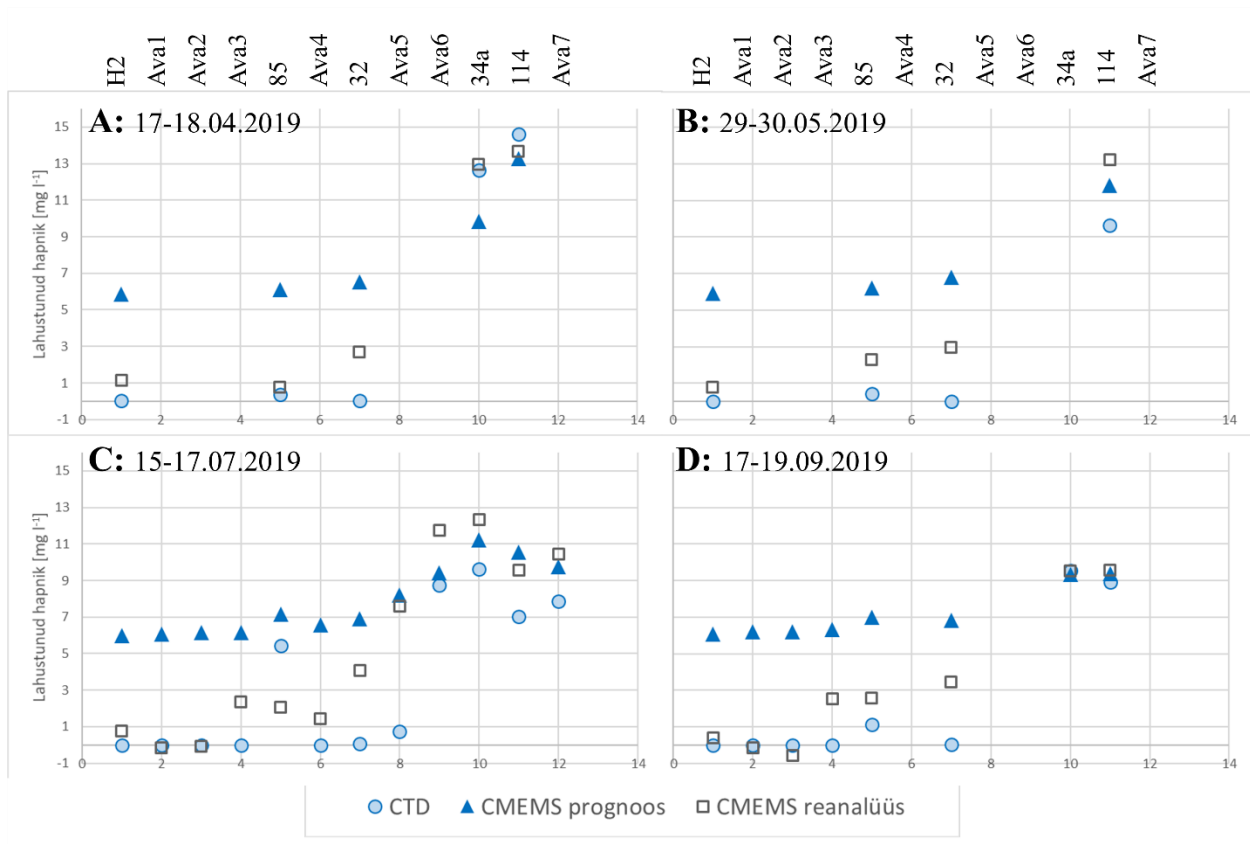
Joonis 3.5.2. 2019.a CTD (seirejaamad märgitud ruutudega, mille värv iseloomustab lahustunud hapniku kontsentratsiooni) ja CMEMS prognoosi süvakihi hapnikusisalduse andmed. Kuupäevad joonisel tähistavad mudelprodukti andmete kuupäevi.



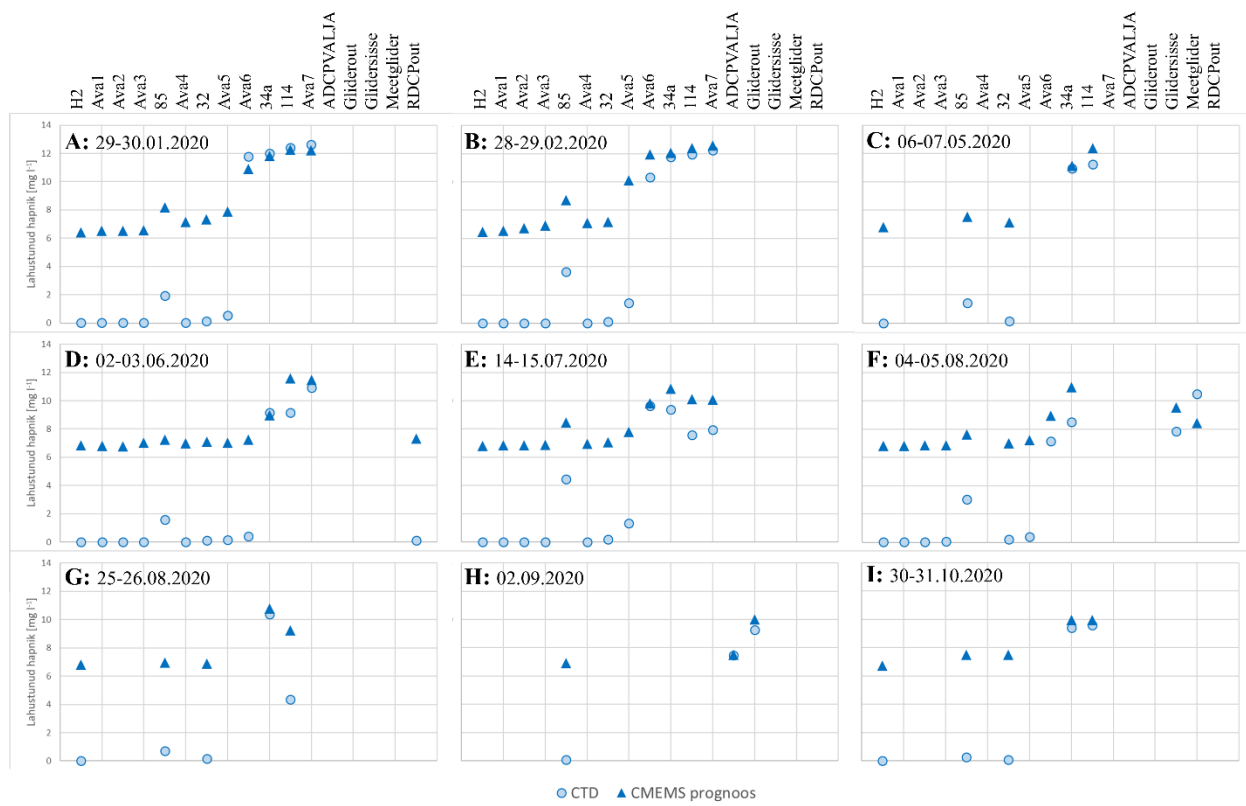
Joonis 3.5.3. 2019.a CTD (seirejaamad märgitud ruutudega, mille värv iseloomustab lahustunud hapniku kontsentratsiooni) ja CMEMS reanalüüsi süvakihi hapnikusalduse andmed. Kuupäevad joonisel tähistavad mudelprodukti andmete kuupäevi.



Joonis 3.5.4. 2020.a CTD (seirejaamad märgitud ruutudega, mille värv iseloomustab lahustunud hapniku kontsentratsiooni) ja CMEMS prognoosi süvakihi hapnikusisalduse andmed. Kuupäevad joonisel tähistavad mudelprodukti andmete kuupäevi.



Joonis 3.5.5. 2019.a CMEMS prognoosi ja reanalüüsi ning seire ('CTD') kõige sügavamad hapnikuväärtused jaamade kaupa (jaamade nimed joonise päises). Igal paneelil on toodud seire ajavahemik.



Joonis 3.5.6. 2020.a CMEMS mudelprognooosi ja seire (CTD) kõige sügavamad hapnikuväärtused jaamade kaupa (jaamade nimed joonise päises). Igal paneelil on toodud seire ajavahemik.

Tabel 3.5.1. Põhjakihi lahustunud hapniku keskmised väärtused (mg l^{-1}). Jaamades 34a, 114, Ava6, Ava7 hüpoksiat ei esinenud; jaamades H2, 85, 32, Ava1-Ava5 ja glideri jaamades prevalleeris hüpoksiline olukord.

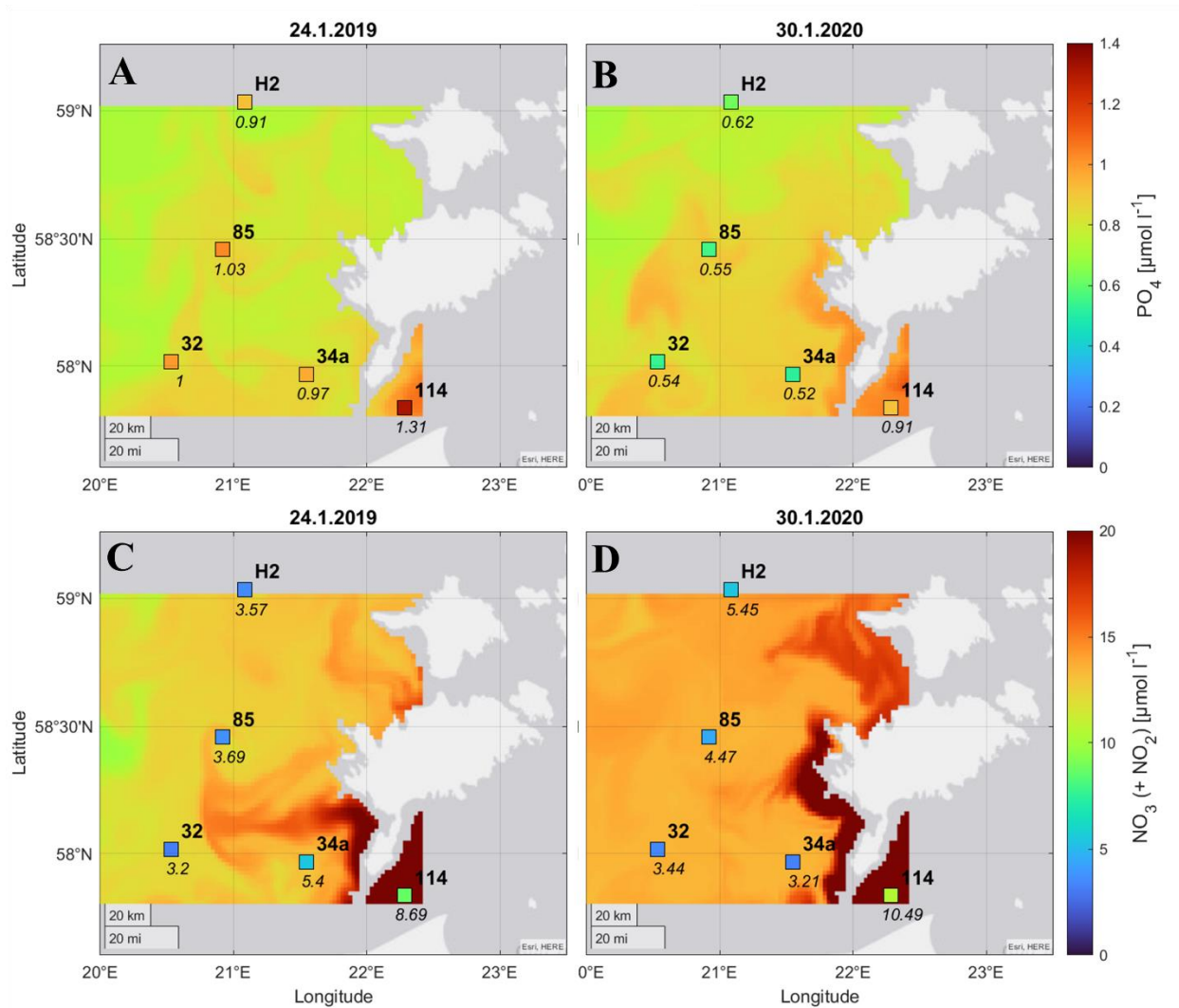
	Kõik jaamad	Jaamad: 34a, 114, Ava6, Ava7	Jaamad: H2, 85, 32, Ava1-Ava5, glideri jaamad
CTD 2019	3.3	9.8	0.4
CMEMS 2019 prognoos	7.7	10.5	6.4
CMEMS 2019 reanalüüs	4.8	11.4	1.8
CTD 2020	3.7	9.6	1.0
CMEMS 2020 prognoos	8.3	10.8	7.2

Eeltoodud tulemuste põhjal võib väita, et mudeli prognoosi andmeid keskkonnaseisundi hindamiseks kasutada ei saa kuna mudeliandmed ei kirjelda hüpoksilises ja/või anoksilises merepiirkonnas põhjalähedasi hapnikutingimusi isegi ligilähedaste väärtustega võrdluses seireandmetega. Juhul kui mudelisse on arvesse võetud reaalsed mõõtmised, siis on põhjakihi tulemused võrreldavad seireandmetega ning võiks kaaluda reanalüüsi andmete kasutamist keskkonnaseisundi hindamiseks. Selleks tuleks võrrelda reanalüüsi (ja ka prognoosi) produktide tulemusi erinevates veekogumites läbi terve aasta, et selgitada välja, kas ja millistel tingimustel oleks võimalik kasutada mudelitulemusi seisundihinnangute puhul. Välja tuleks selgitada ajalis-ruumilised jaotused mudeli määramatuse ja süstemaatiliste vigade kohta.

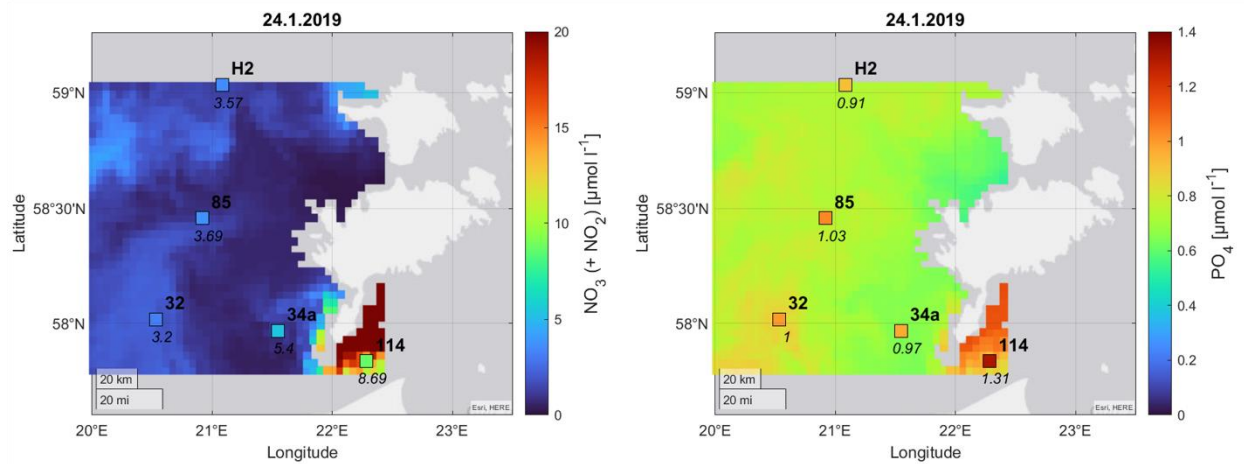
Toitained

Võrdlemaks CMEMS mudelproduktide tulemusi anorgaaniliste toitainete (fosfaatide ja nitraatide) puhul, kasutasime mudeli prognoosi ja reanalüüsi päeva keskmisi väärtusi kihist 1-10 m, mille kõrvale võtsime seirejaamade pinnakihi keskmised väärtused (joonis 3.5.7, 3.5.8). Riikliku seire andmete puhul kasutasime fosfaate ning nitrit- ja nitraatlämmastiku summat (al. 2004.a ei ole KESEs eraldi nitrit- ja nitraatlämmastikku, see on esitatud nimetatud parameetrite summana).

Seireandmeid iseloomustavad madalamad pinnakihi keskmised väärtused Läänemere avaosas võrreldes Irbe väina piirkonnaga (jaam 114). Mudel prognoosib rannikuäärsetele aladele kõrgeid nitraatide väärtusi ja ka avamere väärtused ületavad tunduvalt mõõdetud nitraatide sisaldusi (tabel 3.5.2). Fosfaate prognoositakse läbivalt 2019. a-l väiksemaks ja 2020.a-l suuremaks kui tegelikult mõõdetud väärtused (tabel 3.5.3). Mudeli reanalüüsi puhul on enamasti saadud väiksemad väärtused nii nitraatide kui fosfaatide puhul, erandiks on jaam 114.



Joonis 3.5.7. CMEMS mudelprognooosi pinnakihi keskmised väärtused fosfaatide (A, B) ja nitraatide (C, D) puhul. Pinnakihi keskmised seireandmed on toodud joonisel koos jaama nimega ja parameetri väärtusega (kaldkirjas). Paneeli C ja D puhul on seireandmetena kasutatud nitrit- ja nitraatlämmastiku summat ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$). Kuupäevad joonisel tähistavad mudelprodukti andmete kuupäevi.



Joonis 3.5.8 . CMEMS reanalüüsi pinnakihi keskmised väärtused nitraatide (vasakul) ja fosfaatide (paremal) puhul. Pinnakihi keskmised seireandmed on toodud joonisel koos jaama nimega ja parameetri väärtusega (kaldkirjas). Vasakpoolse paneeli puhul on seireandmetena kasutatud nitrit- ja nitraatlämmastiku summat ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$). Kuupäevad joonisel tähistavad mudelprodukti andmete kuupäevi.

Võrreldes üksikute jaamade seiretulemusi ja mudeli andmeid samas asukohas, ületasid prognoositud anorgaanilise lämmastiku väärtused mõõdetud väärtusi keskmiselt üle kolme korda. Anorgaanilise fosfori puhul hindas prognoosimudel väärtusi keskmiselt $\sim 30\%$ suuremaks seireandmetest. 2019. a puhul erinesid fosfaatide prognoositud väärtused seireandmetest keskmiselt 17% , reanalüüsi puhul 23% . Reanalüüsi käigus saadud nitraatide väärtused olid keskmiselt kolm korda väiksemad kui seiretulemused, erandiks jaam 114, kuhu mudel andis väärtuse, mis on poolteist korda suurem kui seireandmete põhjal leitud pinnakihi keskmine.

Võrdluses kasutatud nitrit- ja nitraatlämmastiku summa ja fosfaatide pinnakihi keskmised väärtused ületasid seire- ja mudelprognoosi andmete puhul hea keskkonnaseisundi piirväärtusi (HELCOM, 2018a, 2018b) nii jaamade kui ka veekogumi keskmise väärtuse kaupa (Tabel 3.5.2 ja 3.5.3). Reanalüüsi tulemused näitasid hea keskkonnaseisundi saavutamist nitraatide puhul, aga need väärtused ei ühti seireandmetega.

Tabel 3.5.2. Pinnakihi keskmised nitraatide (+ nitritite) väärtused seire ja mudeli andmete põhjal seirejaamades (seirejaamale lähimas mudelipunktis). Lühendid: HKS – hea keskkonnaseisundi piirväärtus avamereosale vastavalt HELCOM tuumindikaatorile; GOR – Liivi laht; EGB – Ida-Gotlandi bassein; NBP – Ava-Läänemere põhjaosa. Rohelisega (punasega) on märgitud HKS (mitte-)saavutamine.

Kuupäev	Jaam	Veekogum	HKS [$\mu\text{mol l}^{-1}$]	Seire (NO_2+NO_3 [$\mu\text{mol l}^{-1}$])	Mudeli prognoos (NO_3 [$\mu\text{mol l}^{-1}$])	Mudeli reanalüüs (NO_3 [$\mu\text{mol l}^{-1}$])
24.01.2019	114	GOR	5.20	8.69	25.88	13.40
24.01.2019	32	EGB	2.60	3.20	12.18	2.23
24.01.2019	34a	EGB	2.60	5.40	13.15	1.18
24.01.2019	85	NBP	2.90	3.69	12.45	1.19
24.01.2019	H2	NBP	2.90	3.57	12.69	1.37
30.01.2020	114	GOR	5.20	10.49	25.88	n/a
30.01.2020	32	EGB	2.60	3.44	13.49	n/a
30.01.2020	34a	EGB	2.60	3.21	13.48	n/a
30.01.2020	85	NBP	2.90	4.47	13.63	n/a
30.01.2020	H2	NBP	2.90	5.45	14.01	n/a

Tabel 3.5.3. Pinnakihi keskmised fosfaatide väärtused seire ja mudeli andmete põhjal seirejaamades (seirejaamale lähimas mudelipunktis). Lühendid: HKS – hea keskkonnaseisundi piirväärtus avamereosale vastavalt HELCOM tuumindikaatorile; GOR – Liivi laht; EGB – Ida-Gotlandi bassein; NBP – Ava-Läänemere põhjaosa. Punasega on märgitud HKS mittesaavutamine.

Kuupäev	Jaam	Veekogum	HKS [$\mu\text{mol l}^{-1}$]	Seire (PO_4 [$\mu\text{mol l}^{-1}$])	Mudeli prognoos (PO_4 [$\mu\text{mol l}^{-1}$])	Mudeli reanalüüs (PO_4 [$\mu\text{mol l}^{-1}$])
24.01.2019	114	GOR	0.41	1.31	1.05	0.91
24.01.2019	32	EGB	0.29	1.00	0.81	0.87
24.01.2019	34a	EGB	0.29	0.97	0.86	0.65
24.01.2019	85	NBP	0.25	1.03	0.86	0.75
24.01.2019	H2	NBP	0.25	0.91	0.73	0.75
30.01.2020	114	GOR	0.41	0.91	1.04	n/a
30.01.2020	32	EGB	0.29	0.54	0.86	n/a
30.01.2020	34a	EGB	0.29	0.52	0.89	n/a
30.01.2020	85	NBP	0.25	0.55	0.89	n/a
30.01.2020	H2	NBP	0.25	0.62	0.76	n/a

Antud analüüsi põhjal võib kokku võtta, et mudel üle- või alahindab süstemaatiliselt avamere ja avamere otsese mõjuga piirkondades anorgaaniliste toitainete sisaldusi pinnakihis. Jaam 114 eristub teistest mudeli produktidest kuna asub Liivi lahes ja sealseid tingimusi ei suuda mudelid hästi kirjeldada.

Kaalumaks mudeli produktide kasutamist seisundihinnangute raames, oleks vajalik mudeli võimekuse tõstmine ja edasised võrdlusanalüüsid.

Hapniku puudujääk

Seireandmete põhjal leidsime hapnikupuudujäägi Põhja-Läänemere avaosa basseinile. HELCOMi tuumindikaatori 'Oxygen debt' metoodikast lähtudes lisasime hapnikuprofiilidele H₂S andmed (KESE), kus võimalik (HELCOM, 2018d). Topograafia andmetena kasutasime IOW sügavusandmeid (Seifert et al., 2001) HELCOMi basseini 'Northern Baltic Proper' piirides (HELCOM subbasins with coastal and offshore division 2018) (HELCOM, n.d.). Maksimaalne sügavus valitud alal IOW andmete põhjal oli 187,5 m.

Aasta keskmise hapnikupuudujäägi leidmiseks valisime profiilid, mis olid sügavamal kui 40 m ja leidsime nende põhjal keskmise hapnikupuudujäägi profiili. Silutud (2,5m sammuga) soolsuse profiilide põhjal leidsime halokliini (soolsuse gradient halokliini sees peab olema $\geq 0,07 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$) ja selle aluse punkti igale profiilile. Keskmise hapnikupuudujäägi leidmiseks võtsime keskmise halokliini aluse punkti ja kõige sügavama mõõtmise vahele jäävad ruumalalised hapnikupuudujäägi väärtused (keskmisest profiilist) ja jagasime nende summa kogu halokliini aluse ruumalaga läbi.

2019. a perioodil 17.04-19.09 oli kasutada 36 profiili (neist 8 'Ava' jaamades mõõdetud), millest 27 (sh 'Ava' jaamades 8) puhul leiti halokliin. Kasutades andmeid kõikidest jaamadest aastal 2019, saime halokliini aluse punkti keskmiseks sügavuseks 79,0 m ja keskmiseks halokliini aluseks hapnikupuudujäägiks 11,35 mg l⁻¹, jättes välja 'Ava' jaamad, olid tulemused, vastavalt, 79,5 m ja 11,39 mg l⁻¹.

2020. a perioodil 29.01-31.10 oli kasutada 83 profiili (neist 29 'Ava' jaamades), millest 73-le (sh 'Ava' jaamades 27) leiti halokliin. Kasutades andmeid kõikidest jaamadest aastal 2020, saime halokliini aluse punkti keskmiseks sügavuseks 81,1 m ja keskmiseks halokliini aluseks hapnikupuudujäägiks 11,15 mg l⁻¹, jättes välja Ava jaamad, olid tulemused, vastavalt, 8,6 m ja 11,26 mg l⁻¹.

Antud metoodikat kasutades oleks hapniku puudujäägi hinnangud koos ja ilma lisajaamade(ga)ta kogu merealal sarnased. Oluline on märkida, et meetodi kohaselt konstrueeritakse kõigepealt keskmine profiil, mis seejärel ekstrapoleeritakse arvestades piirkonna hüpsograafilist kõverat alale laiali. Lisajaamade peamine väärtus seisneb ruumiliste jaotuste reaalsemas kujutamises. Näiteks on võimalik tunduvalt adekvaatsemalt hinnata ala lõuna-põhjasuunalist hüpoksilise kihi kallet.

3.6. Veesamba elupaikade kirjeldamise parendamise võimalused Eesti merealadel

Eelnevalt kirjeldasime platvormide ja produktide poolt tekitatud andmestikku. Järgnevalt diskuteerime, mis on erinevate platvormide tugevused ja nõrkused, samuti kuidas on võimalik neid omavahel integreerida.

Vastavalt merestrateegia raamdirektiivi lisale III (2008/56/EÜ) tuleb veesamba elupaikade tingimusi kirjeldada järgmiste parameetritega, sh. nende näitajate muutumist ruumis ja ajas: temperatuur ja jääkate; hüdroloogia (lained ja hoovused; hapnik; apvellingud, segunemine, viibeag, magevee juurdevool, mereveetase); batümeetria; hägusus, läbipaistvus, müra; merepõhja substraat ja morfoloogia; soolsus, toitained (N, P), orgaaniline süsinik, lahustatud gaasid (pCO_2 , O_2) ja pH.

Jääkate vaatlused tehakse tänapäeval suures osas satelliitseire abil. Mereveetaset suudetakse numbriliste vaatlusi assimileerivate mudelitega juba edukalt simuleerida, Eestis on juurutatud jätkusuutlik riikliku finantseerimisega veetaseme vaatlusvõrk. Projektila merepõhja batümeetria on vastavalt Transpordiameti hüdrograafia infosüsteemile viimastel aastatel avamerepoolses osas põhjalikult mõõdistatud. Süsinikuringega seotud parameetritega ja merepõhja substraadiga tegelevad antud projekti teised (alam)töopakettid. Käesolevas töös analüüsime andmeid temperatuuri, soolsuse, lainetuse, hoovuse, hapniku ja toitainete kohta. Nimetatud andmed võimaldavad hinnata ka segunemist, viibeaga ning magevee juurdevoolu ja selle mõju merealale. Vee läbipaistvust ja hägusust ei ole siin töös käsitletud, kuid põhimõtteliselt on seda võimalik teha samade platvormidega ja analoogselt analüüsitud parameetritega.

Konventsionaalsel mereseirel on endiselt oluline roll vaatlustes. Uurimislava pealt on võimalik teha kõrgtäpseid mõõtmisi, millega saab kalibreerida kõiki autonoomseid seadmeid. Samuti on uurimislavade paljude parameetrite puhul ainuke võimalik mõõtmisplatvorm. Uurimislavaga tehtavate reiside sagedus ei ole eraldiseisvalt piisav tabamaks meres toimuvate protsesside ajalist muutlikkust. Kui jätta välja väiksemat mastaapi protsessid nagu basseini omavõnkumised, siis meres olulisi suuremastaapseid muutusi (nt. suured vertikaalsete kliinide kõikumised sh. apvellingud, daunvellingud; vertikaalset segunemist põhjustavad sündmused; prevaleerivate tsirkulatsioonimustrite muutused ja sellega seotud horisontaalsete gradientide nihkumised) toimuvad mõne päeva kuni paari nädala jooksul (e.g. Liblik & Lips, 2012). Heaks näiteks käesolevas töös on ühe punktmõõtjaga fikseeritud pooleaastane aegrida 67 m sügavuselt rannikunõlval (ptk. 3.1.4). Analüüs näitas, et avamere seire sattus alati piirkonda, kui antud asukohas valitsesid head hapnikutingimused. Reiside vahelisel ajal esinesid lühiajaliselt tunduvalt madalamad hapniku sisalduse väärtused, sealhulgas kolm sündmust, kui hapnikutase langes alla hüpoksia piiri. Käesolevas töös ei analüüsitud, kas tegemist oli juhusega, et mereseire reiside ajal valitsesid alati hapnikurikkad tingimused või võib siin esineda süstemaatilisus, nt. seotud sellega, et meresõiduohutuse seisukohalt ei ole teatud ilmastikutingimustega võimalik seiret teha. Meres toimuvad olulised protsessid tunduvalt väiksemas ruumimastaabis kui Läänemere avaosa seire jaamade võrk.

Klassikalise avamere seire täiendamine sellisel määral, et olulised protsessid oleksid ajaliselt ja ruumiliselt mõõtmistega kaetud, on majanduslikult ja ka ajakulu silmas pidades ebareaalne. Seega tuleks otsida alternatiivseid lahendusi.

Kõige lihtsam ja ka odavam on täiustada vaatluseid läbi olemasoleva seirereiside programmi täiendamise. Salmebox läbivoolusüsteem annab võrreldes tavaseirega oluliselt rohkem infot pinnakihist. Kõrgsageduslikud mõõtmised võimaldavad eraldada pinnakihi veemasse ning seeläbi panna üksikutes seirepunktides tehtavad mõõtmised palju selgemini ruumilise muutlikkuse konteksti. Käesolevas töös oli pilootalaks avameri, kuid näitasime Salmeboxiga tehtud mõõtmisridu ka Irbe väinas. Irbe väina piirkonnas tehtud vaatlused näitasid tugevaid gradiente, mis olid tingitud basseinide vahelistest veomaduste erinevusest aga ka süvaveekergetest. Salmeboxi mõõtmiste suurim lisandväärtus seisnebki gradientide täpses tuvastamises. Arvestades avamereseire praegust jaamade võrku annab Salmebox olulist infot juurde Soome lahes, kus laev liigub avamere-rannatsooni vahel ning registreeriks süvaveekergete mõju. Samuti aitaks Salmebox paremini tuvastada Neeva, Narva ja teistest jõgedest pärit magedama ja toitainerikkama vee ja soolasema avamerelt pärit vee vahelisi gradiente. Väga oluliselt täiendaks Salmebox seiret, peale juba näidatud Irbe väina piirkonna ka Väinamere väinade süsteemis: Suur väin – Väinameri – Hari kurk. See piirkond on madal ja reeglina läbi segunenud, kuid hüdrodünaamiliselt väga aktiivne, kus Liivi lahe, Läänemere avaosa, Väinamere ja Kasari jõest pärit veemassid vastavalt tuulele ja veetaseme gradientidele aktiivselt liiguvad (Astok et al., 1999; Taavi Liblik & Lips, 2011; Otsmann et al., 2001). Lisaks toimub aktiivne interaktsioon settega, küllalt väike lainetus tekitab setete resuspensiooni ja muudab oluliselt vee omadusi. Seega on läbivoolusüsteem, mis liigub läbi väinade, selle mereala kohta ruumilise pildi saamiseks ilmselt parim mõõtmisplatvorm. Läänemere avaosas on Salmeboxi lisandväärtus väiksem, kuid siiski arvestatav. Seal aitab platvorm tuvastada keeriste ja filamentide poolt tekitatud gradiente. Salmeboxiga on võimalik peale temperatuuri ja juhtivuse (soolsuse määramiseks) mõõta ka hapnikku, hägusust, ja klorofüll a fluorestsentsi. Platvormi eeliseks on see, et andureid saab jooksvalt kalibreerida klassikaliste mõõtmistega. Salmeboxi lisamise maksumuseks avamereseire programmi võib hinnata ligikaudu spetsialisti ühe kuu palgafondi pluss ca 3000 eurot kalibreerimiseks ja hoolduseks. Seega on lisakulu ca 7000 eurot aastas. Läbivoolusüsteemi on võimalik täiendada toitainete analüsaatoriga, mikroprügikogujaga, süsiniku ja kasvuhoonegaaside parameetreid mõõtvate anduritega jne. Läbivoolusüsteemide kõrglahutusega andmestik täiendab ja võimaldab kalibreerida satelliidiprodukte. Nimetatud platvormide omavaheline integreerimine võimaldab pinnakihi elupaiku kirjeldada oluliselt täpsemini (e.g. García-García et al., 2019).

Teine võimalus olemasolevaid laeva pealt tehtavaid vaatlusi täiendada on teha lisajaamasid olemasolevate mõõtmisjaamade vahel. Käesolevas töös pakuti lisajaamad välja eelkõige pidades silmas kahte asjaolu. Esiteks, et jaamad representeeriks mereala sügavamaid piirkondi, mida praegu ei seirata, ja teiseks, et jaamad ei pikendaks oluliselt avamereseire reisi. Viimast silmas pidades lähtuti omakorda liuguri transekti ja fikseeritud mõõtmiste asukoha valikul, mis korraldati rannikutsooni ja avamerevahelises piirkonnas, mida ei kata avamere ega ka rannikumere seire. Selle piirkonna külastamine pikendaks avamereseire reisi oluliselt. Võib öelda, et kõik jaamad andsid olulist lisainfot veesamba elupaikade kohta. Sügavad lisajaamad (Ava1-4) annavad infot süvakihi lokaalsete karakteristikute kohta. Ainukesed piirkonna piisavalt sügavad avamereseire jaamad, kus permanentse halokliini alla jääv süvakiht

on mõõtmistega haaratud, on jaamad H2 ja 32. Nende vahele jääv jaam 85 sügavus on sarnane halokliini sügavusega, mistõttu võib sealsel kõrgendikul esineda vertikaalse segunemisega tekitatud halokliini lokaalseid häiritusi, mis ei esinda antud piirkonda ümbritsevat mereala. Jaamast 85 idas, läänes, loodes ja edelas asuv mereala on sügavam. Jaamad Ava2 ja Ava4 aitaksid infoga täita jaam 85 ning vastavalt jaam H2 ja jaam 32 vahele jäävat mõõdistamata sügavat mereala. Jaamad Ava5-6 täidavad olulise tühimiku jaamade 32 ja 34a vahelisel rannikunõlval. Nende jaamade (Ava5-6) asemele võib lisada ühe jaama (edaspidi Ava5_6), mis annaks infot nõlval toimuva kohta. Täiendav jaam Ava7 annab infot dünaamilise Irbe väina kohta, mis on oluline kitsus Liivi lahe ja Läänemere avaosa vaheliste voogude seisukohalt. Täiendavad jaamad Ava2, Ava4, Ava5_6 ja Ava_7 tähendavad kokku ligikaudu 6 tundi lisatööd. Arvestades laevapäeva maksumust ja teadlaste täiendavat tööd, on nende jaamade lisamise hind seireprogrammi ca 8000 eurot aastas. Avamere ja rannikumere seirest jääb sellegipoolest katmata suur mereala Hiiumaa põhjaosast kuni jaama 32 – Irbe transektini.

Ülejäänud Eesti mereala osas on täiendavate jaamade asukohta valikuks vaja teha eraldi analüüs. Käesolev töö näitab, et avamere jaamade vahelised distantsid on liiga pikad. Teiseks, avamere ja rannikumere seire jaamade võrgu vahel on suured katmata merealad, kuhu meie liuguri uuringu põhjal olemasoleva seirevõrgu andmetele toetudes adekvaatselt infot interpoleerida ei ole võimalik. Sarnaseid alasid esineb veel nt. Liivi lahes (nt. mõõtmistega on katmata Suur katel), Hiiumaast põhja jääval merealal ja Soome lahe lääneosas (jaamade 19 ja 23 vaheline mereala Naissaarest Osmussaareni).

Ava- ja rannikumere seirega katmata merealal, täpsemalt Vilsandist läänes, tegime testmõõtmised liuguri ja fikseeritud mõõtjatega. Liuguri autonoomsus meie merealal on ligikaudu üks kuu. Eelistatult liugur veeskatakse ja võetakse merest laevalt, kuid põhimõtteliselt on võimalik seda teha ka kaatrit. Näiteks sügisel 2019 veeskati liugur kaatrit Vilsandi lähedal ning see korjati kuu aega hiljem merest välja Tagalahest. Liuguriga tehtud mõõtmised näitasid, et jaam 85 ei kirjelda kuigi hästi idasse jäävat mereala. Esiteks, jääb jaam 85 ja Saaremaa vahele sügavam piirkond, mida madalam jaam 85 tihti ei kirjelda, sest halokliinialune vesi on jaama asukohast sügavamal. Teiseks, ei näita jaam 85 rannikuäärseid protsesse, kliinide kõikumist, sh. süvaveekerkeid ja hapnikuvaese vee kiilu mööda rannikunõlva üles tungimist. Samuti esineb rannikule lähemal kiirem sügisene jahtumine ja kevadine vee soojenemine võrreldes jaamaga 85. Viimast saab küll tuvastada satelliitseire abil, kuid selle nähtuse mõju tuvastamiseks ökosüsteemile ei ole satelliitseire piisav. Lisaks tuvastasime, et jaama 85 ja testitud transekti vahel esinesid ülemise kihi soolsuse erinevused, mis viitavad veemasside erinevale päritolule ja ilmselt ka omadustele (nt. toitained). Liuguri suurimaks eeliseks on kõrge ruumilise lahutusega kogutav andmestik transektilt, mida saab autonoomselt korrata. Korduvmõõdistus risti rannikut transektil, nagu käesolevas töös läbi viidi, on efektiivsemad ja levinumad viise liuguri lülitamiseks mereseiresse (T. Liblik et al., 2016). Sel viisil on mitmetes piirkondades (nt. Hispaania lõunarannikul, Kalifornias, Austraalias, Šotimaal ja mujal) juba üle kümne aasta mereseiret tehtud. Sellise aastaringse pidevseire investeeringute maksumuseks on ca 300 000 eurot, mis on kahe liuguri ligikaudne maksumus. Käitamise kuludesse tuleks arvestada spetsialisti palgakulu 0,25 koormusega (15 000 eurot), sidekulud (36 000 eurot), kulumaterjalid, sh patareid (36 000 eurot) ja transpordikulud kasutades nii laeva kui kaatrit (9000 eurot), kokku ca 100 000 eurot aastas. Kui piirduda aga kahe kuuga, nt. kevadel õitsengu tekkimise ajal ja suve lõpus/sügisel hapnikupuuduse

sesoonse maksimumi ajal, siis oleks investeeringu maksumuseks 150 000 eurot ja aastaseks kuluks ca 15 000 eurot.

Kliinide üles-alla liikumise, hapnikuvaese vee nõlvale tungimise ja tagasi vajumise tuvastas küllalt edukalt ära ka halokliini sügavusele (67 m) paigaldatud punktmõõtja. Punktmõõtja eeliseks on tema suhteline odavus (ca 20 000 eurot) ja hea töökindlus. Punktmõõtja ei paku ruumilist pilti, kuid annab kõrgsagedusega pika aegrea, mis võimaldab teiste platvormide (uurimislav, liugur) poolt loodavat ruumilist hetkevaadet siduda ajalise muutlikkusega. Ülal kirjeldatud analüüs näitas, et punktmõõtjaga saadud aegrida muutis oluliselt seirereisidega saadud pilti elupaiga tingimuste kohta. Seire näitas sisuliselt küllastunud hapnikutingimusi läbi kuue kuu, aga punktmõõtja registreeris kolm perioodi kui piirkonnas oli hüpoksia. Maailmameres on avamerre/ookeanisse paigaldatud fikseeritud mõõtjad olulised pikaajaliste aegride allikad (vt. oceansites.org). Fikseeritud platvorm võimaldab piirkonna kohta anda adekvaatset ja täpset infot alates paarist tunnist kuni kliimatiliste ajamastaapideni välja, kui aegread on piisavalt pikad. Eesti avamerealadelt kogutakse praegu pidevat infot veesambast ainult Keri avamerejaamas, kus on profileerija. Ülejäänud Eesti merealadel jätkusuutlikud avamere pidevmõõtmised puuduvad. Eriti kriitiline on seis just süvakihiga, sest ülemises kihis on lisaks avamere- ja rannikumere seirele, ja Keri jaamale olemas Ferrybox (<https://www.ferrybox.org/>) liinid Tallinn-Helsingi ja Tallinn-Stockholmi liinil, KAUR rannikujaamade võrk ja satelliitseire. Võttes arvesse käesoleva töö tulemusi, varasemad teaduseksperimentid Eesti merealadel ja kogemused maailmas, siis on Eesti avamerealade süvakihtidest adekvaatse pildi saamiseks vajalik alustada mõõtmistega: 1) basseini süvikutes (Narva lahes, Liivi lahes, Läänemere avaosa põhjaosas (jaam H2 läheduses) ja lõunaosas (jaam 32 läheduses); 2) rannikunõlval (käesoleva projekti piirkonnas Läänemere avaosas); 3) väinades (Irbe väin, Väinamere keskosa seirejaam V15). Selline võrgustik parendaks oluliselt arusaamist Eesti merealade seisundi ajalisest muutlikkusest. TTÜ merefüüsika osakond alustas eksperimentaalsete mõõtmistega Ruhnu süvikus ja jaam H2 läheduses jaanuari lõpus 2021. Taotlus kahe poijaama soetamiseks ja paigaldamiseks Irbe väina ja Narva lahte esitati KIKile 2021. a vóorus. Seitsme poijaama käitamise aastane kulu oleks ca 20 000 eurot. Mõõtmiste käivitamise investeering oleks ligikaudu 210 000 eurot, mis sisaldab seitset püsijaama komplekti ja kahte varu. Sellest ligikaudu pool on olemas või taotlemisel.

Püsivad hoovusmõõtmised puuduvad Eesti avamerealadel täiesti. Hoovused annavad olulist informatsiooni advektiooni, sh. ainete transpordi kohta. Samuti võimaldab hoovuste info hinnata arendustööde mõjusid ja reostuslevi. Hoovuseid suudetakse edukalt modelleerida ühekihilise voolamise puhul, eriti kitsastes väinades. Eesti merealadel on simuleeritud hoovused näidanud head kokkulangevust mõõtmistega Väinamere väinades (Otsmann et al., 2001). Mitmekihilise voolamisrežiimi puhul ei ole simulatsioonid veel piisavalt usaldusväärsed, seda kinnitas ka käesolev töö. Seega on soovitatav Eesti merealadel alustada ka hoovusmõõtmistega. Kui hoovusmõõtmised ühildatakse eelmises lõigus toodud punktmõõtmistega, siis on käitamise lisakulud tagasihoidlikud. Lisaks võiks alustada mõõtmistega Keri avamere jaamas.

Töös testiti Copernicuse lainesimulatsiooni produkti ja kokkuvõttes võib öelda, et see töötab vähemalt avamere tingimustes väga hästi ning elupaikade kirjeldamiseks nii projektialal, kui Eesti merealadel

üldiselt lainetuse info hankimiseks sobib. Sarnast väga head simulatsiooni kokkulangevust mõõtmistega on näidatud ka teistes Läänemere osades (e.g. Bjorkqvist et al., 2020). Seega ilmselt ei ole mõistlik lainetuse vaatlusvõrgu või simuleerimise arendamiseks edasisi suuremaid investeeringuid teha. Erandiks on kõrgemat ruumilist lahutust vajavad ülesanded (väiksemad lahed, vesiehitised, tuulepargid jms), kus on vaja modelleerida peenemal võrgul ja mudelitulemusi ka mõõtmistega valideerida.

Copernicuse veesamba füüsika ja biogeokeemia reanalüüsi produkti on assimileeritud mõõtmistulemused. Temperatuuri, soolsuse ja hapniku sisalduse pikaajalised käigud langevad kokku tendentsidega mõõtmistes. Süstemaatiliste koht-spetsiifiliste vigade leidmiseks on mudelitulemusi vaja põhjalikult vastavas piirkonnas analüüsida. Antud töö põhijäreldus on, et nende kolme parameetri osas on mudelitulemustel hea potentsiaal, kuid kasutaja peab mudelandmete usaldusväärseks kasutamiseks neid vastavas piirkonnas verifitseerima, andma hinnangu määramatuse kohta, leidma süstemaatilised vead. Ülejäänud biogeokeemiliste näitajate (toitained, klorofüll a) osas ei ole reanalüüsi andmed piisavalt usaldusväärsed, et neid seisundihinnangutes kasutada. Operatiivse mudeli andmetest võib varasemate tööde (Küüsmäe, 2019) põhjal kaaluda temperatuuri ja soolsuse kasutamist, kuid kasutaja peab nende andmete usaldusväärseks rakendamiseks neid vastavas piirkonnas verifitseerima, andma hinnangu määramatuse kohta, leidma süstemaatilised vead. Biogeokeemiliste näitajate osas on operatiivse mudeli tulemused reaalsusest liiga kauged, et neid saaks elupaikade kirjeldamisel kasutada.

Lisaks käesolevas töös testitud platvormidele võib kaaluda mereseire täiendamist fikseeritud profileerijatega (Lips et al., 2016) ja profileerivate ujukitega (Haavisto et al., 2018). Jätkata tuleks olemasolevate ferrybox liinidega Tallinn-Helsingi ja Tallinn-Stockholm.

3.7. Kokkuvõtte ja soovitusid seireprogrammi täiendamiseks

Klassikalised, uurimislaevalt tehtud vaatlused on pikaajaliselt hästi sisse töötatud seiremetoodika, mis on läbi HELCOMi riikide vahelise koostöö regionaalselt harmoniseeritud ja aktsepteeritud. Viimastel aastakümnetel on mereuuringutes oluliselt kasvanud autonoomsete platvormide ja kaugseire roll. Suhteliselt hästi on mõõtmistega kaetud Soome lahe keskosa. Risti lahte domineerivad protsessid on pinnakihi edukalt jälgitavad Tallinn-Helsingi ferrybox süsteemiga, piki lahte gradiendid Tallinn-Stockholmi ferryboxiga ning veesamba vertikaalse struktuuri aegread Keri jaama profileerija abil. Avamere seire uurimislaevalt täiendab autonoomseid vaatluseid 3D ruumiliste hetkevaadetega kuus korda aastas. Võib öelda, et Soome lahe keskosas võimaldab olemasolev seire küllalt hästi elupaiga ajalis-ruumilise muutlikkuse ära kirjeldada. Ülejäänud Eesti merealadel, sh. käesoleva projekti pilootalal, ei ole seis nii hea. Selle parendamise ettepanekute taga olev analüüs ja aastane prognoositav kulu on toodud eelmises peatükis. Soovitame kaaluda järgmisi uuendusi seireprogrammis:

- Laiendada jaamade võrku nii, et see oluliselt ei pikendaks avamere seire kestust. Pilootalal lisada programmi seirejaamad Ava2, Ava4, Ava5_6 (Ava5 ja Ava6 vahel) ja Ava7. Ülejäänud Eesti merealal tuleks täiendavate jaamade lisamise ettepanekuks teha eraldi analüüs.
- Lülitada seireprogrammi uurimisläve läbivoolusüsteemiga andmete kogumine.
- Kaaluda Saaremaast läänes asuva liuguri püsitranskti lisamist seireprogrammi. Käivitamine vajab investeeringut mahus 150 000 – 300 000 eurot.
- Alustada veesamba parameetrite pidevmõõtmisi seitsmes asukohas: basseinide süvikutes (Narva lahes; Liivi lahes; Läänemere avaosa põhjabasseinis (jaam H2 läheduses) ja lõunaosas (jaam 32 läheduses); rannikunõlval (käesoleva projekti piirkonnas, Läänemere avaosas); väinades (Irbe väin, Väinamere keskosa seirejaam V15). Käivitamine vajab investeeringut mahus 210 000 eurot, millest pool on olemas või taotlemisel.
- Alustada Eesti merealadel pidevate hoovusmõõtmistega, soovituslikult samades asukohtades, mis toodud eelmises punktis ja Keri avamere jaamas.

Copernicuse lainesimulatsiooni produkti töötab ja sobib hästi avamere elupaikade kirjeldamiseks. Seega ei ole lainetuse vaatlusvõrgu või simuleerimise arendamiseks avamerel edaspidi suuremaid investeeringuid vaja teha.

Copernicuse reanalüüsi produktil on temperatuuri, soolsuse ja hapniku osas hea potentsiaal, kuid kasutaja peab nende andmete usaldusväärseks rakendamiseks neid vastavas piirkonnas verifitseerima, andma hinnangu määramatuse kohta, leidma süstemaatilised vead. Operatiivse prognoosimudeli täpsus on tunduvalt madalam. Temperatuuri ja soolsuse puhul võib andmetest peale valideerimis-analüüsi tegemist mingit kasu ikkagi olla. Biogeokeemiliste näitajate osas on operatiivse mudeli tulemused praegu reaalsusest liiga kauged, et neid saaks elupaikade kirjeldamisel kasutada.

Lisaks käesolevas töös testitud platvormidele võib kaaluda mereseire täiendamist fikseeritud profileerijatega ja profileerivate ujukitega. Jätkata tuleks olemasolevate ferrybox-liinidega Tallinn-Helsingi ja Tallinn-Stockholm.

Kasutatud kirjandus

- Alari, V., & Raudsepp, U. (2010). Depth induced breaking of wind generated surface gravity waves in estonian coastal waters. *Boreal Environment Research*, 15, 295–300.
- Astok, V., Otsmann, M., & Suursaar, Ü. (1999). Water exchange as the main physical process in semi-enclosed marine systems: the Gulf of Riga case. *Hydrobiologia*, 393.
- Bittig, H. C., & Körtzinger, A. (2017). Technical note: Update on response times, in-air measurements, and in situ drift for oxygen optodes on profiling platforms. *Ocean Science*, 13, 1–11.
- Bjorkqvist, J. V., Rikka, S., Alari, V., Männik, A., Tuomi, L., & Pettersson, H. (2020). Wave height return periods from combined measurement-model data: A Baltic Sea case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(12), 3593–3609. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-3593-2020>
- Burchard, H., & Bolding, K. (2002). *GETM – a general estuarine transport model. Scientific Documentation. Technical report EUR 20253 en. In: Tech. Rep. European Commission.*
- CMEMS. (n.d.-a). *Baltic Sea biogeochemical model. Product: BALTICSEA_ANALYSISFORECAST_BGC_003_007.*
- CMEMS. (n.d.-b). *Baltic Sea Biogeochemical Reanalysis. Product: BALTICSEA_REANALYSIS_BIO_003_012.*
- CMEMS. (n.d.-c). *Baltic Sea physical model. Product: BALTICSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_003_006.*
- CMEMS. (n.d.-d). *Baltic Sea Physical Reanalysis. Product: BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011.*
- Cuadros-Rodríguez, L., Bagur-González, M., Sánchez-Viñas, M., González-Casado, A., & Gómez-Sáez, A. (2007). Principles of analytical calibration/quantification for the separation sciences. *Journal of Chromatography A*, 1158(1–2), 33–46. <https://doi.org/DOI: 10.1016/j.chroma.2007.03.030>
- ERA5 | ECMWF. (n.d.). Retrieved March 4, 2021, from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- García-García, L. M., Sivyer, D., Devlin, M., Painting, S., Collingridge, K., & van der Molen, J. (2019). Optimizing Monitoring Programs: A Case Study Based on the OSPAR Eutrophication Assessment for UK Waters. *Frontiers in Marine Science*, 5(JAN), 503.
- Haavisto, N., Tuomi, L., Roiha, P., Siiriä, S.-M., Alenius, P., & Purokoski, T. (2018). Argo Floats as a Novel Part of the Monitoring the Hydrography of the Bothnian Sea. *Frontiers in Marine Science*, 5(324).
- HELCOM. (n.d.). *HELCOM Map and Data Service. HELCOM subbasins with coastal and offshore division 2018.*
- HELCOM. (2018a). *Dissolved inorganic nitrogen (DIN). HELCOM core indicator report. Online.*
- HELCOM. (2018b). *Dissolved inorganic phosphorus (DIP). HELCOM core indicator report. Online.*
- HELCOM. (2018c). *Guidelines for sampling and determination of dissolved oxygen in seawater.*
- HELCOM. (2018d). *Oxygen debt - HELCOM Core Indicator Report. Online.*
- Küüsmaa, O. (2019). *Soome lahe vertikaalne stratifikatsioon – mõõtmiste ja mudeltulemuste võrdlus.*

Magistritöö.

- Liblik, T., Karstensen, J., Testor, P., Alenius, P., Hayes, D., Ruiz, S., Heywood, K. J., Pouliquen, S., Mortier, L., & Mauri, E. (2016). Potential for an underwater glider component as part of the Global Ocean Observing System. *Methods in Oceanography*, 17, 50–82.
<https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.05.001>
- 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.
- Liblik, Taavi, & Lips, U. (2011). Spreading of suspended matter in a shallow sea area influenced by dredging activities and variable atmospheric forcing: results of in-situ measurements. *Journal of Coastal Research*, SI64, 561–566.
- Liblik, Taavi, & Lips, U. (2012). Variability of synoptic-scale quasi-stationary thermohaline stratification patterns in the Gulf of Finland in summer 2009. *Ocean Science*, 8(4), 603–614.
<https://doi.org/https://doi.org/10.5194/os-8-603-2012>
- Liblik, Taavi, Väli, G., Lips, I., Lilover, M.-J., Kikas, V., & Laanemets, J. (2020). The winter stratification phenomenon and its consequences in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Science*, 16, 1475–1490.
- Lips, U., Kikas, V., Liblik, T., & Lips, I. (2016). Multi-sensor in situ observations to resolve the sub-mesoscale features in the stratified Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Science*, 12(3), 715–732.
<https://doi.org/10.5194/os-12-715-2016>
- 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>
- McDougall, T. J., & Barker, P. M. (2011). Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox. *SCOR/IAPSO WG127*, 28pp. <https://doi.org/ISBN 978-0-646-55621-5>
- Mensah, V., Le Menn, M., & Morel, Y. (2009). Thermal mass correction for the evaluation of salinity. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 26, 665–672. <https://doi.org/doi:10.1175/2008JTECHO612.1>
- Otsmann, M., Suursaar, Ü., & Kullas, T. (2001). The oscillatory nature of the flows in the system of straits and small semienclosed basins of the Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 21(15), 1577–1603.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00002-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00002-4)
- Placke, M., Meier, H. E. 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(SEP), 287. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00287>
- Seifert, T., Tauber, F., & Kayser, B. (2001). *A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea – 2nd edition.* ", *Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29. November 2001, Poster #147.*
- Steele, J. H., Turekian, K. K., & Thorpe, S. A. (2009). *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Vol. 1).
- 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, 54.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00054>

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.

Sulisz, W., Paprota, M., Reda, A., Sulisz, W., Paprota, M., & Reda, A. (2016). Extreme waves in the southern Baltic Sea. *Ciencias Marinas*, *42*(2), 123–137. <https://doi.org/10.7773/cm.v42i2.2599>

Tuomi, L., Kahma, K. K., & Pettersson, H. (2010). Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic sea. *Boreal Environment Research*, *16*, 451–472. www.smhi.se,