

Proovivõtumetoodika ja hindamisindikaatorite arendamine Eesti mereala seisundihinnangute täpsustamiseks

Leping nr 4-1/19/136

Vastutav täitja: Urmas Lips

Tallinn

2020

Sisukord

Annotatsioon	4
1 Sissejuhatus	5
2 Metoodika	7
2.1 Töö kirjeldus	7
2.2 Uuringuala	7
2.3 Andmed ja meetodid	8
2.3.1 Reisid	8
2.3.2 Proovivõtt	8
2.3.3 Proovide analüüs	10
2.3.4 CTD sondiga registreeritud hapniku ja klorofüll <i>a</i> andmete konverteerimine	10
2.3.5 Töös kasutatud andmed	12
2.4 Tuumindikaatorid ja seisundi hindamine	15
2.5 Toitainete koguhulkade määramine	15
3 Tulemused	17
3.1 Temperatuuri ja soolsuse jaotused ning veesamba stratifikatsioon	17
3.2 Hapnikutingimused	21
3.3 Toitainete sisalduse vertikaalsed jaotused	23
3.4 Seisundihinnangud	26
3.4.1 Hapnikuvõlg	26
3.4.2 Toitained ja klorofüll <i>a</i>	28
3.5 Toitainete koguhulgad	30
3.6 Hapniku ja klorofüll <i>a</i> fluorestsentsi vertikaalsed jaotused	33
4 Analüüs	36
4.1 Lahustunud hapniku sisaldus	36
4.1.1 Tuumindikaator 'Hapnikuvõlg'	36
4.1.2 Hapniku vertikaalsete profiilide rakendamine teiste seisundi hindamise indikaatorite ja veesamba elupaiga iseloomustamise eesmärgil	37

4.2	Toitained.....	39
4.3	Klorofüll <i>a</i>	41
5	Kokkuvõte ja soovitusd.....	43
6	Viited	45

Annotatsioon

Käesoleva töö eesmärgiks oli hinnata kihiti proovikogumise metoodika mõju Eesti mereala seisundi hindamise usaldusväärsuse tõstmiseks, sh võrrelda hinnangutulemuste võimalikke erinevusi, kui proove kogutakse kahe erineva metoodika kohaselt. Selleks registreeriti viies seirereisis 2019. aastal ja viies seirereisis 2020. aastal kõikides seirejaamades hapniku ja klorofüllü profiilid ning koguti nende andmete kalibreerimiseks täiendavad veeproovid hapniku ja klorofüllü laboratoorseteks analüüsideks. Kolmes seirereisis – septembris 2019, jaanuaris 2020 ja juulis 2020 koguti viies seirejaamas kihiti veeproovid toitainete (lämmastiku-, fosfori- ja räniühendite) sisalduse määramiseks. Hinnati, kas vertikaalsete profiilide ja kihiti proovide kogumine võib mõjutada mereala seisundihinnanguid, milleks testiti indikaatorite arvutamise tulemusi kasutades siiani riiklikus seires rakendatud proovivõtumetoodikaga ja kihiti proovivõtu metoodikaga kogutud andmeid. Näidati, mida võivad anda kihiti kogutud toitainete ja H_2S analüüside ning lahustunud hapniku ja klorofüll a fluorestsentsi profiilide andmed seisundi hindamiseks ja veesamba elupaiga kirjeldamiseks. Vastavalt testimise tulemustele on tehtud ettepanekud, kuidas täiendada või optimeerida seiremeetodeid riikliku keskkonnaseire programmi mereseire allprogrammi täitmisel. Testiti erinevate meetoditega kogutud andmete põhjal HELCOM tuumindikaatori "Hapnikuvõlg" kasutamist ja pakuti välja Eesti mereala piirkonnad, kus hapnikuvõla indikaatorit on asjakohane kasutada ning nendele merealadele iseloomulikud hapnikuvõla läviväärtused.

Käesoleva projekti raames kogutud veeproovide laboratoorsed analüüsid on teostatud Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudi laboris (akrediteerimistunnistus L257). Riikliku seire analüüsid on teostatud Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudis (akrediteerimistunnistus L179). Andmeid analüüsisid ja aruande koostasid Stella-Theresa Stoicescu, Oliver Samlas, Silvie Lainela ja Urmas Lips (TTÜ Meresüsteemide instituut). Mõõtmised ja veeproovide kogumised reisides ning laboratoorsed analüüsid teostasid TTÜ Meresüsteemide instituudi töötajad Oliver Samlas, Fred Buschmann, Kati Lind, Silvie Lainela, Villu Kikas, Enriko Siht, Maarja Lipp, Mari-Liis Kasemets, Anne Aan ja Natalja Buhhalko.

Uuringu tellis Keskkonnaministeerium ning seda rahastas SA Keskkonnainvesteeringute Keskus (projekt nr 15651 „Merestrategia seireprogrammi koostamine ja seiremetoodikate testimine“).

1 Sissejuhatus

Eesti avamere seires ei järgita praegu täies mahus HELCOMis kokkulepitud proovivõtumetoodikat ning seirejaama sügavusvertikaalil võetakse vähem osaproove kui ette nähtud. See võib mõjutada mereala seisundihinnanguid, kuna HELCOMis kasutatavad eutrofeerumise hindamisindikaatorid (<http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/indicators>) on välja töötatud vastavalt kokku lepitud meetodikale. Seisundihinnangute paikapidavuse kontrollimiseks testiti ja võrreldi erinevate proovivõtumetoodikatega saadavaid eutrofeerumisindikaatorite väärtusi. Selleks kasutati nii riikliku keskkonnaseire programmi mereseire allprogrammis (avamere seire raames) kogutavat andmestikku kui pidevmõõtmiste tulemusi ning võeti täiendavaid proove merevee eutrofeerumisnäitajate vertikaalse jaotuse selgitamiseks.

Proovivõtumetoodikate testimine ja nendega seonduvate eutrofeerumist kirjeldavate indikaatorite arendamine on vajalik Eesti mereala seisundi hindamiseks ning tulemusi kasutatakse rahvusvahelises koostöös (HELCOMis) nii Läänemere seisundi hindamisel kui Eesti mereala seisundi parandamiseks vajalike meetmete väljatöötamiseks ja rakendamiseks. Vastavalt testimise tulemusele on võimalik optimeerida seiremeetodeid riikliku keskkonnaseire programmi mereseire allprogrammi täitmisel. Samuti aitab indikaatorite testimine ja rakendatavate meetodikate arendamine, sh proovivõtu meetodikate testimine, tõsta mereala seisundi hindamise usaldusväärsust.

Lisaks eutrofeerumist kirjeldavate indikaatorite abil seisundi hindamisele kasutatakse toitainete ja hapniku analüüside tulemusi veesamba ja merepõhja elupaikade füüsikaliste-keemiliste tingimuste iseloomustamiseks. Seirereisides registreeritud temperatuuri ja soolsuse vertikaalsed profiilid annavad informatsiooni veesamba stratifikatsioonist, segunemisest, apvellingute (süvavee kergete) esinemisest ja muudest keskkonnaseisundit oluliselt mõjutavatest hüdrograafilistest tingimustest või protsessidest, nagu näiteks süvakihtide vee liikumisest erinevate Läänemere basseinide ning avamere ja rannikumere veekogumite vahel. Kui kehtivas riikliku keskkonnaseire mereseire allprogrammis ainult pinnakihist ja põhjalähedasest kihist kogutud lahustunud hapniku ja toitainete sisalduse andmed iseloomustavad eufootse tsooni ja põhjalähedase kihi (st merepõhja elupaiga) füüsikalisi-keemilisi tingimusi, siis suur osa avamere pelaagilisest elupaigast jääb hüdrokeemiliselt kirjeldamata. Lahustunud hapniku ja toitainete vertikaalsed jaotused võimaldavad hinnata muuhulgas hapnikusisalduse sesoonset dünaamikat veesambas, hüpoksilise (hapnikuvaeguses) veemassi ruumala ja leviala erinevates basseinides, toitainete (sh erinevate ühendite nagu ammooniumsoolade) vertikaalseid jaotusi ja koguhulkasid basseinides ja veekogumites. Lisaks aitavad toitainete kihiti määratud kontsentratsioonid hinnata toitainete voogusid (koormust) naaberbasseinidest ja avamerest rannikumerre.

Käesoleva töö eesmärgiks on näidata, kas ja missugust mõju avaldaksid lahustunud hapniku vertikaalsete profiilide ning väävelvesiniku ja toitainete sisalduse kihiti analüüsimise tulemuste kasutamine eutrofeerumise seisundihinnangule (sh hinnangute usaldusväärsusele) ja elupaikade (eelkõige veesamba elupaikade) füüsikaliste ja keemiliste tingimuste kirjeldamisele. Ülesandeks oli ka näidata, kas hinnangutulemused võivad kahe erineva proovikogumise meetodikaga erineda ka nii palju, et muutub hinnangu tulemus kvaliteediklassi mõttes.

Meetodid ja projekti käigus kogutud ning muud kasutatavad andmed on kirjeldatud käesoleva aruande 2. peatükis. Kolmandas peatükis on toodud töö tulemused ja neljandas peatükis on esitatud saadud tulemuste analüüs. Kokkuvõtte koos soovitustega on antud 5. peatükis. Aruande lisana on esitatud hapnikuvõla indikaatori kirjeldus (faktileht).

Projekti raames kogutud andmed on esitatud tabelite kujul aruande lisades. Andmed sisestatakse vastavas formaadis ka Keskkonnaseire Infosüsteemi KESE.

2 Metoodika

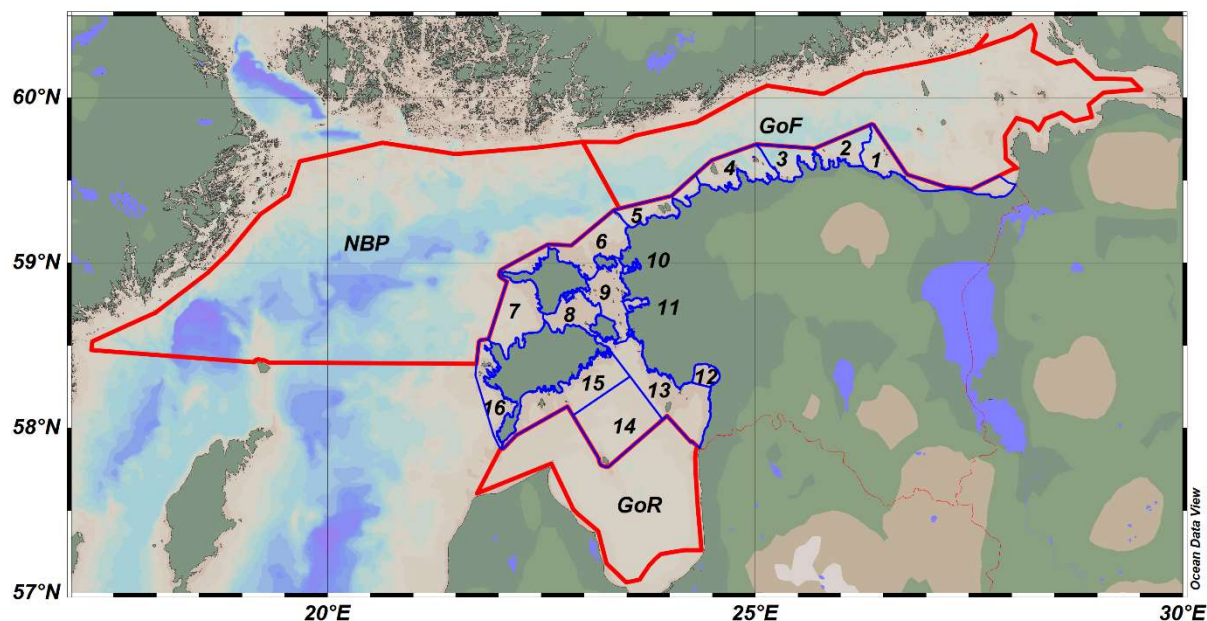
2.1 Töö kirjeldus

Olemasolevate ja töö käigus kogutud seire- ja uuringuandmete põhjal hinnati vee eutrofeerumisnäitajate (sh toitainete N, P, Si ja hapniku ja H₂S sisalduse) vertikaalseid muutusi veesambas Soome lahes, Läänemere avaosa põhjabasseinis ja Liivi lahes.

2019. a suveperioodi ning 2020. a talve- ja suveperioodi seirereisidel testiti erinevate proovivõtumetoditega saadavaid tulemusi 5 avamere seirejaama põhjal, kust võeti paralleelselt veeproove kihiti kogu veesamba ulatuses pinnalt põhjani ning vastavalt riiklikus keskkonnaseire programmis kirjeldatud proovivõtumetoodikale (pinnakihist, kust kogutakse kokku neli proovi 1, 5 ja 10 m sügavuselt ning põhjalähedasest kihist). Proovid võeti eelkõige nendest sügavaveelistest (>80 m, v.a. Liivi laht) seirejaamadest, kust katseliselt võeti kihiti proove ka riikliku seireprogrammi 2019. a avamere seirelepingu täitmisel.

2.2 Uuringuala

Erinevaid proovivõtumetoodikaid testiti Eesti mereala erinevates avamere hindamisüksustes (Soome laht, Läänemere avaosa põhjabassein, Liivi laht), et selgitada kihiti proovivõtu põhjendatust erinevates merepiirkondades ja oludes (Joonis 2.2.1).



Joonis 2.2.1. Eesti rannikuveekogumid (sinise piirjoonega, numbritega) ja avamereosad (punase piirjoonega; GoF – Soome laht, NBP – Läänemere avaosa põhjabassein, GoR – Liivi laht).

2.3 Andmed ja meetodid

2.3.1 Reisid

Projekti raames on kasutatud andmeid, mis on kogutud viie seirereisi jooksul 2019. aastal ja viie seirereisi jooksul 2020. aastal. Uurimislaeva Salme reisirakendused toimuvad järgnevatel perioodidel:

Reis 2019_001, 22.-26. jaanuar 2019

Reis 2019_005, 16.-20. aprill 2019

Reis 2019_010, 27. mai – 1. juuni 2019

Reis 2019_016, 15.-19. juuli 2019

Reis 2019_019, 17.-22. september 2019

Reis 2020_002, 26.-31. jaanuar 2020

Reis 2020_007, 4.-8. mai 2020

Reis 2020_011, 1.-6. juuni 2020

Reis 2020_014, 13.-17. juuli 2020

Reis 2020_020, 24.-28. august 2020

Reiside tavapärasest veidi hilisemad ajad suvel 2019 ja kevadel 2020 olid tingitud laeva klassitaastuseremondi venimisega 2019. aastal ja reisi piirangutega 2020. aasta kevadel. Samas kõik reisirakendused on teostatud aasta aegadel, mil nad ette olid nähtud. Andmete analüüsil tuleb tähele panna, et 2019. a augustisse plaanitud reisirakendus toimus septembris, mis on küll õigel aastaajal, kuid veesamba vertikaalne struktuur võis olla sügise lähenemisega juba teistsugune kui augustis.

Täiendavad toitainete ja H_2S proovid koguti (kihiti) seirereisides 2019. a septembris, 2020. a jaanuaris ja 2020. a augustis.

2.3.2 Proovivõtt

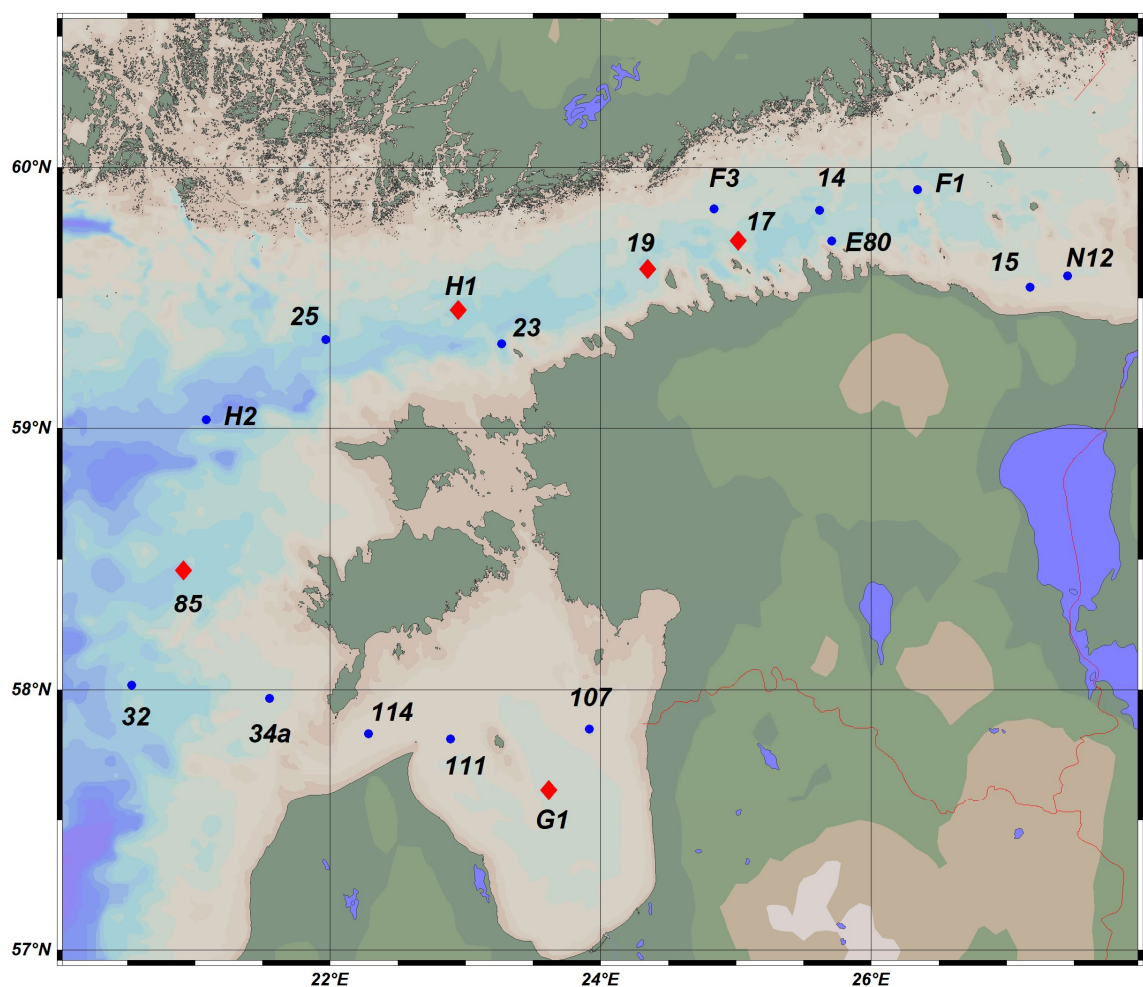
Töö raames määrati vee temperatuuri ja soolsuse ning toitainete (NTOT, DIN, PTOT, DIP, SiO_4), hapniku ja H_2S sisalduse vertikaalsed jaotused veesambas.

Merevee temperatuuri ja soolsuse mõõtmiseks seirejaamades kasutati CTD sondi Ocean Seven 320plus (Idronaut). Registreeriti rõhu, temperatuuri, elektrijuhtivuse, klorofüll *a* fluorestsentsi ja lahustunud hapniku sisalduse vertikaalsed profiilid. Veeproovide kogumiseks merel kasutati CTD sondiga ühendatud proovivõtukaruselli M1018 (General Oceanics).

Merevee läbipaistvust mõõdeti Secchi ketta abil valgela ajal ja nõrga kuni mõõduka lainetuse tingimustes.

CTD profiilid koos hapnikusisalduse jaotusega registreeriti kõikides seirejaamades kõikide seirereiside jooksul 2019-2020. Täiendavad toitainete ja H₂S analüüsid teostati kokku viies sügavaveelises seirejaamas (17 ja 19 Soome lahes, H1 ja 85 Läänemere avaosa põhjasseinis ning G1 Liivi lahes) kolmes seirereisis – septembris 2019, jaanuaris 2020 ja juulis 2020. Seirejaamade skeem on toodud joonisel 2.3.1.

Töö ülesandeks oli võrrelda tulemusi, mis on saadud, kasutades paralleelselt Eesti ja HELCOM proovikogumise meetodikaid. Kuna Eesti mereseire programmis kogutakse veeproove, mis vastab HELCOM meetodikale ainult pinnakihi (st 1, 5 ja 10 m sügavuselt), siis võeti täiendavaid proove valitud jaamades kihiti, 10 m sammuga, st pinnakihi 1 ja 10 m ning edasi kuni põhjani 10 m sammuga. See võimaldab analüüsida, kas kihiti proovivõtt annab hinnangutele midagi juurde, mõjutab sisalduste keskmist väärtust ja kas kulude optimeerimiseks võib ühe pinnakihi proovi ära jätta (5 m).



Joonis 2.3.1. Avamere seirejaamad. Punase rombiga on tähistatud jaamad, millest koguti veeproove läbi terve veesamba 2019. a septembris ja 2020. a jaanuaris ning juulis.

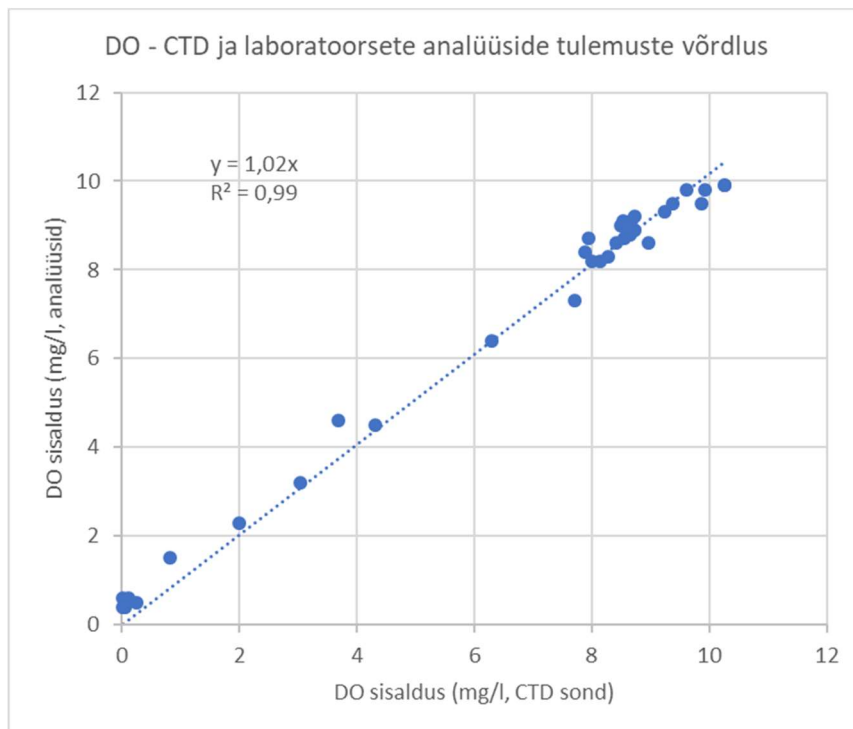
2.3.3 Proovide analüüs

Toitainete proovid sügavkülmutati uurimislaua pardal, laboris määrati nitritid+nitraadid, fosfaadid ja üldlämmastik automaatanalüsaatoril Lachat QuickChem® 8500 Series2 (EVS-EN ISO 13395:1999; EVS-EN ISO 15681-1:2005; EVS-EN ISO 11905-1:2003) (EVS-EN ISO 13395:1999; EVS-EN ISO 15681-1:2005; EVS-EN ISO 11905-1:2003). Ammooniumi, silikaatide ning üldfosfori sisaldused määrati spektrofotomeetriliselt, kasutades vastavaid manuaalmeetodeid (Grasshoff et al., 1999; EVS-EN ISO 6878:2004). Kõikide toitainete analüüside puhul vastavad meetodikad HELCOM seirejuhenditele (vt <https://helcom.fi/action-areas/monitoring-and-assessment/monitoring-guidelines/>).

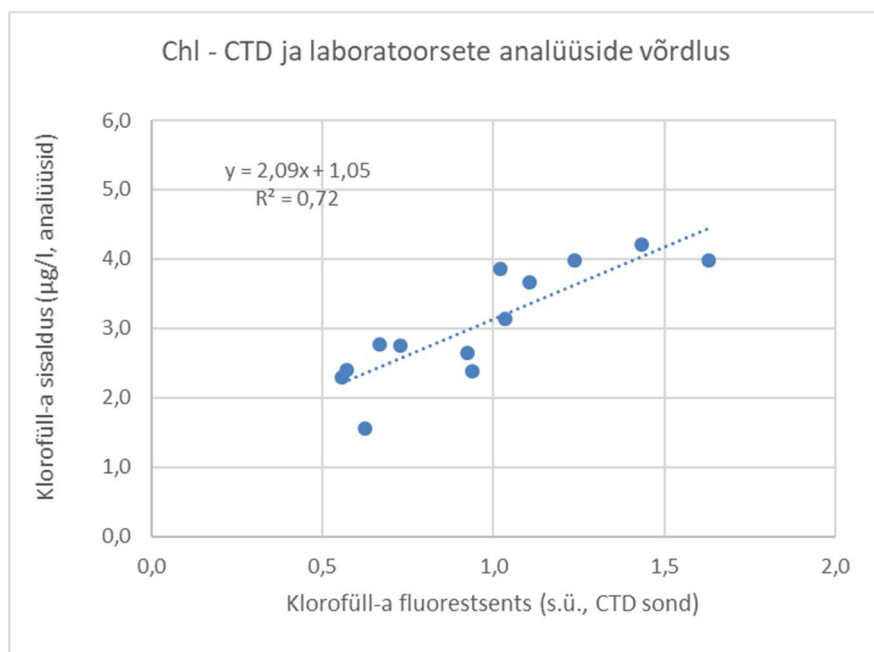
Lahustunud hapnik määrati merevee proovis kasutades hapnikumeetrit MU 6100 L (VWR), võttes arvesse ka soolsuse korrektsiooni (hapniku analüsaatorisse sisestati CTD sondiga vastavalt sügavuselt mõõdetud soolsuse väärtus). Väävelvesinik fikseeriti peale proovivõttu ning määrati laboris spektrofotomeetriliselt (Grasshoff et al. 1999). pH tempereeriti peale proovivõttu 25°C-ni ning määrati koheselt potentsiomeetriliselt NBS skaalal (EVS-EN ISO 10523:2012). Klorofüll α sisalduse määramiseks filtreeriti veeproovid peale proovivõttu läbi Whatman GF/F klaasfiiberfiltrite ning filtrid sügavkülmutati. Laboris ekstraheeriti proovid 96% etanoolis ja määrati spektrofotomeetriliselt (<https://helcom.fi/media/publications/Guidelines-for-measuring-chlorophyll-a.pdf>).

2.3.4 CTD sondiga registreeritud hapniku ja klorofüll α andmete konverteerimine

Tänapäevastel CTD sondidel on elektrijuhtivuse, temperatuuri ja rõhu anduritele lisaks ka lahustunud hapniku (DO – dissolved oxygen) ja klorofüll α fluorestsentsi andurid. TTÜ Meresüsteemide instituudis on vastavad meetodid (hapniku ja klorofüll α registreerimine profileerivate seadmetega) akrediteeritud (<http://eak.ee/dokumendid/pdf/kasitusala/L257.pdf>). OS320 sondiga ühendatud hapnikuandurit on vajalik kalibreerida tehases vähemalt iga kolme aasta jooksul. Samuti kalibreeritakse andurit laeval enne iga reisi algust ja peale mõõtmiste lõppu. Täiendavalt võetakse veeproovid, mida analüüsitakse kasutades hapnikumeetrit (meie puhul MU 6100 L, VWR; vt ptk 2.3.3). Näide ühe reisi andmete põhjal regressioonisirge leidmisest CTD sondi ja labori analüüside andmete vahel on toodud joonisel 2.3.2. Kasutades leitud regressioonisirge valemit, viiakse CTD sondi DO anduriga mõõdetud väärtused vastavusse laboratoorsete analüüside tulemustega. Juhime tähelepanu, et korrelatsioon CTD DO anduri ja laboratoorsete analüüside tulemuste vahel on väga kõrge ($R^2 = 0,99$) ja regressioonikordaja on väga lähedal ühele – joonisel 2.3.2 toodud näites 1,02.



Joonis 2.3.2. CTD sondiga OS320 mõõdetud hapniku andmete võrdlus laboratoorsete analüüside tulemustega (reis 2020_020, 24.-28. august 2020). Joonisel on toodud regressioonisirge valem ja determinatsioonikordaja R^2 .



Joonis 2.3.3. CTD sondiga OS320 mõõdetud klorofüll *a* fluorestsentsi andmete võrdlus laboratoorsete analüüside tulemustega (reis 2019_019, 17.-22. september 2019). Joonisel on toodud regressioonisirge valem ja determinatsioonikordaja (R^2).

CTD sondiga ühendatud klorofüll *a* fluorestsentsi andmete kasutamiseks on paralleelsete klorofüll analüüside teostamine veelgi olulisem kui lahustunud hapniku andmete puhul. Mõõtmistulemuste konverteerimiseks ei saa kasutada ainult tehases teostatud kalibreerimise tulemusi, sest fluorestsents sõltub ka paljudest muudest, sh vees lahustunud ainete kontsentratsioonidest ja ka planktonkoosluse koosseisust. Vajalik on igas reisis teostada piisaval hulgal laboratoorseid klorofüll analüüse, et tuletada kõrge usaldusväärsusega valem fluorestsentsi konverteerimiseks klorofüll kontsentratsiooniks. Joonisel 2.3.3 on toodud näide seosest sondiga OS320 mõõdetud fluorestsentsi ja klorofüll *a* laboratoorsete analüüsitulemuste vahel. Nagu näha, on saadud regressioonisirge väiksema determinatsioonikordajaga kui hapniku puhul, kuid seos on siiski suhteliselt tugev ($R^2 = 0,72$).

Ülalpool kirjeldatud meetodit on rakendatud kõigi käesolevas projektis kasutatud lahustunud hapniku ja klorofüll *a* sisalduse vertikaalsete profiilide jaoks.

2.3.5 Töös kasutatud andmed

2.3.5.1 Projekti raames kogutud andmed

Projekti raames koguti, töödeldi ja analüüsiti kõikide seirereisides registreeritud CTD profiilid, mis sisaldavad andmeid temperatuuri, soolsuse, lahustunud hapniku sisalduse ja klorofüll *a* fluorestsentsi vertikaalsete jaotuste kohta seirejaamades. Kokku on kasutatud viie seirereisi andmeid aastast 2019 ja viie seirereisi andmeid aastast 2020. Registreeritud ja analüüsitud vertikaalseid profiile on kokku 245 (lisaks seirejaamadele ka MereRita projekti raames Läänemere avaosa põhjabasseinis tehtud mõõtmised).

CTD andmed on esitatud töö Lisas 1. Profiilide vertikaalne resolutsioon on 0,5 m (0,5 db). CTD sondi hapniku ja klorofüll *a* fluorestsentsi andurite kalibreerimiseks teostati hapniku ja klorofüll analüüsid vastavalt 395 ja 113 veeproovist. Andmete kvaliteedikontrolli tulemusel on välja praagitud üks hapnikuprofiil täies ulatuses ja viis hapnikuprofiili osaliselt (ülemises kihis). Põhjuseks võis olla õhu sattumine anduri membraanile, mis rõhu all eemaldus. Taoliste ebakorrektsete andmete leidmiseks ja eemaldamiseks on vajalik lisaks veeproovide analüüsidele teostada peale sondeerimisi ka profiilide visuaalne kontroll. Klorofüll andur ei andnud korralikult signaali viies seirejaamas 2019. a septembris ja need profiilid on samuti analüüsist välja jäetud. Kokkuvõttes on nii hapniku kui klorofüll mõõtmised CTD sondiga olnud õnnestunud, st korrektsed andmed on 245 registreeritud profiilist 239 hapniku ja 240 klorofüll jaotuse jaoks.

Hapnikuvõla tuumindikaatori arvutamiseks on teostatud H₂S analüüse juhul, kui põhjalähedases kihis täheldati hapnikuvaegust. Analüüse tehti neljast jaamast (17, 19, H1 ja 85) septembris 2019 ja kahest jaamast (17 ja 19) juulis 2020, kokku 17 veeproovist (põhjalähedasest veeproovist ja 10 m sammuga kuni hüpoksia piirini). Toitainete analüüse teostati valitud viiest seirejaamast kihiti võetud veeproovidest kokku 168. Toitainete, hapniku, H₂S ja klorofüllil analüüside tulemused on esitatud aruande Lisas 2.

2.3.5.2 *Meresire programmi andmed*

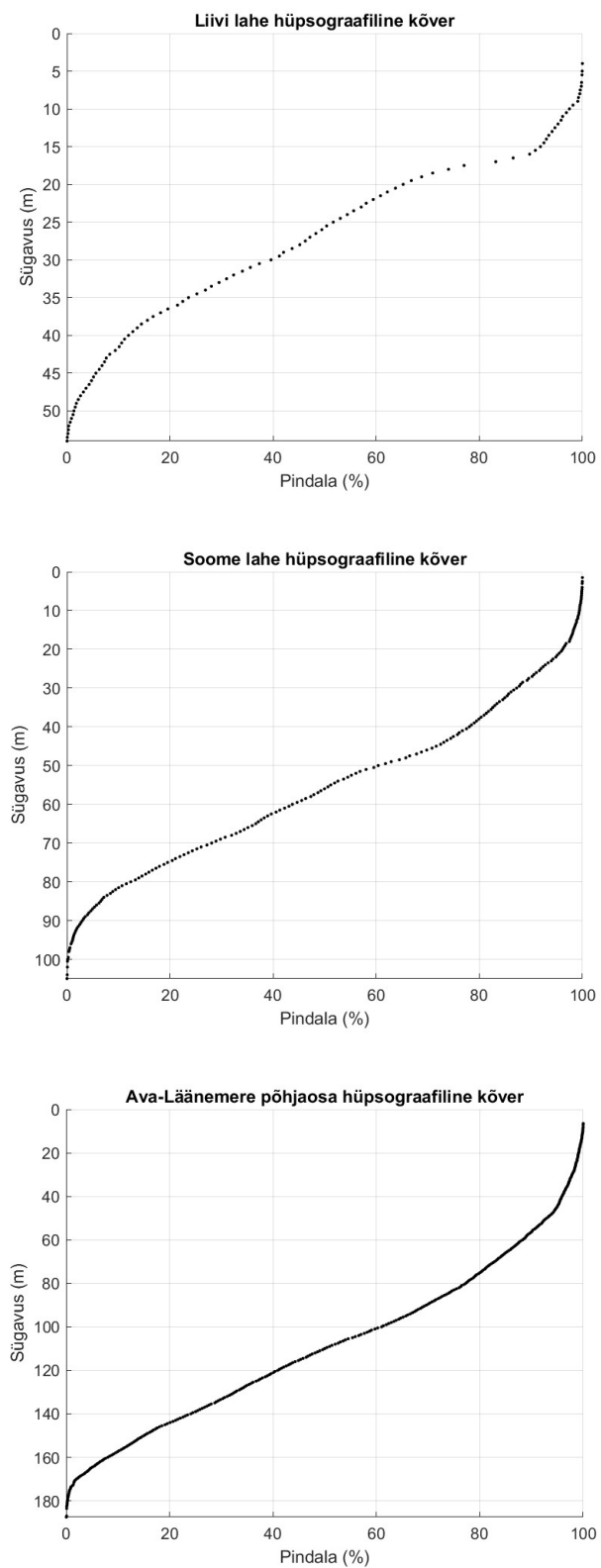
Käesoleva projekti raames kogutud andmete ja metoodika võrdlemiseks riikliku keskkonnaseire mereseire allprogrammi andmete ja metoodikatega kasutati Keskkonnaseire infosüsteemi (KESE) salvestatud toitainete, hapniku, väävelvesiniku ja klorofüllil andmeid. Kokku oli võimalik 15. oktoobri 2020 seisuga alla laadida hinnatavate kolme avamere piirkonna jaoks järgmised andmed:

- Toitainete kontsentratsioonid pinnakihis (0-10 m) talvel 2019 ja 2020: NH₄-N – 33, NO₂+NO₃-N – 33 ja PO₄-P – 30 tulemust;
- Toitainete kontsentratsioonid pinnakihis (0-10 m), kõik aastaajad 2019-2020: TP – 105 ja TN – 105 tulemust;
- Toitainete kontsentratsioonid neljast seirejaamast (N12, 17, H2, G1) septembris 2019 ja jaanuaris 2020, kus proove koguti kihiti, kokku 86 tulemust kõikide analüüsitud ühendite kohta (NH₄-N, NO₂+NO₃-N, PO₄-P TP, TN, SiO₄);
- Lahustunud hapniku (DO) sisaldus põhjalähedasest veeproovist, kõik aastaajad 2019-2020 – 57 analüüsi;
- Väävelvesiniku (H₂S) sisaldus põhjalähedasest veeproovist, kõik aastaajad 2019-2020 – 56 analüüsi;
- Klorofüll *a* kontsentratsioon (CHLA) pinnakihist 0-10 m (integreeritud proovist) 2019. a suvel – 11 analüüsi.

2.3.5.3 *Muud andmed*

Hapnikuvõla indikaatori väärtuste arvutamiseks on vajalik omada erinevate hinnatavate basseini ruumalasid kihiti, mida on võimalik leida hüpsograafiliste kõverate abil. Pindalaline hüpsograafiline kõver näitab, mitu protsenti veekogumi pindalast on teatud sügavusest sügavam (sügavusele 0 m vastab 100 %). Ruumalaliste hüpsograafiliste kõverate tuletamiseks kasutati Warnemünde Läänemere uuringute instituudi (IOW) sügavusandmete andmebaasi (Seifert et al. 2001). Avamere basseini

piirid, mis ei sisalda rannikumere veekogumeid, on saadud HELCOM veekogumite massiivist (HELCOM 2018c). Käesolevas töös kasutatud hüpsograafilised kõverad Soome lahe, Liivi lahe ja Läänemere avaosa põhjabasseini kohta on toodud joonisel 2.3.4.



Joonis 2.3.4. Hüpsograafilised kõverad Liivi lahe, Soome lahe ja Läänemere avaosa põhjabasseini jaoks.

2.4 Tuumindikaatorid ja seisundi hindamine

Kogutud info põhjal arvutati eutrofeerumist kirjeldatavate seisundiindikaatorite väärtused, et tuvastada, kas ja mil määral mõjutab erinev proovivõtumetoodika ja sellest tulenev andmestik mereala seisundihinnanguid. Seisundiindikaatoritest kasutati HELCOMi tuumindikaatoreid NTOT, DIN, PTOT, DIP, hapnikuvõlg (*Oxygen debt*) (HELCOM 2018e, 2018a, 2018f, 2018b, 2018d). DIN ja DIP puhul kasutatakse hinnanguteks talviseid mõõteandmeid (detsembrist-veebruariini), NTOT, PTOT ja hapnikuvõla indikaatori puhul terve aasta andmeid. Toitainete puhul kasutatakse andmeid pinnakihist (0-10 m), hapnikuvõla indikaatori jaoks võetakse hapnikuväärtused halokliini alusest punktist alates kuni mõõteandmete kõige sügavama väärtuseni. Negatiivse hapnikuna lisatakse hapnikuvõla indikaatori arvutamisel väävelvesiniku kontsentratsioonid. Halokliin määratakse sügavusvahemikuna, kus soolsuse gradient on $\geq 0.07 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ vastavalt Liblik & Lips (2011) (soolsuse gradient leitakse 2.5 m sammuga silutud profiilide põhjal). Hea keskkonnaseisundi saavutamist märgib mõõdetud väärtuse ja läviväärtuse (Tabel 2.4.1) suhe (eutrofeerumise suhe). Kui seireandmetest leitud indikaatori väärtus jääb allapoole läviväärtust, st eutrofeerumise suhe on <1 , siis vastab mereala seisund heale keskkonnaseisundile.

Tabel 2.4.1. HELCOM tuumindikaatorite läviväärtused hinnanguüksuste kaupa.

Tuumindikaator	Soome laht (GOF)	Liivi laht (GOR)	Läänemere avaosa põhjabasseini (NBP)
DIN	3,80 $\mu\text{mol l}^{-1}$	5,20 $\mu\text{mol l}^{-1}$	2,90 $\mu\text{mol l}^{-1}$
DIP	0,59 $\mu\text{mol l}^{-1}$	0,41 $\mu\text{mol l}^{-1}$	0,25 $\mu\text{mol l}^{-1}$
NTOT	21,3 $\mu\text{mol l}^{-1}$	28,0 $\mu\text{mol l}^{-1}$	16,2 $\mu\text{mol l}^{-1}$
PTOT	0,55 $\mu\text{mol l}^{-1}$	0,70 $\mu\text{mol l}^{-1}$	0,38 $\mu\text{mol l}^{-1}$
Hapnikuvõlg	8,66 mg l^{-1}	n/a	8,66 mg l^{-1}
Klorofüll-a	2,00 $\mu\text{g l}^{-1}$	2,70 $\mu\text{g l}^{-1}$	1,65 $\mu\text{g l}^{-1}$

2.5 Toitainete koguhulkade määramine

Toitainete koguhulgad on võimalik arvutada kihiti kogutud veeproovidest määratud toitainete kontsentratsioonide põhjal. Käesoleva projekti raames kolmes seirereisis (september 2019, jaanuar 2020 ja juuli 2020) mõõdetud toitainete kontsentratsioonide põhjal määrati koguhulgad Soome lahe,

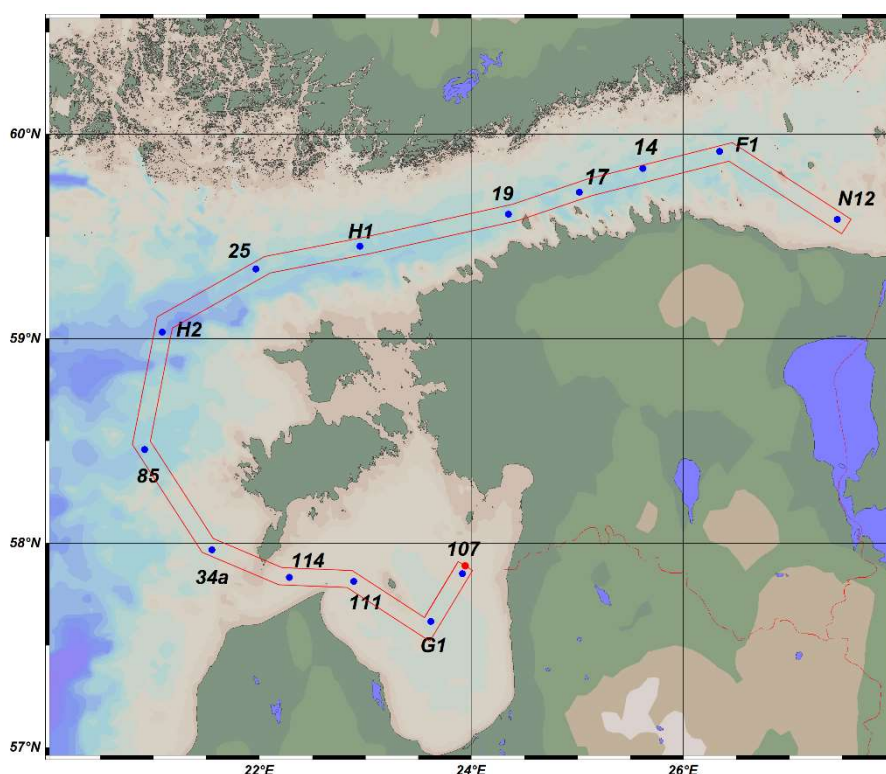
Läänemere avaosa põhjabasseini ja Liivi lahe kohta. Soome lahes kasutati jaamade 17 ja 19 andmeid, Läänemere avaosas jaamade H1 ja 85 andmeid ning Liivi lahes jaama G1 andmeid. Esiteks koostati toitainete vertikaalsed profiilid lineaarselt, interpoleerides analüüsitulemused hüpsograafilise kõvera andmetele vastavale vertikaalsele lahutusele (0,5 m). Sama mereala kohta arvutati keskmine toitainete kontsentratsioon igal sügavusel. Integreeritud toitainete koguhulk leiti sügavuse keskmise ja sellele sügavusele vastava ruumala korrutiste summana.

Kuna 2019.-2020. a riikliku seire raames tehti samuti valitud jaamades kihiti toitainete analüüse, siis arvutati nimetatud kolmel merealal toitainete koguhulgad ka kaasates KESE andmeid septembri 2019 ja jaanuari 2020 seirereisidest. Riikliku seire raames täiendavalt kihiti analüüsitud jaamad olid N12 ja 17 Soome lahes, H2 Läänemere avaosa põhjabasseinis ning G1 Liivi lahes.

3 Tulemused

3.1 Temperatuuri ja soolsuse jaotused ning veesamba stratifikatsioon

Aastatel 2019 ja 2020 seirereiside käigus kogutud andmete põhjal koostatud temperatuuri ja soolsuse vertikaalsed lõiked Liivi lahest läbi Läänemere avaosa põhjabasseini kuni Narva laheni Soome lahes (lõike asukoht on toodud joonisel 3.1.1) iseloomustavad hästi termokliini teket ja selle arengut ning halokliini aluse soolasema veemassi paiknemist (joonised 3.1.2 ja 3.1.3). 2019. aastal asus halokliin Soome lahes sügavusvahemikus 49-69 m ja 2020. aastal sügavusvahemikus 45-71 m (Tabel 3.1.1). Läänemere avaosa põhjabasseinbis oli halokliin 2019. aastal keskmiselt sügavuste 55-75 m ja 2020. aastal sügavuste 65-83 m vahel. Kui 2019. aastal oli nii Soome lahes kui Läänemere avaosa põhjabasseinis halokliin keskmiselt sarnase paksusega (~20 m), siis 2020. aastal oli Soome lahes halokliini paksuseks >26 m ja Läänemere avaosas keskmiselt 18 m. Läänemere avaosa põhjabasseinis oli halokliin 2020. aastal ligikaudu 10 m võrra sügavamal kui 2019. aastal.



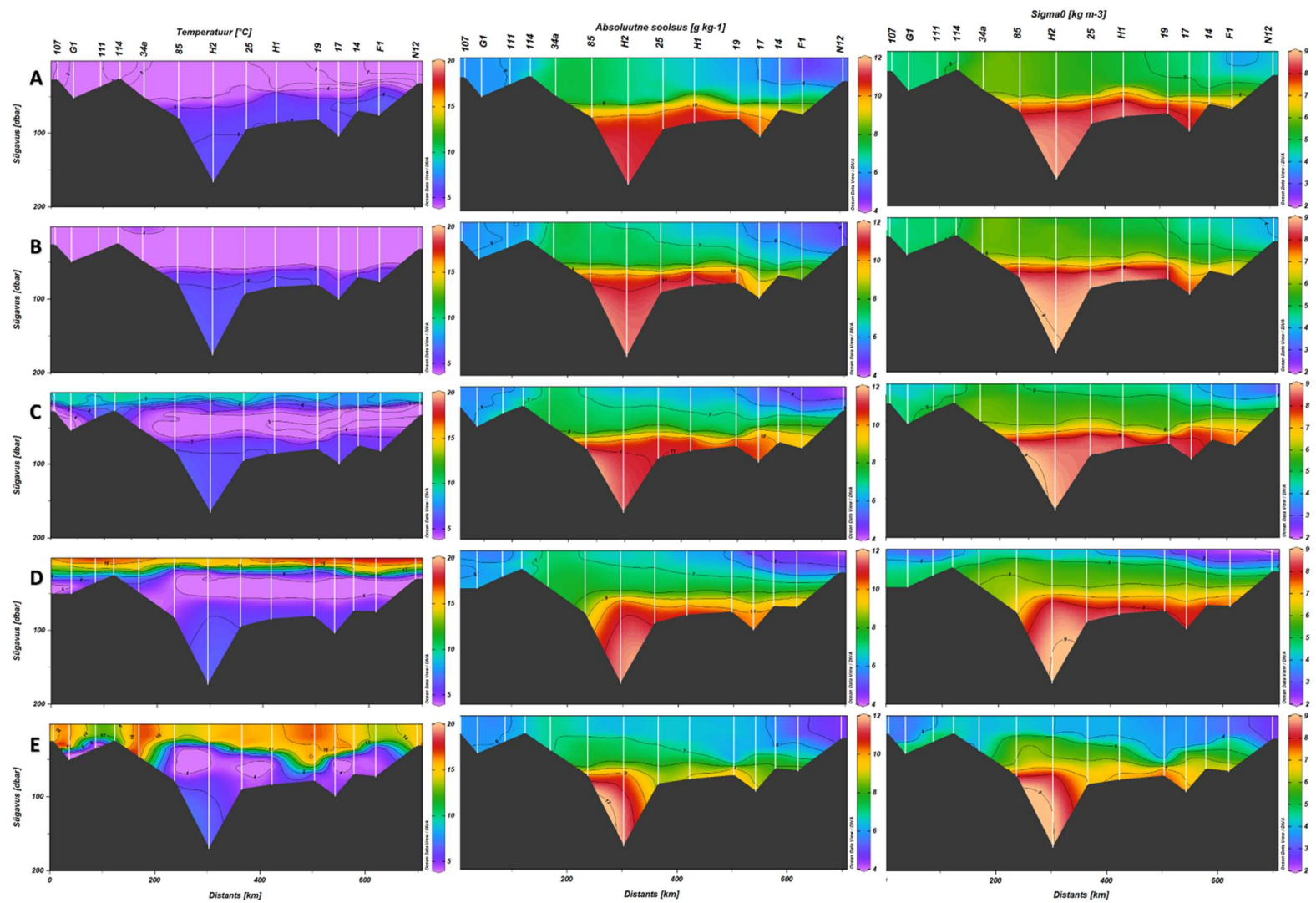
Joonis 3.1.1. Parameetrite jaotuste sügavuslõigete joonistamiseks kasutatud seirejaamade asukohad (lõigete alguseks, st joonistel vasakpoolseks piiriks on jaam 107 Liivi lahes).

Tabel 3.1.1. CTD andmete põhjal hinnatud halokliini keskmine sügavus seirereiside kaupa Läänemere avaosa põhjabasseinis ja Soome lahes aastatel 2019 ja 2020.

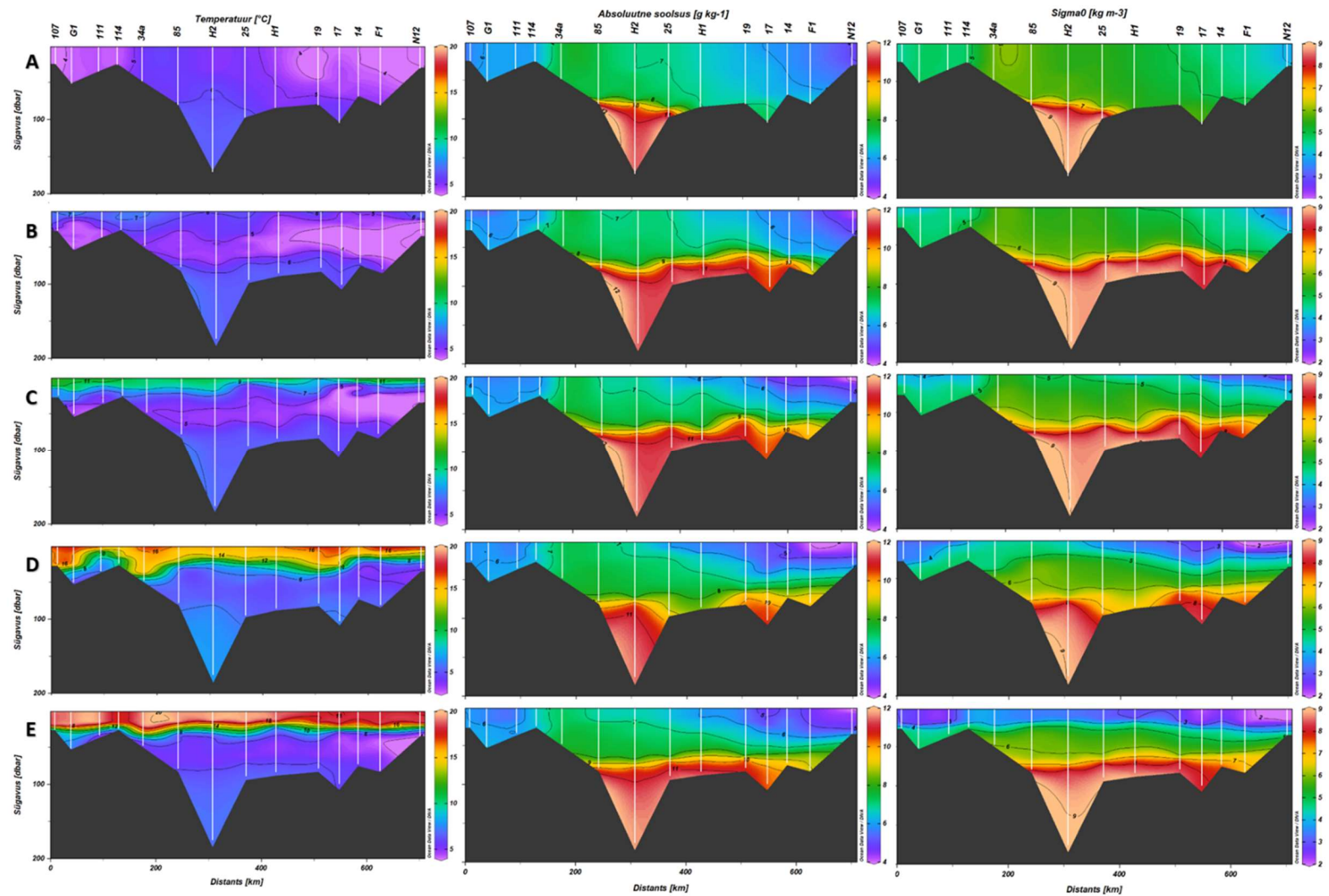
Seirereis		Läänemere avaosa põhjabassein			Soome laht		
		Halokliini ülemine piir (m)	Halokliini alumine piir (m)	Paksus (m)	Halokliini ülemine piir (m)	Halokliini alumine piir (m)	Paksus (m)
2019	Jaauar	53,8	74,0	20,2	49,5	70,7	21,2
	Aprill	51,3	74,6	23,3	48,8	65,3	16,5
	Mai-juuni	57,1	75,6	18,5	47,8	68,0	20,2
	Juuli	52,8	74,8	22,0	49,6	70,7	21,1
	September	59,8	77,5	17,8	48,1	71,8	23,7
	<i>Kogu aasta keskmine:</i>	55,0	75,3	20,4	48,8	69,3	20,5
2020	Jaauar	70,1	86,2	16,1	-	-	-
	Mai	61,2	77,8	16,5	52,6	71,5	18,9
	Juuni	62,7	79,9	17,2	46,4	69,5	23,1
	Juuli	64,7	83,0	18,3	42,5	72,4	29,9
	August	62,0	80,8	18,7	44,6	71,9	27,3
	<i>Kogu aasta keskmine:</i>	64,2	81,5	17,4	46,5	71,3	24,8

Vee temperatuuri iseloomustas 2019. a juuli seirereisis kuni ~25m sügavuseni ulatuv soojenenud pinnakiht, mis septembriks oli laienenud sügavamale (kohati kuni ~50 m) ja muutunud jahedamaks (joonis 3.1.2). Läbi kogu veesamba esines suhteliselt suur horisontaalne muutlikkus kõigi nimetatud parameetrite jaotuses. 2019. a esimeses pooles ulatus Läänemere avaosa põhjabasseinist soolasem veemass Soome lahe põhjalähedases kihis kuni jaamani 17 (maksimaalne ulatus oli mai-juuni seirereisi ajal). Juulikuu seirereisi andmetest on näha, et soolasem veemass põhjalähedases kihis hakkas taanduma avamere poole ja septembri reisi ajaks jaamas 17 suuremaid soolsuse väärtusi põhjalähedases kihis ei esinenud, soolsus jäi alla 9,4 g kg⁻¹.

Kui 2020. a talvel ja mai alguses oli kogu veesammas suhteliselt läbisegunenud kuni halokliinini, siis juuni ja juuli seirereisideks oli sesoonne termokliin välja arenenud ~25 m sügavusel (joonis 3.1.3). Augusti reisiks oli pinnakiht veelgi soojenenud ja kihistatus tugevnenud, moodustades kolm suhteliselt ühtlast kihti (vt tiheduse lõige joonisel 3.1.3), mis ulatusid Soome lahe idaosast läbi Läänemere avaosa põhjabasseini jaamade peaaegu Irbe väinani.



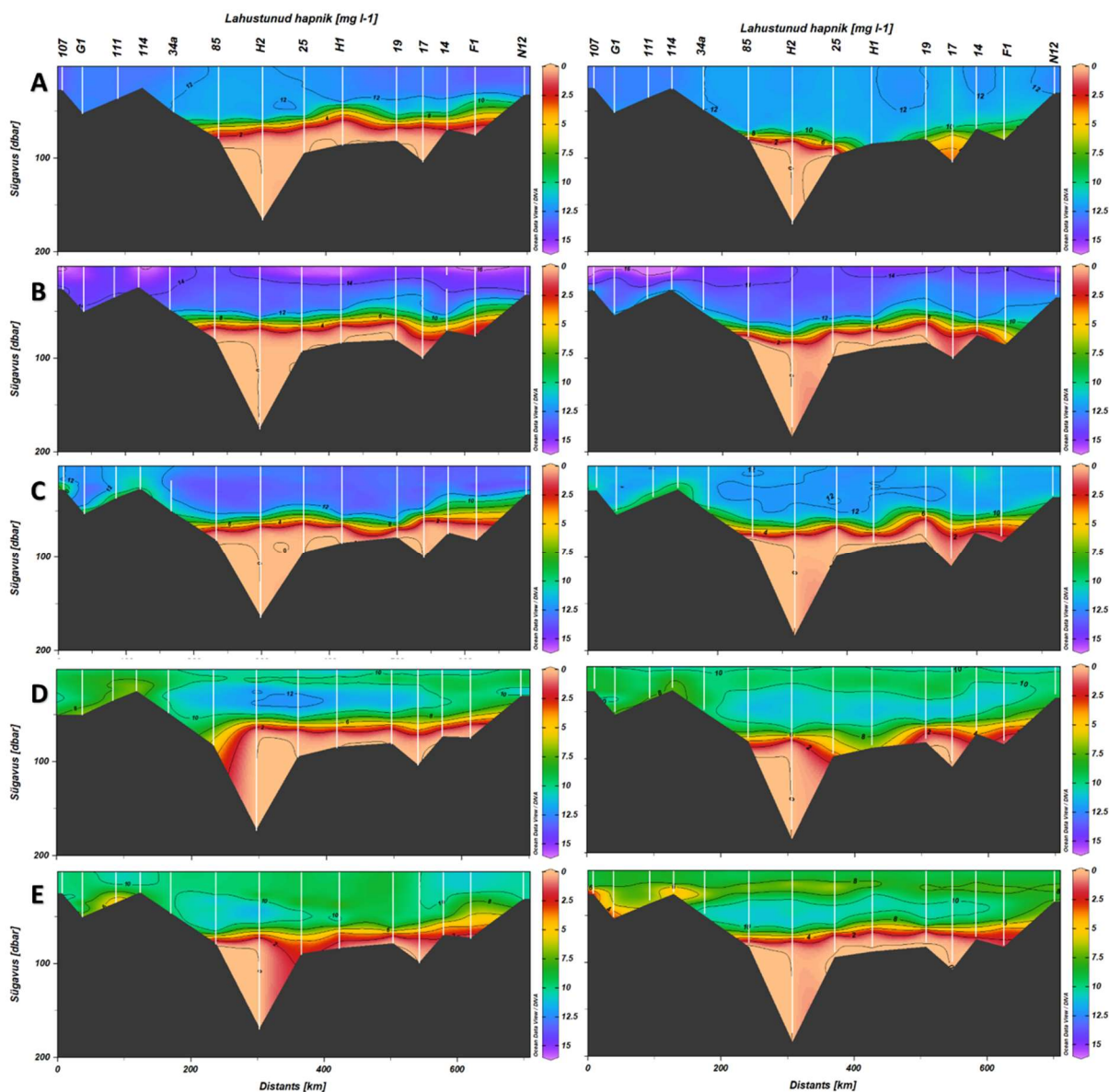
Joonis 3.1.2. Temperatuuri, soolsuse ja suhtelise tiheduse vertikaalsed lõiked aastal 2019 jaanuari (A), aprilli (B), mai-juuni (C), juuli (D) ja septembri (E) seirereisides. Seirajaamade asukohad on näidatud valgete vertikaalsete joontena, lõike paiknemine on toodud joonisel 3.1.1.



Joonis 3.1.3. Temperatuuri, soolsuse ja tiheduse lõiked aastal 2020 jaanuari (A), mai (B), juuni (C), juuli (D) ja augusti (E) seirereisides. Seirejaamade asukohad on näidatud valgete vertikaalsete joontena, lõike paiknemine on toodud joonisel 3.1.1.

3.2 Hapnikutingimused

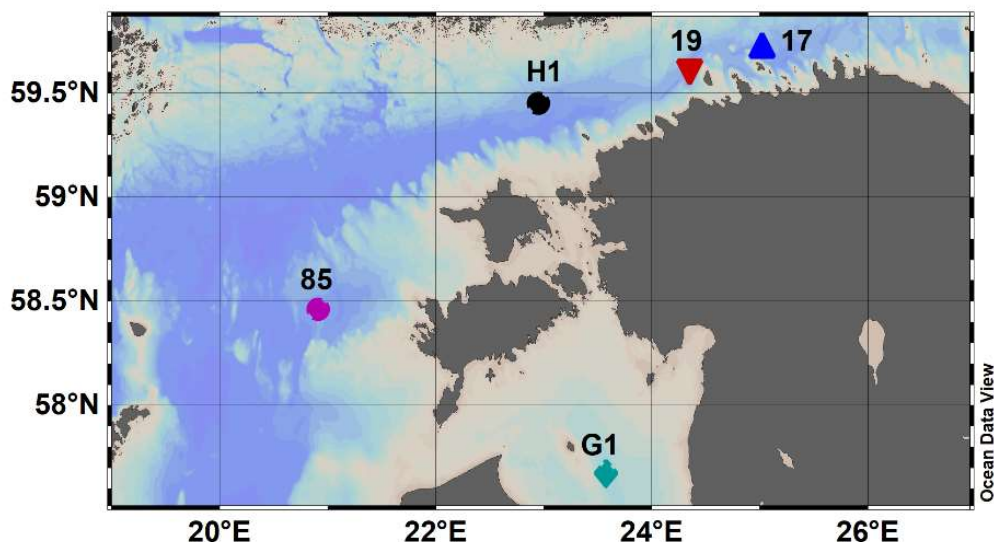
Vees lahustunud hapniku sisalduse andmete põhjal on näha, et Eesti mereala sügavamate piirkondade põhjalähedases kihis esinesid hüpoksilised tingimused kas kogu või peaaegu kogu vaatlusperioodi 2019-2020 jooksul (joonis 3.2.1; hüpoksia piiriks on defineeritud lahustunud hapnikusisaldus $\leq 2.9 \text{ mg l}^{-1}$). Pinnakihis esinesid kõrgemad hapnikusisaldused aastate esimeses pooles, talvel ja fütoplanktoni aktiivsema elutegevuse perioodil kevadel. Juuli ja septembri seirereiside ajaks oli halokliinist ülalpool asuvatel sügavustel hapnikusisaldus langenud võrreldes kevadega – pinnakihis seoses algproduktiooni languse ja veetemperatuuri tõusuga ning vahekihis (allpool termokliini ja ülalpool halokliini) eelkõige hapniku tarbimise tagajärjel. 2020. a jaanuaris ei esinenud hüpoksilisi tingimusi kogu sügava mereala ulatuses, vaid ainult sügavamates jaamades Läänemere avaosa põhjabasseinis ja Keri saare juures Soome lahes. Samuti 2020. a juulis ei esinenud hüpoksilised tingimused ühtlaselt terves põhjalähedases kihis. Hüpoksiat registreeriti lisaks Läänemere avaosa põhjabasseini sügavaimale jaamale H2 ka Soome lahe kõige sügavamas jaamas 17.



Joonis 3.2.1. Vees lahustunud hapniku sisalduse sügavuslõiked aastal 2019 (vasakpoolsed joonised) jaanuari (A), aprilli (B), mai-juuni (C), juuli (D) ja septembri (E) seirereisides. Lahustunud hapniku sügavuslõiked aastal 2020 (parempoolsed joonised) jaanuari (A), mai (B), juuni (C), juuli (D) ja augusti (E) seirereisides. Seirejaamade asukohad on näidatud valgete vertikaalsete joontena, lõike paiknemine on toodud joonisel 3.1.1.

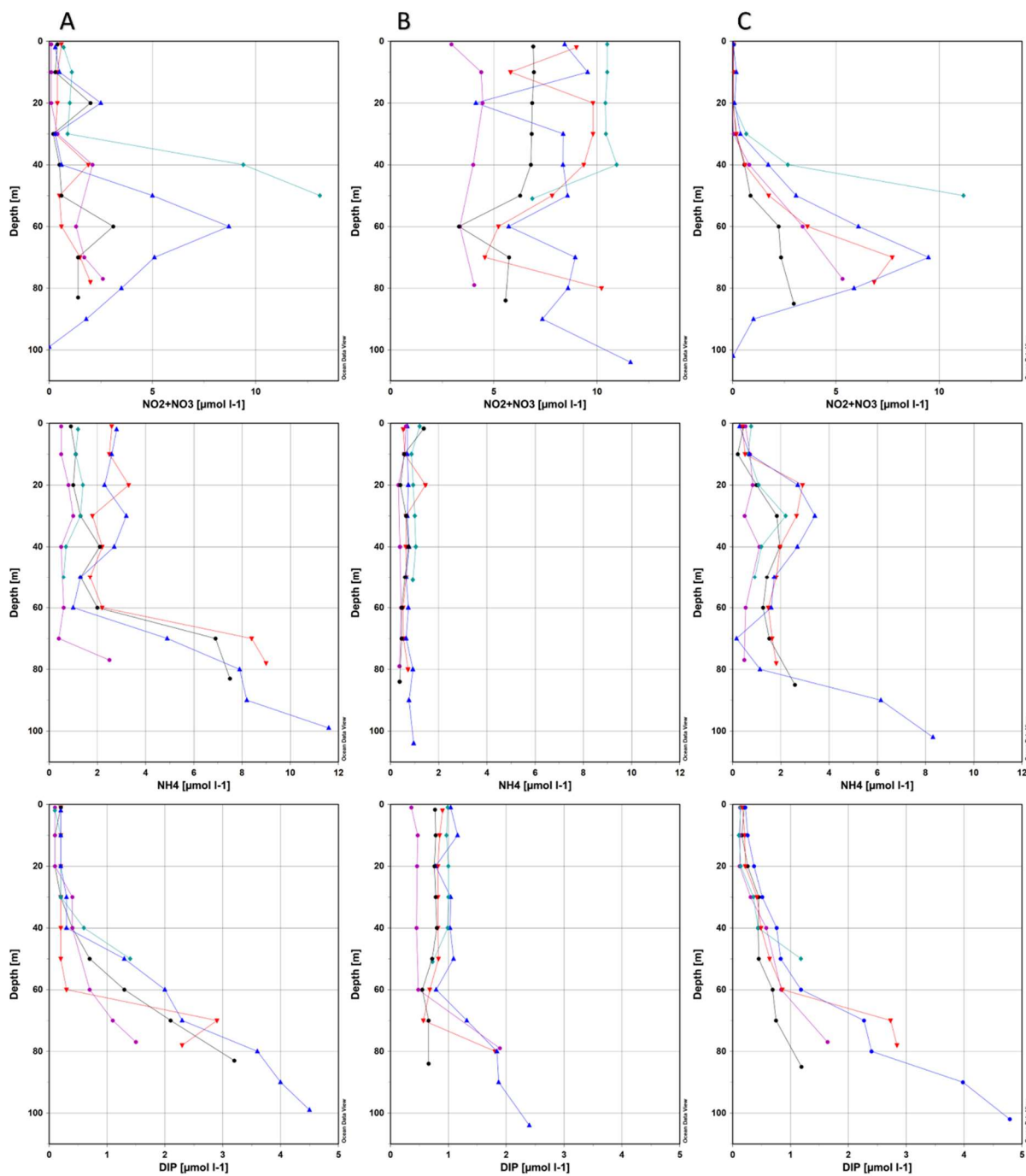
3.3 Toitainete sisalduse vertikaalsed jaotused

Soome lahe jaamades 17 ja 19, Läänemere avaosa põhjabasseini jaamades H1 ja 85 ja Liivi lahe jaamas G1 võeti veeproove kihiti läbi kogu veesamba ehk iga 10 meetri järel, et määrata toitainete (Si, NH₄, NO₂+NO₃, PO₄, NTOT, PTOT) sisalduste vertikaalsed jaotused. Joonisel 3.3.1 on toodud jaamade asukohad.

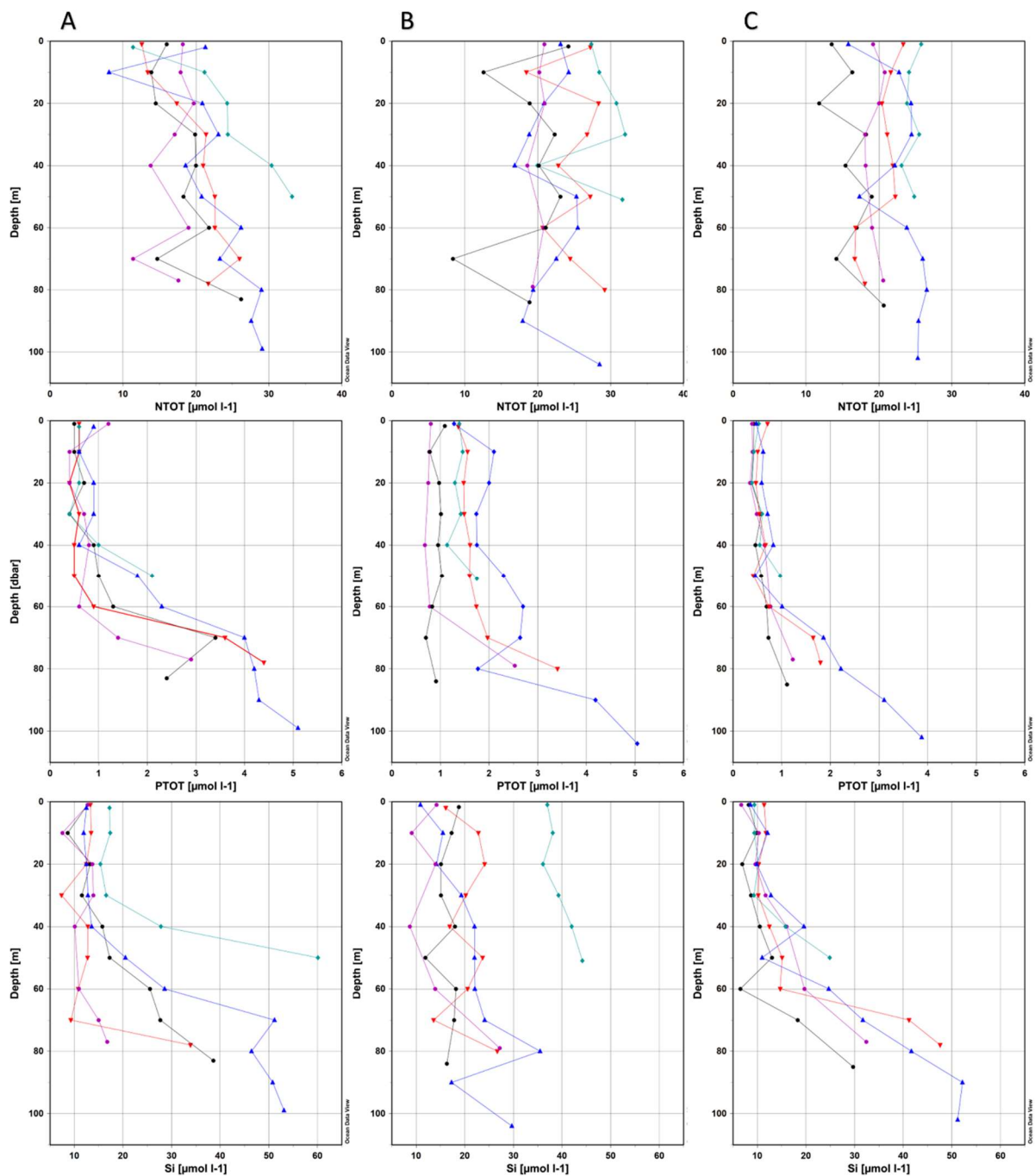


Joonis 3.3.1. Jaamad, millest koguti toitainete proove kihiti läbi kogu veesamba.

Fosfaatide (DIP) profiilide puhul on näha produktiivsele perioodile iseloomulikke madalaid väärtusi pinnakihis 2019. a septembri ja 2020. a juuli reise andmete põhjal ning kõrgemaid väärtusi allpool halokliini (kui võtta halokliini aluseks punktiks hapnikuvõla arvutuste juures toodud ~70m; joonis 3.3.2). Ka Liivi lahes on märgata kõrgemaid DIP väärtusi põhjalähedases kihis suvekuudel. Võrdluseks on 2020. a jaanuari reis, kus jaamade H1 ja G1 puhul on fosfaatide väärtused peaaegu ühtlaselt jaotunud läbi terve veesamba. Ülejäänud kolmes jaamas (17, 19, 85) esinesid kõrgemad väärtused sügavamal kui 60 m, st allpool halokliini.



Joonis 3.3.2. Anorgaaniliste toitainete vertikaalsed profiilid seirereisidest septembris 2019 (A), jaanuaris 2020 (B) ja juulis 2020 (C). Värvid vastavad joonisel 3.3.1 toodud jaamadele (jaam 17 – sinine, 19 – punane, H1 – must, 85 – lilla ja G1 – roheline).



Joonis 3.3.3. Üldainete (PTOT, NTOT) ja silikaatide (Si) profiilid reisidest septembris 2019 (A), jaanuaris 2020 (B) ja juulis 2020 (C). Värvid vastavad joonisel 3.3.1 toodud jaamadele (jaam 17 – sinine, 19 – punane, H1 – must, 85 – lilla ja G1 – roheline).

Anorgaanilise lämmastiku (DIN) moodustavate toitesoolade NO_2+NO_3 ja NH_4 kontsentratsioonide muutused olid nende ühendite jaoks erinevad sõltuvalt aastaajast ja hapnikutingimustest (joonis 3.3.2). Talvel olid NO_2+NO_3 kontsentratsioonid kõrged ja NH_4 kontsentratsioonid suhteliselt madalad

läbi kogu veesamba. Suvel (september 2019 ja juuli 2020) olid pinnakihi kõik anorgaanilised lämmastikuühendid peaaegu täielikult ära tarbitud. $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ kontsentratsiooni maksimumid esinesid suvekuudel halokliini sügavusel ja need ühendid peaaegu puudusid põhjalähedases kihis hapnikuvaeguse tingimustes. Liivi lahes, kus halokliin puudub, olid suvel maksimaalsed $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ sisaldused põhjalähedases kihis. Ammooniumi maksimum oli suvekuudel hüpoksilises kihis merepõhja lähedal ja sekundaarne maksimum esines termokliinis.

Üldlämmastiku (NTOT) vertikaalses jaotuses ei esinenud selgelt eristuvaid maksimume ja miinimume (joonis 3.3.3), v.a. veidi madalamad kontsentratsioonid pinnakihi suvekuudel. Üldfosfori (PTOT) puhul on jälgitav sama dünaamika, mis fosfaatide puhul (kuigi mitte nii selgelt väljendunud). Kõrgemad PTOT sisaldused esinesid põhjalähedases kihis ja madalamad suvekuudel pinnakihi (joonis 3.3.3).

Silikaatide sisalduse dünaamika on iseloomulik teiste anorgaaniliste ühendite dünaamikale – madalamad väärtused äratarbimise tõttu suvel pinnakihi ja kõrgemad väärtused põhjalähedases kihis. Talvel on selgelt kõrgeimad silikaatide sisaldused Liivi lahes jaamas G1, mis on iseloomulik sellele Läänemere alambasseinile võrreldes teiste piirkondadega.

3.4 Seisundihinnangud

3.4.1 Hapnikuvõlg

Varasemalt riikliku seire käigus saadud andmete põhjal, kui hapniku ja H_2S määramiseks koguti proove ainult pinnakihist ja põhjalähedasest kihist, ei ole võimalik arvutada HELCOM hapnikuvõla tuumindikaatorit järgides täpselt indikaatori metoodikat. Selleks oleks vaja kasutada kihiti mõõdetud hapniku ja H_2S sisalduse andmeid (vertikaalseid profile). Käesolevas töös leiti riikliku seire andmete põhjal hapnikuvõla väärtused põhjalähedase kihi analüüsitulemuste põhjal (tabel 3.4.1). Kokku oli kasutada 47 jaama andmed aastatest 2019-2020 (2020. a oktoobri alguse seisuga oli KESE-s andmed kuni jaanuarini 2020. a, v.a. üksikud andmed suvest 2020).

Leitud aasta keskmised hapnikuvõla väärtused 2019. aastal olid $11,84 \text{ mg l}^{-1}$ Soome lahes ja $13,76 \text{ mg l}^{-1}$ Läänemere avaosa põhjabasseinis. Kuna 2020. a kohta olid saadaval andmed ainult talveperioodist, siis jäid 2020. a hapnikuvõla väärtused madalamaks. Saadud tulemused on selgelt kõrgemad kui HELCOM tuumindikaatori läviväärtus ($8,66 \text{ mg l}^{-1}$). Samas, tuleb märkida, et ainult põhjalähedaste analüüside põhjal arvatud indikaatori väärtust ei ole mõistlik võrrelda üle ruumala keskmistatud süvakihi hapnikuvõla läviväärtusega. Väga suur erinevus Soome lahe ja Läänemere avaosa põhjabasseini tulemuste vahel on seletatav viimase basseini suurema sügavusega, st ainult põhjalähedaste analüüside tulemustest arvatud hapnikuvõlg sõltub selgelt mereala sügavusest.

Tabel 3.4.1. Hapnikuvõla väärtused põhjalähedase kihi andmete põhjal (andmed võetud KESE-st).

	GOF 2019	GOF 2020	NBP 2019	NBP 2020
Aasta keskmine hapnikuvõlg (mg l ⁻¹):	11.84	9.81	13.76	12.03
Aasta keskmine viimase mõõtepunkti sügavus (m):	78.7	90.0	104.2	109.0
Aasta profiilide arv:	26	2	21	4
Apr-okt keskmine hapnikuvõlg (mg l ⁻¹):	12.12	11.57	14.02	-
Apr-okt keskmine viimase mõõtepunkti sügavus (m):	78.3	80.0	104.5	-
Apr-okt profiilide arv:	21	1	18	-

Hapnikuvõla indikaatori arvutamise metoodika näeb ette, et kasutatakse terves veesambas mõõdetud parameetrite väärtusi. Soolsuse vertikaalse profiili põhjal leitakse halokliin ja hapnikuvõlga hinnatakse halokliini alumisest piirist kuni mere põhjani kui keskmine hapnikuvõlg kogu halokliinialuse veemassi (ruumala) kohta. Taoliselt arvutatud indikaatori väärtusi saab võrrelda välja pakutud ja HELCOM koostöö raames kokku lepitud läviväärtustega, st tulemuste abil on võimalik hinnata mereala seisundit.

Tabel 3.4.2. Keskmised hapnikuvõla väärtused koos halokliini alumise punkti keskmise sügavusega Soome lahes (GOF) ja Läänemere avaosa põhjabasseinis (NBP). HKS läviväärtus on 8.66 mg l⁻¹.

	GOF 2019	GOF 2020	NBP 2019	NBP 2020
Aasta keskmine hapnikuvõlg (mg l ⁻¹):	11.10	10.04	11.03	10.54
Aasta keskmine halokliini alumise punkti sügavus (m):	69.2	71.4	75.5	81.6
Aasta profiilide arv:	27	26	33	37
Apr-okt keskmine hapnikuvõlg (mg l ⁻¹):	11.08	10.15	11.10	10.48
Apr-okt keskmine halokliini alumise punkti sügavus (m):	68.8	71.3	75.8	80.6
Apr-okt profiilide arv:	21	25	27	30

Hapnikuvõla indikaatorit rakendati sügavamate jaamade CTD andmetele Soome lahes (14, 17, 19, E80, F1, F3, AT26) ja Läänemere avaosa põhjabasseinis (23, 25, 85, H1, H2, Ava 1, Ava 2, Ava 3, RDCP – jaamades Ava ja RDCP teostati mõõtmisi RITA programmi RITA1/02-60 "Eesti mereala keskkonna ja

loodusväärtuste hindamise ja seire innovaatilised lahendused“ raames). Hapnikuvõla indikaatori väärtuste leidmiseks oli kasutada 131 profiili, millest 8 profiili puhul halokliini ei esinenud.

Hindamisüksuste keskmised hapnikuvõla tulemused (tabel 3.4.2) näitavad, et antud tuumindikaatori kontekstis ei ole hea keskkonnaseisund saavutatud ühelgi juhul – kõik leitud indikaatori väärtused on vahemikus 10,0-11,1 mg l⁻¹, st selgelt suuremad kui läviväärtus 8,66 mg l⁻¹. Oluline on märkida, et indikaatori leitud väärtused ei muutu suurtes piirides aastate vahel ega kahe basseini vahel. Erinevus ei ole suur ka juhul, kui indikaatori väärtus on leitud jättes välja talvised mõõtmised (tabel 3.4.2 veerud, kus on toodud aprilli-oktoobri keskmised väärtused).

Kogu aasta andmete põhjal oli nii Soome lahes kui Läänemere avaosa põhjabasseinis hapnikuvõlg süvakihis suurem 2019. aastal võrreldes 2020. aastaga. See tulemus on heas kooskõlas ülalpool kirjeldatud vertikaalse stratifikatsiooni dünaamikaga – 2020. aastal oli jaanuaris ja juulis põhjalähedase kihi soolsus madalam kui eelnenud aastal ja stratifikatsioon nõrgem. Hapnikuvaegusega vee liikumine Soome lahest välja ja ajutine halokliini hävimine tingis Soome lahes suurema muutuse indikaatori väärtuses kahe aasta vahel (hapnikutingimuste ajutise paranemise) kui Läänemere avaosa põhjabasseinis.

3.4.2 Toitained ja klorofüll *a*

HELCOM toitainete ja klorofüll *a* indikaatorite väärtused leiti Soome lahele, Liivi lahele ja Läänemere avaosa põhjabasseinile käesoleva projekti raames kogutud ja analüüsitud proovide põhjal (tabel 3.4.3) ning riikliku seire andmete põhjal (tabel 3.4.4). Kõikide parameetrite jaoks leiti kõigepealt keskmised kontsentratsioonid ülemise 10 m kihi jaoks (riiklikus seires on klorofüll *a* jaoks üks väärtus integreeritud proovist). Anorgaaniliste toitainete puhul hinnati seisundit 2019. ja 2020. a talvel kogutud andmete põhjal (käesoleva projekti andmetel ainult 2020. a põhjal, sest 2019. a jaanuaris-veebruaris täiendavaid mõõtmisi veel ei tehtud). DIN ja DIP indikaatorite määramiseks leiti indikaatori väärtus hinnatava aasta talvel hindamisüksuste kaupa ja kahe aasta tulemused keskmistati. Üldlämmastiku ja üldfosfori indikaatorite väärtused leiti hindamisüksuste kaupa kogu aasta andmete põhjal (2019 ja 2020) ning kahe aasta tulemused keskmistati. Klorofüll *a* indikaatori väärtused leiti kui iga aasta suveperioodi keskmised hindamisüksuste kaupa ja tulemused keskmistati üle kahe aasta.

Kolme analüüsitud hindamisüksuse ja peaaegu kõigi indikaatorite puhul on tulemuseks mõlema andmeallika (riikliku seire ja käesoleva uuringu) alusel, et HKS ei ole saavutatud. Erandiks on üldlämmastiku indikaator, mille väärtus on väiksem läviväärtusest käesoleva projekti andmete põhjal Soome lahes ja Liivi lahes ning riikliku seire andmete põhjal ainult Liivi lahes. Tulemuse erinevus on siin seletatav tõenäoliselt erinevate perioodidega, millest andmeid kasutati – käesolevas projektis pole

2019. a talviste mõõtmiste andmeid ja riikliku seire andmete hulgas pole veel 2020. a suviseid mõõtmisi. Ainult nende perioodide kohta, kus on mõlema meetodikaga kogutud veeproovide andmed, erinevate andmemassiivide põhjal saadud seisundihinnangud omavahel ei erine.

Tabel 3.4.3. HELCOM tuumindikaatorite väärtused ja eutrofeerumise suhted aastatel 2019-2020 Soome lahes (GOF), Liivi lahes (GOR) ja Läänemere avaosa põhjabasseinis (NBP) käesoleva projekti andmete põhjal. Rohelisega on märgitud tulemused, mis vastavad HKS-ile.

Mereala/Indikaator	DIN ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	DIP ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	NTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	PTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	CHLA ($\mu\text{g l}^{-1}$)
GOF	8,82	0,99	17,98	0,89	4,10
NBP	6,10	0,60	18,17	0,56	3,87
GOR	11,52	0,98	26,25	0,77	5,23
Eutrofeerumise suhe Mereala	DIN	DIP	NTOT	PTOT	CHLA
GOF	2,32	1,67	0,84	1,62	2,05
NBP	2,10	2,39	1,12	1,47	2,34
GOR	2,22	2,38	0,94	1,10	1,94

Tabel 3.4.4. HELCOM tuumindikaatorite väärtused ja eutrofeerumise suhted aastatel 2019-2020 Soome lahes (GOF), Liivi lahes (GOR) ja Läänemere avaosa põhjabasseinis (NBP) riikliku seire andmete põhjal. Rohelisega on märgitud tulemused, mis vastavad HKS-ile.

Indikaator	DIN ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	DIP ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	NTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	PTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	CHLA ($\mu\text{g l}^{-1}$)
GOF	7,93	1,20	24,37	1,04	4,98
NBP	5,56	0,93	21,34	0,80	4,69
GOR	10,13	1,41	27,17	0,98	2,78
Eutrofeerumise suhe Mereala	DIN	DIP	NTOT	PTOT	CHLA
GOF	2,09	2,03	1,14	1,89	2,49
NBP	1,92	3,72	1,32	2,09	2,84
GOR	1,95	3,44	0,97	1,40	1,03

Ülejäänud indikaatorite tulemused annavad mõlema andmehulga põhjal seisundihinnanguks, et HKS ei ole saavutatud. Samuti on kontsentratsioonide ja eutrofeerumise suhte varieeruvus merealade

vahel sarnane mõlema andmehulga jaoks. Talvised DIN ja DIP kontsentratsioonid on ligikaudu kaks korda kõrgemad kui vastavad läviväärtused. Riikliku seire andmetel oli Läänemere avaosa põhjabasseinis ja Liivi lahes fosfaatide kontsentratsioon isegi kolm korda kõrgem kui läviväärtus, mis on tõenäoliselt tingitud 2019. a talvel nende piirkondade seirejaamades riikliku seire raames registreeritud väga kõrgete kontsentratsioonidega (käesoleva projekti raames 2019. a talvel lisamõõtmisi ei tehtud).

Üldfosfori aasta keskmiste ja klorofüll *a* suviste keskmiste puhul on indikaatorite tulemused samuti peaaegu kaks korda suuremad kui vastavad läviväärtused. Suuremad üldfosfori väärtused riikliku seire põhjal Liivi lahes ja avameres on tingitud analoogselt DIP väärtustele kõrgetest kontsentratsioonidest 2019. a talvel, mil täiendavaid mõõtmisi käesoleva projekti raames veel ei tehtud. Klorofüll *a* indikaatori läviväärtust kaks korda ületav tulemus Liivi lahes käesoleva projekti andmetel on põhjustatud seal juulis 2020. a mõõdetud väga kõrge klorofüll sisaldusega.

3.5 Toitainete koguhulgad

Toitainete koguhulgad basseinides ja nende muutlikkus annab informatsiooni toitainete varude, välise ja sisemise koormuse ning voogude kohta erinevate Läänemere basseinide ning rannikumere veekogumite ja avamere vahel. Kui mõõta toitainete kontsentratsiooni ainult mere pinnakihis (1-10 m) ja põhjalähedasel horisondil, ei ole võimalik kuigi usaldusväärselt ainete koguhulkasid hinnata. Käesoleva projekti raames kihiti kogutud veeproovide analüüsi tulemuste abil koostati taolised hinnangud kasutades basseinide topograafia infot, st hüpsograafilisi kõveraid (vt ptk 2.3.5.3). Tabelis 3.5.1 on toodud kolme seirereisi andmetel hinnatud toitainete koguhulgad Soome lahes, Läänemere avaosa põhjabasseinis ja Liivi lahes septembris 2019, jaanuaris 2020 ja juulis 2020. Soome lahes on hinnatud koguhulkasid jaamade 17 ja 19, Läänemere avaosa põhjabasseinis jaamade H1 ja 85 ning Liivi lahes jaama G1 andmetel. Tulemuste interpreteerimisel tuleb arvestada, et hinnangud on tehtud väga väikese arvu jaamade andmetel ega kasutatud andmeid Läänemere avaosa põhjabasseini sügavamatest piirkondadest (sh jaamast H2).

Toitainete koguhulkade väärtused ja sesoonsed muutused nendes on suuruselt võrreldavad või ületavad toitainete välise koormuse väärtusi vastavatele HELCOM basseinidele (mõeldud on koormusi HELCOM basseinidele koos rannikumerega). Näiteks Soome lahe avaosas (hinnangualas) muutusid üldlämmastiku ja üldfosfori koguhulgad vastavalt vahemikus 242-289 ja 20,5-50,3 tuh tonni ning sissekanne maismaalt vee või õhu kaudu Soome lahele (2014. a andmetel; vt HELCOM, 2018g) oli 112 tuh tonni NTOT aastas ja 4,4 tuh tonni PTOT aastas. Vastavad toitainete koguhulgad ja koormused Liivi lahele olid 65-86 tuh tonni NTOT ja 3,1-8,8 tuh tonni PTOT ning 83 tuh tonni NTOT aastas ja 2,3 tuh

tonni PTOT aastas. Võrreldes nendes avamere basseinides veesambasse akumulatsioonid toitainete koguhulkadega on Eestist pärinev koormus suhteliselt väike – 2014. a andmetel oli toitainete koormus Eestist kogu Läänemerele (vee ja õhu kaudu) kokku 25 tuh tonni NTOT aastas ja 0,4 tuh tonni PTOT aastas.

Tabel 3.5.1. Toitainete koguhulgad Eestiga piirnevate avamere alade veesambas seirereisides käesoleva projekti raames kogutud andmetel septembris 2019, jaanuaris 2020 ja juulis 2020. Tulemused on toodud Soome lahe (GOF), Liivi lahe (GOR) ja Läänemere avaosa põhjabasseini (NBP) kohta. *Ruumala vastab hinnanguala ruumalale, mis on väiksem kui kogu basseini ruumala (ei hõlma rannikumerd, vt joonis 2.2.1).

Mereala	Ruumala* (km ³)	Kuu	Si (10 ³ t)	DIN (10 ³ t)	NTOT (10 ³ t)	DIP (10 ³ t)	PTOT (10 ³ t)
GOF	898	09.2019	379	54	242	15,4	28,7
		01.2020	494	108	289	25,9	50,3
		07.2020	375	42	274	17,7	20,5
NBP	1407	09.2019	469	45	343	18,6	34,9
		01.2020	625	114	426	29,8	46,3
		07.2020	595	47	388	24,0	29,6
GOR	209	09.2019	101	8	65	1,3	3,8
		01.2020	225	34	86	6,5	8,8
		07.2020	60	4	73	1,2	3,1

Pikaajaliste, piisaval arvul jaamades kihiti määratud toitainete kontsentratsioonide andmete olemasolul oleks võimalik kokku viia toitainete välise koormuse muutused ja sisemised vood, mis aitaksid paremini kavandada vajalikke meetmeid eutrofeerumise mõjude vähendamiseks ja hinnata ka ajanihet, mille jooksul meetmete mõju merekeskkonnas avaldub. Toitainete koguhulkade ja kontsentratsioonidel põhinevate indikaatorite dünaamika võrdlus näitab, et anorgaaniliste ühendite koguhulkadest arvutatud kontsentratsioonid basseinides talvel ning DIN ja DIP indikaatorid, mis on saadud vaid pinnakihi seirereisides mõõdetud andmete põhjal, lähevad suhteliselt hästi kokku (tabel 3.5.2). Üldainete kontsentratsioonid, mis on saadud koguhulkade põhjal või ainult pinnakihi mõõdetud sisalduste keskmistamisel (NTOT ja PTOT indikaatorid), erinevad omavahel. Sügavamates basseinides on koguhulkadel põhinevad kontsentratsioonid (st arvesse on võetud kihiti määratud toitainete sisaldused) suuremad kui ainult pinnakihist läbi aasta keskmistatud kontsentratsioonid.

Silikaatide koguhulgad on sesoonselt väga muutuvad Liivi lahes, kus esinevad ka talvel kõige kõrgemad kontsentratsioonid, mis vegetatsiooniperioodil suuresti ära tarbitakse (v.a. süvakiht, kus kontsentratsioonid suvel võivad kasvada). Kuna eufootsest kihist allpool on sügavamates basseinide silikaatide kontsentratsioon läbi aasta suhteliselt ühtlane, muutuvad nendes koguhulgad sesoonselt alla 25%.

Tabel 3.5.2. DIN ja DIP indikaatorite väärtuste (määratud seirereisides pinnakihist kogutud veeproovide analüüside põhjal) ja toitainete koguhulkadest arvatud anorgaaniliste ühendite kontsentratsioonide võrdlus Soome lahes (GOF), Liivi lahes (GOR) ja Läänemere avaosa põhjabasseinis (NBP) 2020. a talve andmetel.

Mereala/Indikaator	DIN ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	DIN ($\mu\text{mol l}^{-1}$) koguhulgast	DIP ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	DIP ($\mu\text{mol l}^{-1}$) koguhulgast
GOF	8,8	8,6	0,99	0,93
NBP	6,1	5,8	0,60	0,68
GOR	11,5	11,4	0,98	0,98

Tabel 3.5.3. NTOT ja PTOT indikaatorite väärtuste (määratud seirereisides pinnakihist kogutud veeproovide analüüside põhjal) ja toitainete koguhulkadest arvatud üldainete kontsentratsioonide võrdlus Soome lahes (GOF), Liivi lahes (GOR) ja Läänemere avaosa põhjabasseinis (NBP) 2019.-2020. a andmete põhjal.

Mereala/Indikaator	NTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	NTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$) koguhulgast	PTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	PTOT ($\mu\text{mol l}^{-1}$) koguhulgast
GOF	18,0	21,4	0,89	1,19
NBP	18,2	19,8	0,56	0,85
GOR	26,3	25,5	0,77	0,81

Tabelis 3.5.4 on toodud analoogselt tabelis 3.5.1 esitatud tulemustele arvatud toitainete koguhulgad Soome lahe ja Läänemere avaosa põhjabasseini kohta, kuid hinnangusse on kaasatud ka riikliku keskkonnaseire avamere seires eksperimentaalselt kihiti kogutud proovide analüüside tulemused jaamades N12 (soome lahes) ja H2 (Läänemere avaosa põhjabasseinis). Toitainete koguhulkade hinnangud Soome lahes oluliselt ei muutu (10% piires), sest lisatud jaama N12 andmed on suhteliselt madalalt merealalt ja kontsentratsioonid teiste seirejaamadega (17 ja 19) võrreldes oluliselt ei erine.

Suur erinevus koguhulkades (ca 2 korda) on aga Läänemere avaosa põhjabasseinis. See on tingitud asjaolust, et tabelis 3.5.4 hinnangutes on arvesse võetud ka Eesti merealasse jääva suurima sügavusega seirejaama H2 tulemused – nii ruumala, milles koguhulkasid hinnatakse, kui ka koguhulgad on suuremad kas kaks korda või enam. Samuti on sügava jaama andmete kaasamine viinud tunduvalt väiksemaks sesoonse suhtelise muutuse koguhulkades. Seepärast on otstarbekas koguhulkade hindamiseks jätkata kihiti toitainete andmete kogumist just basseinide sügavamates jaamades. Parimad hinnangud saab pannes kokku erinevate riikide seireandmed kogu hinnatava avamere basseini ulatuses.

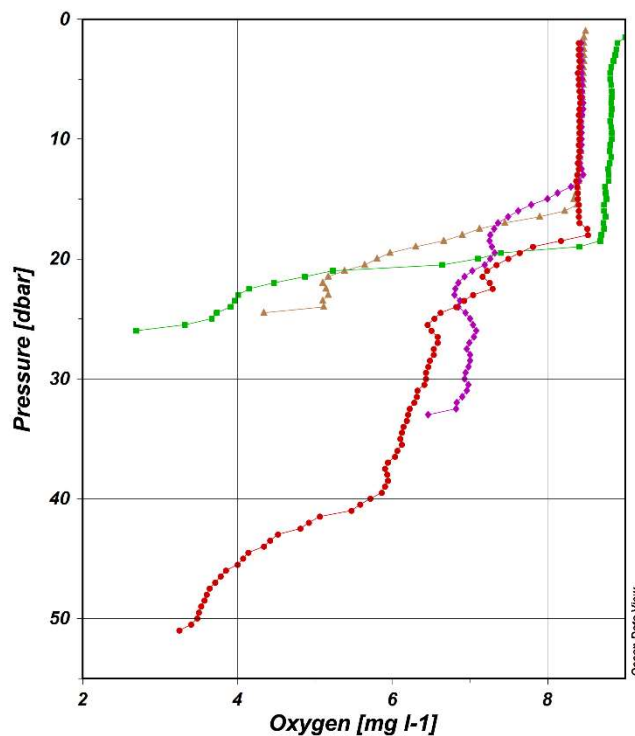
Tabel 3.5.4. Toitainete koguhulgad Eestiga piirnevate avamere alade veesambas seirereisides käesoleva projekti ja riikliku keskkonnaseire raames kogutud andmetel septembris 2019 ja jaanuaris 2020. Tulemused on toodud Soome lahe (GOF) ja Läänemere avaosa põhjabasseini (NBP) kohta, kus täiendavalt (võrreldes tabelis 3.5.1 toodud tulemustega) lisati vastavalt jaamade N12 ja H2 andmed. *Ruumala vastab hinnanguala ruumalale, mis on väiksem kui kogu basseini ruumala (ei hõlma rannikumerd, vt joonis 2.2.1).

Mereala	Ruumala* (km ³)	Kuu	Si (10 ³ t)	DIN (10 ³ t)	NTOT (10 ³ t)	DIP (10 ³ t)	PTOT (10 ³ t)
GOF	905	09.2019	347	52	256	16,2	26,0
		01.2020	519	110	312	27,1	43,9
NBP	2870	09.2019	2052	195	810	139	171
		01.2020	1938	232	862	134	163

3.6 Hapniku ja klorofüll *a* fluorestsentsi vertikaalsed jaotused

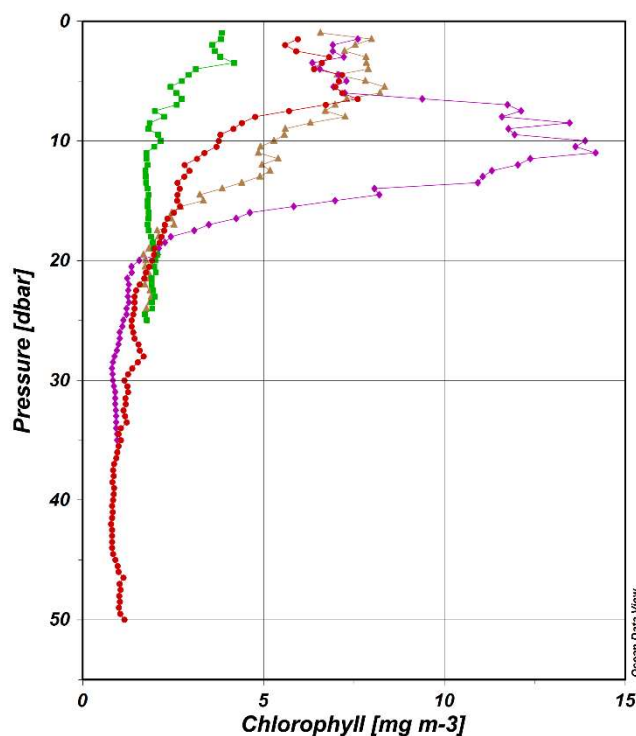
Kaasaegsed CTD sondid on varustatud lisaks rõhu, temperatuuri ja elektrijuhtivuse anduritele ka täiendavate anduritega, sh lahustunud hapniku sisalduse, klorofüll *a* fluorestsentsi, hägususe ja muude parameetrite määramiseks. Hapniku ja fluorestsentsi mõõtmised annavad kasulikku informatsiooni merekeskkonna seisundi hindamiseks eutrofeerumise kontekstis. Aruande ptk 3.4.1 on toodud hapniku vertikaalsetest profiilidest tuletatud hapnikuvõla indikaatoril põhineva seisundi hinnangu tulemused kolmes vaadeldavas basseinis. Lisaks nimetatud indikaatorile annavad vertikaalsed hapniku profiilid võimaluse hinnata keskkonnaseisundit ka teiste välja pakutud indikaatorite abil, nagu hapniku tarbimine termokliini ja halokliini vahelises kihis (Stoicescu et al., 2019) ja madala mere hapniku

indikaator (TTÜ, 2019). Ainuüksi põhjalähedase hapniku analüüsi põhjal jääb nägemata ja arvesse võtmata basseinate hüpoksilise ala ulatus (või ruumala), sest puudub informatsioon hapniku vertikaalse jaotuse kohta.



Joonis 3.6.1. Lahustunud hapniku sisalduse vertikaalsed profiilid Liivi lahe seirejaamades 2020. a augustis. Jaamade asukohad on toodud joonisel 2.3.1. Värvid vastavad jaamadele järgmiselt: G1 – punane, 107 – roheline, 111 – lilla, 114 - kuldne.

Joonisel 3.6.1 toodud lahustunud hapniku sisalduse vertikaalsed profiilid Liivi lahes augusti seirereisis 2020. aastal näitavad, et hapniku kontsentratsioon langeb merepõhja lähedal alla 4 mg l⁻¹ (üks võimalikest läviväärtustest, mida kasutada Läänemeres madalate piirkondade hapniku indikaatori jaoks) kahes jaamas sõltumata koha sügavusest. Antud näites on madalaim hapniku kontsentratsioon jaamas 107, mis asub Liivi lahe idaosas. Samuti on näha sügavaima jaama vahekihis (jaam G1) madalamat hapniku sisaldust kui vastaks 100% küllastusele. See tähendab, kirjeldatud jaotused annavad olulist informatsiooni sesoonse hapniku tarbimise ja madala hapniku sisalduse ruumilise jaotuse kohta. Vertikaalsete profiilide kasutamiseks on vajalik ainult teatud piiratud hulga veeproovide analüüsi teostamine, et tagada nende andmete kvaliteet.



Joonis 3.6.2. Klorofüll *a* sisalduse vertikaalsed profiilid Liivi lahe seirejaamades 2020. a juulis. Jaamade asukohad on toodud joonisel 2.3.1. Värvid vastavad jaamadele järgmiselt: G1 – punane, 107 – roheline, 111 – lilla, 114 - kuldne.

Joonisel 3.6.2 esitatud klorofüll *a* sisalduse vertikaalsed jaotused näitavad, et ühe piiratud ala ulatuses võivad klorofüllis sisaldus ja selle vertikaalne jaotus varieeruda väga suurtes piirides. Oluline on tähele panna, et mitte alati ei ole kõige suuremad kontsentratsioonid mere pinna lähedal, vaid võivad esineda ka sügavamal. Üldise klorofüllis sisalduse või produktsiooni hindamiseks (milleks klorofüllis mõõdetakse) on selline muutlikkus vaja arvesse võtta. Ka siin on vajalik registreeritud fluorestsentsi profiilide konverteerimiseks teatud hulga klorofüllis laboratoorsete analüüside teostamine. Selleks ei sobi siiani mereseire riiklikus programmis ette nähtud integreeritud proovide analüüsid, sest vastavusse tuleb viia samal sügavusel mõõdetud ja proovist määratud klorofüllis väärtused.

4 Analüüs

4.1 Lahustunud hapniku sisaldus

HELCOM seirejuhend lahustunud hapniku sisalduse mõõtmiseks merevees (HELCOM, 2018h) näeb ette veeproovide kogumise standardsügavustel ja laboratoorselt hapniku sisalduse määramise, kusjuures baasmeetodiks peab olema Winkleri meetod. Lisaks soovitatakse igas seirejaamas CTD sondiga registreerida lahustunud hapniku profiil. Eesti riiklikus mereseire programmis on siiani mõõdetud hapniku sisaldust pinnakihis ja põhjalähedases kihis kogutud veeproovidest. Vertikaalsete profiilide registreerimine ei ole kohustuslik ka keskkonnaministri 03.10.2019 määruse nr 49 „Proovivõtumeetodid“ (RT I, 08.10.2019, 1; <https://www.riigiteataja.ee/akt/108102019001>) alusel, kuigi lahustunud hapniku sisalduse mõõtmise veeproovi võtmisel näeb nimetatud määrus ette. Samas on alati registreeritud ka hapniku profiil CTD sondi abil, kuid nende andmete kvaliteedi tagamine ja andmete esitamine seire infosüsteemi ei ole olnud seirelepingute osaks. Allpool analüüsime plusse ja miinuseid erinevate lähenemiste rakendamisel seireprogrammis, et tagada piisav andmestik seisundi hindamise indikaatorite kasutamiseks ja veesamba elupaiga tingimuste iseloomustamiseks.

4.1.1 Tuumindikaator 'Hapnikuvõlg'

HELCOM hapnikuvõla tuumindikaatorit on võimalik kasutada piisava sügavusega merealadel, kus kogu aeg või vähemalt enamuse ajast eksisteerib halokliin. Kuna halokliin on sügavustel 60-80 m, siis peaks ka basseini sügavus olema vähemalt teatud ulatuses üle 80 m. Eestit ümbritsevatest merealadest on need avamere hindamisüksused Soome laht (GOF), Läänemere avaosa põhjabassein (NBP) ja Ida-Gotlandi bassein (EGB). Käesoleva projekti raames arvutati hapnikuvõlg kasutades ainult põhjalähedase kihi andmeid (riikliku programmi andmed) ja kasutades CTD sondiga registreeritud lahustunud hapniku sisalduse profiile ning allpool halokliini kihiti kogutud veeproovidest määratud H₂S kontsentratsioonid. Saadud tulemused erinevad süstemaatiliselt, st ainult põhjalähedaste analüüside andmetest arvutatud hapnikuvõlg on suurem ja tulemused suurema varieeruvusega kui CTD profiilide põhjal saadud indikaatori väärtused, mis on saadud üle ruumala keskmistatud hapnikuvõlana.

Oluline probleem ainult põhja lähedalt võetud proovide põhjal arvutatud indikaatori puhul on see, et tulemusi ei saa võrrelda HELCOM tuumindikaatori läviväärtusega. HELCOM indikaatori läviväärtus on välja töötatud ja rakendatav kogu halokliini alusele, üle ruumala keskmistatud hapnikuvõlale. See tähendab, pinnakihist ja põhjalähedasest kihist määratud lahustunud hapniku sisalduse andmed ei ole piisavad HELCOM tuumindikaatori arvutamiseks ja kasutamiseks. Kui seire teostamisel jääda siiani kasutatava metoodika juurde, peab hinnatavatele merealadele vastavad läviväärtused ainult põhjalähedase kihi hapnikuvõla jaoks alles välja töötama. Arvestades aga käesolevas töös näidatud

suuremat muutlikkust tulemustes võrreldes tuumindikaatori meetodikat järgivate tulemustega ja CTD sondiga mõõdetud profiilide võimalikku kasutamist ka muudel eesmärkidel või indikaatorite jaoks (hapniku tarbimine vahekihis, madala mere hapniku indikaator jmt) on soovitatav üle minna meetodikale, mis näeb ette lahustunud hapniku sisalduse profiilide registreerimise ja kihiti kogutud H₂S analüüside teostamise.

Metoodika sisaldaks igas avamere seirereisis terve veesamba profileerimist kõikides seirejaamades, sealhulgas vähemalt kolmes sügavas jaamas (sügavusega üle 80 m) hinnatava mereala kohta. Kuna hapnikuvõla tuumindikaatori väärtused kahel vaadeldud aastal (mõlemal aastal kasutati viie seirereisi andmeid) olid suhteliselt püsivad vaatamata halokliini ja stratifikatsiooni varieerumisele aastate vahel, võib väita, et seireks piisab siiani riiklikus mereseire allprogrammis olevast kuuest reisist aastas. CTD sondidega registreeritakse temperatuuri, soolsuse ja hapniku vertikaalsed profiilid ning kogutakse reisi kohta piisav arv veeproove hapniku laboratoorseks analüüsiks, sh proovid põhjalähedasest veekihist. Analüüsid teostatakse koheselt laeva pardal. CTD sondiga mõõdetud hapniku sisalduse andmete kvaliteet tagatakse akrediteeritud meetodite järgimisega seire teostaja poolt. Allpool halokliini hüpoksia esinemisel kogutakse kihiti (10 m sammuga ja põhjalähedasest kihist) veeproovid ka H₂S sisalduse määramiseks.

Eestikeelne indikaatori nimetus võiks olla „Süvavee hapnikuvõlg“, mis iseloomustab indikaatorit paremini. Nimest lähtub, et tegu ei ole madala mere indikaatoriga ja indikaatorit arvutatakse kogu süvakihi, mitte ainult põhjalähedase kihi kohta. Kuna praegustel andmetel ei ole mingeid argumente, miks HELCOM koostöö raames välja pakutud läviväärtusi peaks muutma, siis on ettepanek lähtuda nendest läviväärtustest. Ka indikaatori hindamistulemused on kahe hinnatud basseini jaoks sarnased ja toetavad sarnase läviväärtuse kasutamist vähemalt Läänemere avaosa põhjabasseinis ja Soome lahes. Indikaatori kirjeldus on toodud vastaval vormil aruande Lisas 3.

4.1.2 Hapniku vertikaalsete profiilide rakendamine teiste seisundi hindamise indikaatorite ja veesamba elupaiga iseloomustamise eesmärgil

Käesolevas töös on näidatud, et kui kasutada viie seirereisi hapniku vertikaalsete profiilide ja kihiti määratud H₂S andmeid, siis arvutatud hapnikuvõla tuumindikaatori väärtused kahel vaadeldud aastal oluliselt ei muutunud. See tähendab, et ülalpool väljapakutud seiremetoodika sobib hapnikuvõla kaudu keskkonnaseisundi hindamiseks. Samas ei ole HELCOM tuumindikaator rakendatav madalamatel, ainult sesoonselt kihistunud veesambaga merealadel, mille jaoks oleks vaja kehtestada oma indikaatorid. Lisaks võib hapniku vertikaalseid profile kasutada ka hapnikuvaegusega ala ulatuse või ruumala hindamiseks, mis on veesamba elupaiga üheks oluliseks iseloomustajaks.

Madala mere hapnikusisalduse indikaatori väljatöötamine HELCOM raames on käivitunud ja indikaatori kirjelduse ning läviväärtuste osas on plaanis kokkuleppele jõuda 2021.-2022. a jooksul. Hiljuti Tallinna Tehnikaülikooli poolt läbi viidud analüüsi põhjal (TTÜ, 2019) on välja pakutud madala mere hapnikusisalduse indikaator, milleks kasutatakse põhjalähedase kihi hapnikusisalduse andmeid sesoonselt stratifitseeritud piirkondadest. Madala mere hapnikusisalduse indikaatori, mis on defineeritud kui aasta minimaalsete hapnikusisalduse väärtuste mediaankeskmine 6-aastase perioodi jooksul, HKS läviväärtuseks on pakutud 4 mg l^{-1} . Kui hinnataval merealal on vähemalt 3 seirejaama ja seirereisid toimuvad nii juulis kui augustis, siis on andmehulk piisav usaldusväärse hinnangu andmiseks 6-aastase perioodi jaoks. Kui eesmärgiks on hindamine ka lühemate perioodide jooksul (aasta), siis on vajalik andmehulka, st kas seirejaamade arvu või mõõtmiste sagedust suurendada. Arvestades, et suure tõenäosusega võivad halvimald hapnikutingimused esineda ka septembris, mil väljaspool rannikumerd seirereise ei toimu, ning pikema kui üks kuu sammuga seires võivad ka suhteliselt pikad hüpoksia perioodid jääda tähelepanuta, oleks seiresageduse tõstmine eelistatuim variant. Ühe lahendusena võib välja pakkuda vertikaalsete profileerijate kasutamise ja nende andmete kombineerimise seirereiside käigus kogutud andmetega. Sellist lähenemist võiks kasutada näiteks Liivi lahes ja Narva lahes, mis on suurimad sesoonselt kihistunud (kuid halokliinita) merealad väljaspool Eesti rannikumerd. Suure sagedusega vertikaalsete profiilide registreerimist ja nende kasutamist, näiteks hapniku tarbimise indikaatori arvutamiseks, on välja pakutud ka sügavamate merealade jaoks (Stoicescu et al., 2019).

Veesamba elupaigale olulise karakteristiku – hapnikuvaegusega (kas hüpoksia või anoksia) ala ruumala määramine vajab samuti vertikaalset jaotust kirjeldavate andmete olemasolu. Põhjalähedase hapnikusisalduse abil saab ligikaudu hinnata hüpoksia pindala. Hapniku vertikaalsete profiilide abil, mis võivad olla väga erineva kujuga, st hüpoksia võib ilmned samal ajaperioodil erinevates jaamades väga erinevatel sügavustel (vt joonis 3.6.1), saab hinnata lisaks ka hüpoksilise kihi ruumala. Metoodika halokliini aluse hüpoksilise kihi ruumala määramiseks Läänemere avaosas pakutakse välja RITA programmi projekti RITA1/02-60 "Eesti mereala keskkonna ja loodusväärtuste hindamise ja seire innovaatilised lahendused" raames. Soome lahe jaoks on Stoicescu et al. (2019) välja pakkunud meetodi seirereisides kogutud hapniku vertikaalsete profiilide ja ühes punktis suure sagedusega vertikaalsete profiilide (Keri põhjajaam) kombineerimise teel hüpoksia ulatuse ja selle muutuste hindamiseks. Analooget lähenemist saab kasutada madalatel, sesoonselt stratifitseeritud merealadel, kus hüdrometeoroloogilised tingimused võivad põhjustada hapnikutingimuste lühiajalise (1-2 nädalat) halvenemise ja mis muidu jääks märkamata.

Oluline on rõhutada, et profiilide suure sagedusega kogumine ühes-kahes seirejaamas ei asenda seirereisides hapniku vertikaalsete jaotuste registreerimist, vaid need lähenemised täiendavad

üksteist. Eesti merealal oleks optimaalne ühe profileerija paigutamine Liivi lahte ja ühe paigutamine Narva lahte. Muutliku halokliiniga Soome lahe sügavama piirkonna jaoks oleks parimaks lahenduseks Keri saare lähedal 110 m sügavusel oleva 2016. aastast alates töötava põhja paigaldatud profileerija andmete kasutamine veesamba elupaiga tingimuste, st hüpoksilise ala ruumala ja selle muutuste hindamiseks.

4.2 Toitained

Kuna toitainete sisaldusel põhinevad indikaatorid kasutavad andmeid ainult 10 m paksusega ülemisest kihist, kus Eesti riikliku seire metoodika vastab HELCOM metoodikale, siis uue metoodika rakendamine (allpool veesambas kihiti proovide kogumine) ei muuda seisundi hindamises midagi. Käesolevas töös läbi viidud võrdlus, kui kasutada andmeid 1, 5 ja 10 m sügavuselt või ainult 1 ja 10 m sügavuselt näitas, et see ei põhjusta indikaatorite tulemuste erinevust – näiteks DIN ja DIP hinnangud 2020. a jaanuari andmetel olid mõlemal juhul lähedased. Peamiseks erinevuste põhjuseks riikliku seire ja käesoleva projekti raames kogutud andmetest indikaatorite arvutamisel oli andmete kasutamine erinevatest perioodidest. Selline olukord võib tekkida, kui näiteks mingil aastal talvised mõõtmised ebaõnnestuvad, mis ei võimalda talvistel sisaldustel põhinevate DIN ja DIP indikaatorite kasutamist või mis mõjutab oluliselt aasta keskmistel üldainete kontsentratsioonidel põhinevate indikaatorite väärtusi. Seepärast on seires väga oluline järgida põhimõtet, et aasta keskmistel väärtustel arvutavate indikaatorite jaoks oleks kasutada mõõtmised kõikidest aastaegadest.

Käesoleva töö käigus koguti valitud seirejaamades veeproove kihiti, mis annab võimaluse veesamba elupaiga tingimuste ja toitainete ringkäigu, st voogude ja transformeerumise detailsemaks kirjeldamiseks. Toitainete vertikaalsed jaotused näitavad nende sesoonset dünaamikat, ühendite akumulatsioonist teatud veekihtides ja kontsentratsioonide suurenemist või vähenemist sõltuvalt hapnikusisaldusest ja selle dünaamikast (vt ptk 3.3). Veesamba elupaiga tingimuste ja eutrofeerumise mõju mõttes on olulised näiteks fosfaatide sisalduse kasv põhjalähedases kihis setetest vabanemise tagajärjel ja ammoniumi kontsentratsiooni kasv termokliini sügavusel suvel (vt joonis 3.3.2). Ainult põhjalähedastelt horisondilt võetud veeproovide andmetel (kui puuduvad kihiti võetud proovid) on võimalik näha fosfaatide sisalduse suurenemist hüpoksia tingimustes, kuid puudub võimalus hinnata setetest vabanenud fosfori hulka. Oluline täiendus seireprogrammi selle eesmärgi täitmiseks (sisemise koormuse hindamiseks) oleks teatud kohtades fosfaatide sisalduse autonoomsete mõõtmiste käivitamine (TTÜ, 2019). Kombineerides taolisi autonoomseid mõõtmisi seirereisides kihiti määratud toitainete analüüsitulemustega on võimalik tunduvalt suurendada sisemise koormuse hinnangu

usaldusväärsust, mis praegusel ajal ei ole kõrge, sest erinevad hinnangud lahknevad 1-2 suurusjärgu võrra (Lips et al. 2017).

Toitainete sisalduse vertikaalsete jaotuste abil on võimalik hinnata toitainete koguhulkasid, mis omakorda annavad informatsiooni varude, välise ja sisemise koormuse ning voogude kohta erinevate Läänemere basseinide ning rannikumere veekogumite ja avamere vahel. Kuigi taolised hinnangud aitaksid pikas perspektiivis paremini kavandada vajalikke meetmeid eutrofeerumise mõjude vähendamiseks ja on olnud aluseks kehtiva Läänemere tegevuskava väljatöötamisel, on hinnangute tulemused erinevate lähenemiste ja andmehulkade kasutamisel jäänud andmete puudulikkuse tõttu suhteliselt laiadesse piiridesse (Savchuk 2018). Käesolevas töös on näidatud, et lämmastiku aastane väline koormus (kõikidest allikatest läbi vee ja õhu) Liivi lahele on võrreldav ja Soome lahele on kaks korda väiksem kui toitainete koguhulkade sesoonse amplituud veesambas (tuletame meelde, et koguhulgad on arvatud ainult avamere hindamisüksuse jaoks). Fosfori puhul on aastased välised koormused nimetatud basseinidele mitmeid kordi väiksemad kui selle toitainete sesoonse käigu amplituud. See tähendab, et eutrofeerumise mõju detailseks analüüsiks ning akumuliseerunud ja veesambas ringluses olevate toitainete voogude/transformeerumise jaoks on oluliselt tähtsad toitainete kihiti määratud andmed. Arvestades, et eutrofeerumise mõjude tulevikustsenaariume hinnatakse matemaatiliste mudelitega (näiteks Eilola et al. 2011), oleksid kihiti määratud toitainete kontsentratsioonid ja arvatud koguhulgad ka väga oluliseks mudelite valideerimise andmeteks (mis praegu Eesti vetest viimasest perioodist puuduvad).

Läänemere avaosa põhjabasseinis ei mõõdetud MSI poolt täiendavalt toitaineid kihiti seireala suurima sügavusega jaamast H2. Samuti oli Soome lahes kasutada ainult kahe suhteliselt lähestikku asetseva seirejaama andmed (17 ja 19) ja puudusid andmed lääne- või idapoolsetest jaamadest. Et näidata, kui palju mõjutab tulemusi toitainete vertikaalse jaotuse andmete kaasamine sügavaimast jaamast või laiema geograafilise katvusega, tehti täiendavalt toitainete koguhulkade arvutused kaasates riikliku seire andmeid. Tulemused näitavad teatud erinevusi koguhulkade osas, kuid nende põhjal arvatud keskmised kontsentratsioonid on sarnased. Järelikult on isegi suhteliselt piiratud arvu jaamade toitainete kontsentratsioonide põhjal, mis on määratud kihiti pinnakihi kuni halokliini aluse süvakihini, toitainete koguhulkade hindamine väga kasulik seisundi analüüsi ja prognoosi jaoks. Koguhulkade täpsemaks hindamiseks on vajalik koostöö naaberriikidega. Eesti merealal võiks Soome lahes olla seirejaamadeks, kus kihiti määratakse toitaineid N12, 17 ja 19 või sellest lääne poole paigutatav sügavam seirejaam. Läänemere avaosa põhjabasseinis vähemalt jaamad H1, H2 ja 85. Liivi lahes oleks vähemalt jaam G1 ning jaamad 107 ja 111, kus oleks vaja lisada ainult üks analüüs. Hea oleks saada analoogsed andmed ka Läti vetest Liivi lahe suhteliselt sügavas osas. Ida-Gotlandi basseinis

on Eesti vetes ainult üks sügavam seirejaam (32) ja selles basseinis koguhulkade hindamiseks on oluline koostöö seal seiret teostavate teiste riikidega.

Silikaatide sisalduse põhjal keskkonnaseisundit Läänemeres ei hinnata. Samas on need ühendid vajalikud ränivetikate kevadõitsengu kujunemisel, mis on olulised kogu mere toiduvõrgu funktsioneerimise seisukohalt. Wasmund et al. (2013) on välja pakkunud, et ränivetikate õitsengu maksimumi võiks kõige paremini hinnata silikaatide tarbimise, st silikaatide talviste ja hiliskevadiste kontsentratsioonide vahe abil. Sarnaselt teistele toitainetele annaks silikaatide sisalduse määramine kihiti kogutud proovidest nii koguhulkade kui võimalike hinnangute jaoks parimad tulemused.

4.3 Klorofüll a

Riikliku seire raames rakendatav metoodika, mille järgi klorofüll a analüüsid teostatakse integreeritud proovist (1-10 m), ei vähenda oluliselt klorofüll a indikaatori (sh HELCOM tuumindikaatori) abil seisundi hindamise usaldusväärsust, sest ka ühes jaamas eraldi tehtud analüüside tulemused keskmistatakse indikaatori arvutamisel kõigepealt kokku ja jaamade pinnakihi keskmistest arvutatakse indikaatori väärtus. Kuid selliselt kogutud andmed ei ole kasutatavad fluorestsentsi profiilide kalibreerimiseks ega anna informatsiooni sügavamal kui 10 m paiknevate klorofüll a maksimumide kohta.

CTD sondidega ühendatud fluorimeetrid võimaldavad hinnata klorofüll a sisalduse vertikaalset jaotust veesambas, mis annab täiendavat informatsiooni veesamba elupaiga tingimuste kohta. Esiteks on võimalik korrektselt mõõdetud ja konverteeritud fluorestsentsi andmete abil tekitada juurde klorofüll a sisalduse hinnanguid ka nendes jaamades (või kasutades ka läbivoolusüsteemidega mõõdetud klorofüll a fluorestsentsi andmeid), kus klorofüll a proove laboratoorseteks analüüsideks ei kogutud. Teiseks näitavad taoliselt saadud klorofüll a profiilid pinnaaluste maksimumide esinemist, mida ei ole võimalik registreerida kaugseire abil, ja seeläbi võimaldavad täpsemalt hinnata fütoplanktoni kogubiomassi või produktsiooni. Heaks näiteks on joonisel 3.6.2 toodud klorofüll a profiilid, kus jaamades 111, 107 ja G1 on pinnakihis sarnased kontsentratsioonid ca 7 mg m^{-3} , kuid jaamas 111 on sügavuste vahemikus 7-15 m klorofüll a maksimum sisaldusega kuni 14 mg m^{-3} . Integreeritud proovist määratud klorofüll a sisaldus jaamas 111 oli riikliku seire andmetel $8,1 \text{ mg m}^{-3}$, mis vastab profiilile väga hästi (st klorofüll a indikaatori arvutamiseks on see väga hästi kasutatav). Samas ainult integreeritud tulemus ei võimalda täiendavat analüüsi, näiteks kui eesmärgiks on hinnata kogu ülemise kihi fütoplanktoni biomassi/produktsiooni.

Klorofüll a analüüsitulemuste andmed fikseeritud sügavustelt võimaldavad viia vastavusse samal sügavusel mõõdetud fluorestsentsi ja klorofüll a laboratoorsete analüüside andmed. Oluline seejuures on, et fluorestsentsi andmed on pinnakihis mõjutatud ka kiirgusest – tugeva loodusliku päikesekiirguse

juures tekib nn küllastumise efekt ja fluorestsentsi näidud mere pinna lähedal näitavad klorofüllisid sisaldust kuni 30 % vähem (Lips and Lips, 2014). Selle efekti elimineerimiseks on vajalik omada laboratoorsete analüüside andmeid kihiti ka ülemisest veekihi (st 1, 5 ja 10 m sügavuselt). Järelikult on CTD sondidega mõõdetud klorofüllisid andmete (vertikaalsete profiilide) kvaliteedi tagamiseks vajalik paralleelselt piisava hulga klorofüllisid laboratoorsete analüüside teostamine, sh HELCOM metoodikale vastavatel sügavustel 1, 5 ja 10 m kogutud veeproovidest.

5 Kokkuvõte ja soovitused

Teostatud mõõtmiste ja andmete analüüsi alusel on võimalik teha järgmised järeldused ja anda järgmised soovitused:

- Vees lahustunud hapniku sisalduse analüüsides pinnalähedases kihis ja põhjalähedases kihis ei piisa, et korrektselt rakendada HELCOM tuumindikaatorit „Hapnikuvõlg“ sügavate merealade seisundi hindamisel.
- Seirelepingud peavad sisaldama nõuet hapniku vertikaalsete profiilide registreerimiseks CTD sondidega ja vastavate andmete edastamiseks seire infosüsteemi ja HELCOM/ICES andmebaasi. Sealjuures on vajalik tagada andmete kvaliteet, sh teostades piisaval hulgal hapniku laboratoorseid analüüse CTD anduri tulemuste kalibreerimiseks.
- On vajalik koguda veeproove kihiti (10 m sammuga) allpool halokliini H_2S sisalduse määramiseks kui lahustunud hapniku sisalduse profiil näitab hüpoksia esinemist. Kihiti H_2S analüüsid ja hapniku vertikaalsete profiilide olemasolu on vajalikud hapnikuvõla tuumindikaatori abil seisundi hindamiseks Soome lahes ja Läänemere avaosa põhjapasseinis.
- Arendada välja meetodika hüpoksia ja anoksia ulatuse hindamiseks, mis on oluline karakteristik veesamba elupaiga tingimuste kirjeldamiseks, kasutades seireandmeid (vertikaalseid profiile), autonoomsete mõõtmiste andmeid ja muid tulemusi (sh potentsiaalselt ka mudeltulemusi) ajasammuga 1 kuu.
- Riikliku keskkonnaseire mereseire allprogrammis kasutatav toitainete seire meetodika vastab toitainete kontsentratsioonidel põhinevate indikaatorite (sh HELCOM tuumindikaatorite, NTOT, PTOT, DIN, DIP) nõuetele. Hinnangute usaldusväärsus on seda kõrgem, mida rohkem ja ajas ühtlasema jaotusega on andmeid.
- Kihiti proovide kogumine ja nendest toitainete analüüside tegemine annab võimaluse hinnata toitainete koguhulkasid alambasseinides, isegi kui rakendada seda piiratud hulgas jaamades. Läbi taoliste hinnangute kihiti määratud toitainete kontsentratsiooni andmete olemasolul oleks võimalik kokku viia toitainete välise koormuse (toitainete sissekannete) muutused ja sisemised vood, mis aitaksid paremini kavandada vajalikke meetmeid eutrofeerumise mõjude vähendamiseks ja hinnata ka ajanihet, mille jooksul meetmete mõju merekeskkonnas avaldub.
- Silikaatide sisalduse määramist mereseire raames tuleks jätkata, kuna nende ühendite dünaamika annab täiendavat informatsiooni toitainete suhete ja tarbimise ning ränivetikate maksimaalse biomassi kohta kevadõitsengu perioodil.
- Riiklikus keskkonnaseires rakendatav praktika, kus klorofüllü analüüsid teostatakse integreeritud proovist (1-10 m), võimaldab klorofüllü indikaatori (sh HELCOM tuumindikaatori) kasutamist seisundi hindamisel. Kuid selliselt kogutud andmed ei ole kasutatavad

fluorestsentsi profiilide kalibreerimiseks ega anna informatsiooni sügavamal kui 10 m paiknevate klorofüllü maksimumide kohta.

- CTD sondidega ühendatud fluorimeetrid võimaldavad hinnata klorofüll a sisalduse vertikaalset jaotust veesambas. Andmete kvaliteedi tagamiseks on vajalik paralleelselt piisava hulga klorofüllü laboratoorsete analüüside teostamine.

6 Viited

- Eilola, K., B.G. Gustafsson, I. Kuznetsov, H.E.M. Meier, T. Neumann, O.P. Savchuk. 2011. Evaluation of biogeochemical cycles in an ensemble of three state-of-the-art numerical models of the Baltic Sea. *J. Marine Sys.*, 88, 267-284.
- “EVS-EN ISO 10523:2012. Water Quality–Determination of PH.” n.d.
- “EVS-EN ISO 11905-1:2003. Water Quality - Determination of Nitrogen - Part 1: Method Using Oxidative Digestion with Peroxodisulfate.” n.d.
- “EVS-EN ISO 13395:1999. Water Quality - Determination of Nitrite Nitrogen and Nitrate Nitrogen and the Sum of Both by Flow Analysis (CFA and FIA) and Spectrometric Detection.” n.d.
- “EVS-EN ISO 15681-1:2005. Water Quality - Determination of Orthophosphate and Total Phosphorus Contents by Flow Analysis (FIA and CFA) - Part 1: Method by Flow Injection Analysis (FIA).” n.d.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt, and K. Kremling. 1999. “Methods of Seawater Analysis, Third Ed. Wiley-VCH, Weinheim.”
- HELCOM. 2018a. “Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN). HELCOM Core Indicator Report. Online.” 2018. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Dissolved-inorganic-nitrogen-DIN-HELCOM-core-indicator-2018.pdf>.
- . 2018b. “Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP). HELCOM Core Indicator Report. Online.” 2018. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Dissolved-inorganic-phosphorus-DIP-HELCOM-core-indicator-2018.pdf>.
- . 2018c. “HELCOM Subbasins with Coastal and Offshore Division 2018.” 2018. <http://metadata.helcom.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e5a59af9-c244-4069-9752-be3acc5dabed>.
- . 2018d. “Oxygen Debt. HELCOM Core Indicator Report. Online.” 2018. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Oxygen-debt-HELCOM-core-indicator-2018.pdf>.
- . 2018e. “Total Nitrogen. HELCOM Core Indicator Report. Online.” 2018. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Total-nitrogen-HELCOM-core-indicator-2018.pdf>.
- . 2018f. “Total Phosphorus. HELCOM Core Indicator Report. Online.” 2018. <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Total-phosphorous-HELCOM-core-indicator-2018.pdf>.

- . 2018g. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. Baltic Sea Environment Proceedings No. 153.
- . 2018h. Guidelines for sampling and determination of dissolved oxygen in seawater.
- “HELCOM COMBINE Annex C4.” n.d. Accessed October 12, 2020.
<https://helcom.fi/media/publications/Guidelines-for-measuring-chlorophyll-a.pdf>.
- Liblik, T. and U. Lips. 2011. “Characteristics and Variability of the Vertical Thermohaline Structure in the Gulf of Finland in Summer.” *Boreal Environ. Res* 16A: 73–83.
- Lips, U., J. Laanemets, I. Lips, T. Liblik, I. Suhhova, Ü. Suursaar. 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. [10.1016/j.ecss.2016.10.006](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.006).
- Lips, U.. and I. Lips. 2014. Bimodal distribution patterns of motile phytoplankton in relation to physical processes and stratification (Gulf of Finland, Baltic Sea). *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 101, 107–119.
- Savchuk, O.P. 2018. “Large-Scale Nutrient Dynamics in the Baltic Sea, 1970–2016.” *Frontiers in Marine Science* 5: 95. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00095>.
- Seifert, T., F. Tauber, and B. Kayser. 2001. “A High Resolution Spherical Grid Topography of the Baltic Sea – 2nd Edition.” *Baltic Sea Science Congress, Stockholm 25-29. November 2001, Poster #147*. www.io-warnemuende.de/iowtopo.
- Stoicescu, S.-T., Lips, U., Liblik, T. 2019. Assessment of Eutrophication Status Based on Sub-Surface Oxygen Conditions in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Frontiers in Marine Science*, 6, UNSP 54. [10.3389/fmars.2019.00054](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00054).
- TTÜ. 2019. Hapniku ja toitainete sisalduse autonoomsete mõõtmiste rakendamine mereseire programmis. 54 lk.
- Wasmund, N., Nausch, G., Feistel, R. 2013. Silicate consumption: an indicator for long-term trends in spring diatom development in the Baltic Sea. *J. Plankt. Res.*, 35(2): 393-406.
[doi:10.1093/plankt/fbs101](https://doi.org/10.1093/plankt/fbs101).