



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
EESTI MEREAKADEEMIA
Merenduskeskus

Mari Kasemets

**Heljumi sisalduse looduslik muutlikkus Eestit ümbritseva mereala
pinnakihis**

Lõputöö

Juhendaja: doktorant-nooremteadur Kai Salm

Tallinn 2021

Olen koostanud töö iseseisvalt.

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

Mari Kasemets

25.07.2021

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 166099VDVR

Üliõpilase e-posti aadress: kasemets.mari@gmail.com

Juhendaja doktorant-nooremteadur Kai Salm:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

25.07.2021

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: PhD Inga Zaitseva-Pärnaste

Lubatud kaitsmisele

.....

(ametikoht, nimi, allkiri, kuupäev)

Sisukord

Annotatsioon.....	4
Sissejuhatus	5
1 Optilised komponendid vees	6
2 Heljum	8
2.1 Heljumi osiste muutlikkus	8
3 Meetodid, hindamaks heljumi sisaldust vees	10
3.1 Heljumi otsene hindamine	10
3.1.1 Veeproovid	10
3.1.2 Kaugseire	10
3.2 Heljumi kaudne hindamine	11
3.2.1 Hägusus	11
3.2.2 Vee läbipaistvus.....	11
4 Uurimispiirkonna iseloomustus	13
4.1 Läänemeri	13
4.2 Eestit ümbritsev mereala.....	14
4.3 Merevee seisund Eesti ümber	15
5 Andmed ja metoodika.....	17
5.1 Secchi sügavused aastatel 2010–2020.....	18
5.2 Hägususe ja Secchi sügavuse vaheline seos 2019. aasta andmete põhjal.....	19
6 Tulemused	22
6.1 Secchi sügavus – mõõdistuste jagunemine.....	22
6.2 Maksimaalsed Secchi sügavused (kevad-suvi).....	24
6.3 Minimaalsed Secchi sügavused (kevad-suvi).....	26
6.4 Keskmised Secchi sügavused (kevad-suvi)	27
6.5 Aasta keskmised Secchi sügavused (kõik aastaajad).....	29
6.6 Hägusus perioodil 2010–2020	29
6.7 Heljumi sisaldus	31
Kokkuvõte	35
Summary.....	38
Viidatud allikad	40
Lisa 1 – hägususe ja Secchi sügavuse vaheline seos	44

Annotatsioon

Läänemeri on määratletud maailmas enim saastatud merede hulka. Varasemad uurimused on hinnanud vee kvaliteedi halvaks ning regulaarne seire näitab, et vesi on aastatega muutunud hägusemaks. Heljumi loodusliku taseme hindamiseks Eestit ümbritseva mereala pinnakihis kasutati Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituudi kogutud Secchi sügavusi ja hägususe mõõtmisi perioodist 2010–2020. Andmeid vaadeldi merealade lõikes (Soome laht, Liivi laht, Ava-Läänemeri), kuna olenevalt tunnuslikest tingimustest ja ümbritsevast maismaast mõjutavad erinevad tegurid (näiteks sügavus, põhjasetete iseloom, jõgede sissevool) iseloomulikku heljumi sisaldust. Analüüs käsitleb peamiselt andmeid kevadest ja suvest, mil teostati enamus mõõdistustest (84%). Kõige paremini oli kaetud Soome lahe piirkond (67,2% andmetest). Soome lahe ja Ava-Läänemere piirkonnas on suvisel ajal vee läbipaistvus veidi halvem kui kevadel, aga Liivi lahes erinevus nii selge ei ole. Kevadõitsenguga algab aktiivne hõljumi kasvu periood. Pideva elutegevuse tulemusena tekib veesambasse enam jääke. Sesoone termokliin takistab vertikaalset segunemist. Üldiselt on vee läbipaistvus püsinud vaadeldava 11 aasta jooksul stabiilsel tasemel, aga on võimalik, et periood on trendide esile tulemiseks liiga lühike. Aastatevahelises muutlikkuses perioodil 2010–2020 eristuvad kõrgema ja madalama häguse tasemega aastad. Kõrgema hägususega piirkonnad on Narva laht, Liivi lahe idaosa ja Väinameri. Nendel aladel mõjutab heljumit eelkõige jõgede suubumine merre, ranniku lähedus, mereala madal sügavus või nende tingimuste koosmõju ning tõenäoliselt on suurem osakaal heljumi mineraalsel osal. Hägusus on kõige madalam Ava-Läänemeres ja Soome lahe lääneosas, kus iseloomulik sügavus on 50–100 m.

Käesoleva lõputöö käigus digitaliseeriti suur hulk Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituudi kogutud Secchi sügavuste andmeid ning koostatud analüüs on sisendiks heljumi leviku analüüsil.

Võtmesõnad: heljum, vee läbipaistvus, hägusus, Secchi ketas, Läänemeri.

Sissejuhatus

Heljumi muutlikkuse hindamine on aktuaalne, kuna Läänemeri on üks saastunumaid meresid maailmas. Läänemere valgala on mere enda pindalast mitu korda suurem ning arvestatav hulk tööstuses, olmes ja põllumajanduses tekkivaid saasteaineid jõuab jõgede kaudu merre. Eutrofeerumine on üks olulisemaid kaasnevaid probleeme. Selle tagajärjel kehveneb vee kvaliteet – vesi muutub hägusemaks ja valgustingimused halvenevad. Mere pindmine valgusküllane veekiht on elukeskkond paljudele organismidele. See on kasvukeskkond fütoplanktonile, mis moodustab valdava osa mere primaarproduksioonist ja on toiduahela alglülks.

Töö on jaotatud kuueks peatükiks. Esimeses peatükis antakse ülevaade optilistest komponentidest vees ja teises lähemalt heljumist. Kolmandas peatükis kirjeldatakse meetodeid hindamiseks heljumi sisaldust vees ning neljandas iseloomustatakse uurimispiirkonda. Viies ja kuues peatükk kirjeldavad töös kasutatud andmeid, uurimuse metoodikat ja tulemusi. Käesoleva lõputöö eesmärgiks on iseloomustada heljumi looduslikku muutlikkust Eestit ümbritseva mereala pinnakihis. Hindamiseks on kasutatud aastatel 2010–2020 mõõdetud Secchi sügavusi ning hägususe andmeid 2019. aastast. Andmed kogus Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituut.

1 Optilised komponendid vees

Lisaks veele endale mõjutavad veealust valgusvälja erinevad optilised komponendid, nagu fütoplankton ehk taimhõljum, heljum (TSM – *total suspended matter*) ja värvunud lahustunud orgaaniline aine (CDOM – *colored dissolved organic matter*). Komponentide neeldumis- ja hajumisspekter mõjutab valguse levimist vees ning annab veepinnale iseloomuliku värvuse, mida tajub inimsilm ning mida mõõdetakse kaugseire abil (Kyryliuk & Kratzer, 2019). Läänemere valgusväljas domineerib enamasti CDOM. Suvisel tsüanobakterite õitsenguperioodil võib selle osakaal olla väiksem, sest siis võib suur osa Läänemerest kaetud olla tsüanobakterite kogumitega. Kogumite levikut mõjutavad hoovused ning seetõttu tulevad satelliidipiltidel hästi esile erinevad vee liikumise mustrid, mida mõjutavad nii atmosfääri Rossby lained kui ka Coriolise jõud. Joonisel 1 on kaugseire produkt, millelt näeb, kuidas hoovused kannavad kaasa vees hõljuvaid aineid. Rannikuvetes mõjutab optilisi omadusi heljumi anorgaaniline osa, mis jõuab merre rannikuerosiooni ning ojade ja jõgede sissevoolu kaudu (Kyryliuk & Kratzer, 2019). Tiheda inimasustuse ja tööstustega piirkondadest võib jõgede kaudu merre jõuda lisaks suurele hulga toitainetele ka ohtlikke aineid (IES, 2016) (joonis 2).



Joonis 1. Tsüanobakterite kogumid Soome lahe ja Ava-Läänemere piiril 2017. aasta suvel
Allikas: (SYKE, 2017)



Joonis 2. Daugava jõgi kannab Läänemerre toitainetele lisaks ka ohtlikke aineid

Allikas: (IES, 2016)

Optiliste komponentide kontsentratsioonide põhjal jaotatakse veed kahte rühma. Selle klassifikatsiooni töötasid välja André Morel ja Louis Prieur. Esimese tüübi puhul, näiteks selge läbipaistvusega ookeaniveed, sõltuvad vee optilised omadused fütoplanktonist ja selle lagunemise käigus tekkinud detriidist (Morel & Prieur, 1977). Kõige selgemaks veekoguks on hinnatud Sargasso merd (Kirk, 1985). Teist tüüpi vete puhul on optilised omadused samaväärselt mõjutatud ka veekogusse kantud lahustunud orgaanilisest ainest ja heljumi kontsentratsioonist. Selget piiri kahe veetüübi määramisel ei ole. Teisele veetübile vastavad enamasti rannikualad ning siseveekogud. Läänemeri kuulub teist tüüpi vee kategooriasse, sest CDOM mõjutab tugevalt vee optilisi omadusi (IOCCG, 2000).

2 Heljum

Heljum on vees heljuv tahke aine. Heljum koosneb erinevatest mineraalsetest ja orgaanilistest osakestest (IOCCG, 2000). Mineraalsed osakesed jaotuvad kivikesteks, liivaks, saviks ja mudaks ning neil on erinevad suurusklassid: muda on väiksem kui 0,63 µm, savi vahemikus 0,63 µm kuni 0,20 mm ning liiv suurem kui 0,20 mm. Elusorganismide lagunemise järel tekkivad tahked osakesed, mida eristatakse samuti suurusklasside järgi, moodustavad orgaanilise osa heljumist (Randla *et al.*, 2018).

2.1 Heljumi osiste muutlikkus

Orgaanilise ja mineraalse osa suhe heljumis on muutlik. Eesti rannikualadel saab muutlikkust seostada nelja erineva perioodiga: kevadõitseng, kevadine suurvesi ja kaasnev intensiivistunud jõgede sissevool, suviti esinev tsüanobakterite õitseng ning sügisene resuspensioon madalates piirkondades.

Orgaanilise heljumi kogus vees sõltub planktoni muutlikkusest, mille hulk veesambas muutub aastaegade lõikes. Kevadõitseng mõjutab Läänemere heljumi looduslikku taset, kuna fütoplanktoni hulk pinnakihis kasvab oluliselt. Fütoplankton koosneb väiksemõõtmelistest (10^{-2} – 10^{-7} m) ja lühikese elueaga (10^4 – 10^7 s) organismidest (Padis'ak jt 2010). Kasvu piiravad erinevad füüsikalised ja bioloogilised keskkonnatingimused. Füüsikalised piirangud, nagu limiteeritud päikesepaiste, külm temperatuur ja tugev segunemine, domineerivad tavaliselt sügisest kevadeni parasvöötme veekogudes. Peale kevadõitsengut suureneb bioloogiliste tegurite mõju. Bioloogilised tegurid on kisklus ja konkurents toitainete pärast. Toitainetest mõjutavad fütoplanktonit eelkõige lämmastiku- ja fosforiühendid. Kooslused on muutuvad, sest eelis on liikidel, kes suudavad olemasolevaid ressursse kõige tõhusamalt kasutada (Padis'ak jt 2010). Seega, kui suvel lämmastik pinnakihtidest ära tarbitakse, võivadki kooslustes domineerida tsüanobakterid, kes suudavad omastada õhulämmastikku. Fütoplanktoni hulka vees hinnatakse klorofüllü moodustamise põhjal (Lips, 2011). Aladel, kus fütoplankton moodustab olulise osa vee läbipaistvusest, on klorofüllü ja heljumi kontsentratsioonid tugevas vastastikus sõltuvuses (HELCOM, 2009).

Resuspensioon tähendab, et tuul ja hoovused tõstavad põhjasetted uuesti hõljuvasse olekusse. Tuulte sesoonsuse tõttu on mõju suurem sügisel ja talvel, mil tuuled on kevade ja suvega võrreldes keskmiselt tugevamad (Kyryliuk & Kratzer, 2019). Nähtus on oluline tegur Liivi lahes

ja Lääne-Eesti saarte vahelisel merealal (Raudsepp *et al.*, 2011). Eesti rannikuvetest on Pärnu laht, mis asub Liivi lahe kirdeosas, üks mitmekesisemate mõjutustega merealadest. Pärnu lahte suubub Eesti suurima valgalaga Pärnu jõgi, mille keskmine vooluhulk on $64 \text{ m}^3/\text{s}$. Jõe vooluga kandub lahte setteid ja orgaanilist ainet, millest enamuse moodustab turvas. Mineraalne heljum jõuab lahte ka kaldaerosioonist ning lainetuse tagajärjel põhjakihtidest, sest lahe põhjale on iseloomulikud pehmed setted (savi, saviliiv, peenliiv) ja kiviseid alasid on vähe. Kevadel, kui jõe vooluhulk on suurenenud, kantakse lahte rohkelt CDOMi (Randla *et al.*, 2018).

3 Meetodid, hindamaks heljumi sisaldust vees

3.1 Heljumi otsene hindamine

3.1.1 Veeproovid

Heljumi kontsentratsiooni ühikuks on mg/l. Kontsentratsioon määratakse filtreerimise teel veeproovist. Filtreerimiseks kasutatakse Millipore'i filtrit (põori suurus 0.45 µm). Filter kaalutakse enne ja pärast filtreerimist. Filtri lõppkaalu saamiseks kuivatatakse filter fikseeritud temperatuuril (103–105 °C) konstantse kaaluni. Heljumi kontsentratsiooni veeproovis tuleneb filtri alg- ja lõppkaalu erinevusest (Sipelgas & Siitam, 2020).

3.1.2 Kaugseire

Kaugseire on eri objektide ja nähtuste kohta informatsiooni kogumine uuritavaga vahetus kontaktis olemata. Peamiselt on tegemist satelliitidelt või lennukitelt tehtavate elektromagnetkiirguse mõõdistustega. Kaugseire jaguneb passiivseks ja aktiivseks. Passiivse kaugseire puhul püüavad andurid looduslikku kiirgust, mis on kiirgunud või peegeldunud uuritavalt objektilt või nende lähiümbrusest (näiteks optiline ja infrapunakaugseire). Aktiivse seire korral sondeeritakse objekti mõõduriistast välja kiiratava energia tagasipeegeldumise abil (näiteks lidari ja radari kasutamine) (Noorma *et al.*, 2020). Veekogude kvaliteedi seires leiab peamiselt kasutust passiivne kaugseire, kus sensorid registreerivad nähtava ja lähisinfapunase lainela kiirgust. Ainult nähtav valgus suudab tungida vette ja seega anda informatsiooni veesambas leiduvate optiliselt aktiivsete ainete ja nende hulga kohta. Pinnakihi paksus, millest kaugseire on võimeline infot saama sõltub vee läbipaistvusest. Lähisinfapuna kanaleid kasutatakse atmosfääri korrigeerimiseks. Antud protseduur on vajalik, kuna ligikaudu 90% satelliidi sensorini jõudvast signalist pärineb atmosfäärist ega sisalda informatsiooni vee omaduste kohta ning tuleb eemaldada (IOCCG, 2000).

Kuna veekogu eri osades võib heljumi sisaldus olla muutlik, on kontaktmõõtmisega kogu ala kirjeldava info kogumine raskendatud. Heljumi määramine satelliitandmete põhjal on tihti keeruline. Tulemusi mõjutab nii vee sügavus, läbipaistvus, settematerjal kui ka seireks kasutatav spektrikanal. Näiteks madalaveelistes piirkondades võib satelliitandmeid mõjutada merepõhi. Selge vesi hästi peegelduva merepõhja kohal tekitab kaugseire esmases produktis müra. Tõeste tulemuste saamiseks tuleb andmeid korrigeerida ja puhastada. (Ohde & Siegel, 2001). Lisaks

mõjutab CDOM spektrit oluliselt. Näiteks Pärnu jõe vooluhulk kevaditi suureneb ja Pärnu lahte kantakse rohkelt CDOMi. Sellisel juhul on peegeldumisspektrite väärtused väikesed ja spektrimaksimum on nihkunud punasesse spektriossa. Seega, standardsed algoritmid ei tööta ning satelliitandmete töötlemisel tuleb arvestada veekogu eripärasid (Randla *et al.*, 2018).

3.2 Heljumi kaudne hindamine

3.2.1 Hägusus

Mereseire on üks riikliku keskkonnaseire allprogrammidest. Seire abil saadakse ülevaade merekeskkonna seisundist ja selle muutustest. Seirereiside käigus kogutakse veeproove ja tehakse mõõtepunktides CTD sondiga mõõtmisi (Keskkonnaagentuur, 2018). Sondiga mõõdetakse erinevaid parameetreid, näiteks temperatuur, elektrijuhtivus, klorofüll a fluorestsents ja hägusus. Hägusus on vee läbipaistvust iseloomustav optiline näitaja. Andmed saadakse suhtelistes ühikutes. Hägususe anduri andmete ja samaaegselt kogutud veeproovidest hinnatud heljumi kontsentratsioonide vahel leitakse regressiooniseos, mille abil hinnatakse hägususe ja heljumi suhet (Sipelgas & Siitam, 2020). Seost saab kasutada, hindamaks heljumi kontsentratsiooni hägususe andmete põhjal punktides, kus veeproove tehtud ei ole. Lisaks uurimislaevale teostatakse mõõtmisi ka eraldiseisvate platvormide, nagu poiijaama, abil. Poiijaam paigaldatakse merealal asukohta, kus soovitakse andmeid koguda, ning kinnitatakse ankruga merepõhja. Jaamasid kasutatakse ka projektipõhiselt, et mõõdistada näiteks süvendustöö mõju merevee kvaliteedile. Perioodil 19.12.2019–12.03.2020 teostati Paldiski Lõunasadamas süvendustöid ning poiijaama kogutud hägususe andmete alusel sai hinnata süvendustööde mõju mereveekeskkonnale (Sipelgas & Siitam, 2020).

3.2.2 Vee läbipaistvus

Secchi ketas on üks vanimaid mõõtevahendeid vee läbipaistvuse hindamiseks. Meetodi töötas välja Angelo Secchi 1866. aastal (Preisendorfer, 1986). Secchi sügavus on korrelatsioonis valguse levimisega vees. Tegemist on valge (või sektorite kaupa must-valge) metallist kettaga, mille läbimõõt on 30 cm. Ketas lastakse vette, kuni seda pole enam veepinnalt näha. Seejärel tuuakse ketas uuesti vaatevälja ja tõmmatakse veest välja. Samal ajal loendatakse nõõril olevad sõlmekesi, mis on kindla tihedusega (nt 0,5 m). Saadud sügavust nimetatakse Secchi sügavuseks ning see näitab suurimat sügavust, kus ketas on veepinnalt nähtav. Pidevad mõõtmised on olulised just vee läbipaistvuse pikaajaliste muutuste hindamiseks, sest mõõtmised sõltuvad

vaatlejast ja tulemused on subjektiivsed (Anderson *et al.*, 2001). Secchi ketta kasutamine on lihtne ning seda kasutatakse ka tänapäeval, tegemaks kindlaks vee läbipaistvuses toimuvaid muutuseid. Secchi mõõtmisi teostatakse mereseires (Keskkonnaagentuur, 2018). Heljumi kontsentratsioon vees on Secchi sügavusega pöördvõrdelises seoses. Vee läbipaistvust mõjutavad vees hõljuvad osakesed ja veele värvust andvad lahustunud ained. Peenemad osakesed vähendavad läbipaistvust enam kui jämedamad. Näiteks heledaveelistes järvedes on vee läbipaistvus seotud eelkõige fütoplanktoni hulgaga vees. Madalates järvedes on suurem mõju lainetuse tõttu veesambasse tõstetud sette osakestel ja vee läbipaistvus on komplekssem (Nõges, 2020).

4 Uurimispiirkonna iseloomustus

4.1 Läänemeri

Läänemeri on Atlandi ookeani suletud sisemeri, mis paikneb Atlandi merelise ja Euraasia kontinentaalse kliimasüsteemi üleminekualal, määrates mere hüdroklimaatilised tingimused (Ojaveer *et al.*, 2010). Läänemeri (joonis 3) koosneb Botnia lahest, Botnia merest, Soome lahest, Liivi lahest, Ava-Läänemerest ja Kattegati väinast. Lisaks jaotuvad nimetatud merealad veel omakorda väiksemateks lahtedeks ja väinadeks. Valgla hõlmab 14 riiki kogupindalaga üle $1,7 \times 10^6$ km² ja Läänemere-äärsetel aladel elab umbes 85 miljonit inimest. Seetõttu on Läänemeri suuresti mõjutatud mitmesugustest erinevatest inimtegevusega kaasnevatest tagajärgedest (Ojaveer *et al.*, 2010).



Joonis 3. Läänemere osad

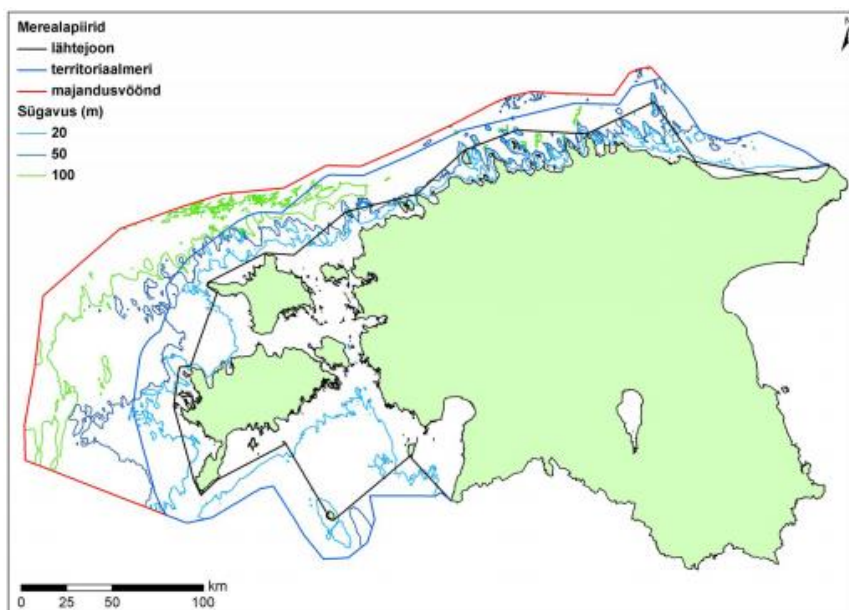
Allikas: (Google Maps, 2021)

Läänemeri on suhteliselt madal meri keskmise sügavusega umbes 60 m (Ojaveer *et al.*, 2010), kus keskmine veeringlus toimub vastupäeva (Elken & Matthäus, 2008). Läänemere pinnakihis

varieerub soolsus 2–8 kg/m³. Soolsus on madal jõgede suudmete läheduses ning kõrgem Taani väinade juures, läbi mille on merel ühendus ookeaniga. Läänemeri on püsivalt kihistunud. Mere sügavamates osades esineb püsiv halokliin umbes 60–80 m sügavusel. Halokliin on veekiht, kus vertikaalne soolsusgradient muutub järsult. Seega halokliini all on vesi tunduvalt soolasem kui halokliini peal asuvates veekihtides. Lisaks tekib kevade jooksul 25–30 m sügavusel sesoonne termokliin. Termokliin on veekiht, kus vertikaalne temperatuurigradient muutub järsult (Elken & Matthäus, 2008). Sesoone termokliini peal asuv soe ja valgusküllane veekiht on hea elukeskkond fütoplanktonile (Lips & Lips, 2014).

4.2 Eestit ümbritsev mereala

Eesti mereala kuulub Läänemere kirdeossa ning koosneb kolmest Läänemere alampiirkonnast – Soome laht, Liivi laht ja Läänemere avaosa. Eesti rannajoon ja ümbritseva mereala sügavusjaotus varieeruvad oluliselt. Rannikumere piires vahelduvad madalad alad sügavamatega. Territoriaalmeres ja majandusvööndis on sügavus enamasti üle 60 m. Eesti rannikumeres on kõige madalamad piirkonnad Väinameri ja Pärnu laht. Eestit ümbritseva mereala sügavaimad alad asuvad Hiiumaast läänes majandusvööndi alal (Liblik & Lips, 2012). Joonisel 4 on kujutatud Eesti merealade jaotus Merealapiiride seaduse alusel.



Joonis 4. Eesti mereala jaotus. Punase piirjoonega on kujutatud Eesti majandusvööndit, sinisega territoriaalmeri piiri ning musta piirjoonega territoriaalmeri lähetejoont. Lisaks on väljatoodud sügavusjooned majandusvööndi piires. Helesinisega on kujutatud 20 meetri, tumesinisega 50 meetri ja helerohelisega 100 meetri sügavusjoont
Allikas: (Keskkonnaagentuur, 2021)

Vastavalt sügavusjaotusele saab hinnata merepiirkondade tüüpilisi kihistumise tingimusi. Umbes 20% Eesti merealast on nii madal, et on enamasti läbisegunenud pinnast põhjani. Sellised piirkonnad on Väinameri ja Pärnu laht. Eesti merealast 50% on ajutiselt kihistunud ehk esineb sesoonne termokliin. Siia hulka kuuluvad Liivi laht ja Soome lahe kaguosa. Ligikaudu 30% merealast, kus sügavus on üle 60 m, on terve aasta vältel kihistunud ehk nendel aladel esineb püsiv halokliin. Lisaks kujuneb kevadel ka termokliin. Vastavad piirkonnad on Soome lahe lääneosa ja Ava-Läänemeri (Liblik & Lips, 2012).

4.3 Merevee seisund Eesti ümber

Vee kvaliteedi alusel on Läänemeri määratletud maailmas enim saastatud merede hulka (Lundberg, 2014). Eestit ümbritsevat avamereala hinnatakse tugevasti eutrofeerunuks. Füüsikalis-keemiliste näitajate põhjal hinnatakse Soome lahe seisundit suures osas halvaks ning Liivi lahe seisundit kesiseks. Ka üldlämmastiku- ja üldfosforisisalduse põhjal on Eesti rannikuveekogumite ökoloogiline seisund kesine (Lainela, 2012).

Eesti rannikumeres on seiretegevuse raames mõõdetud vee läbipaistvust regulaarselt alates 1993. aastast. Läänemere kõigis alambasseinides on näha tendents, et vesi on muutunud hägusemaks. Kõige suuremad muutused on toimunud Läänemere põhjaosas ja Soome lahes, kus Secchi sügavus on vähenenud vastavalt 9 m-lt 5 m-le ja 8 m-lt 4 m-le. Liivi lahes on täheldatud, et vee läbipaistvus on võrreldes teiste alambasseinidega väiksem (Liblik & Lips, 2012). Arvatakse, et perioodi jooksul on suurenenud fütoplanktoni biomass, sagenenud tsüanobakterite õitsengud ning kasvanud orgaaniliste ja anorgaaniliste osakeste sissevool maismaalt (Liblik & Lips, 2012). Väinameres tehtud uuringu põhjal on leitud, et heljumi kontsentratsioon ja hägusus ligikaudu võrdsed (Liblik & Lips, 2011). Seega võib arvata, et heljumi sisaldus pindmistes kihtides on viimaste aastakümnete jooksul kasvanud.

Fütoplanktoni biomassi osakaal Läänemere avameres on võrdlemisi ühesugune. Näiteks Ava-Läänemere põhjaosas on klorofüll a ja vee läbipaistvuse vahel tugev seos. See tähendab, et fütoplanktoni hulga muutumine veesambas peegeldub Secchi sügavuse mõõtmistes. Avamerega võrreldes on Botnia lahes Secchi sügavused keskmiselt madalamad, ent klorofüllü sisalduses kasvu ei ole täheldatud (HELCOM, 2009). Kuna Botnia lahte suubub mitmeid jõgesid, kasvab heljumi sisalduses tõenäoliselt teiste mineraalsete ja orgaaniliste osiste osakaal lisaks organismide elutegevuse jääkidele. Seega võib arvata, et Eestit ümbritseval merealal heljumi sisaldus ja selle osiste osakaal pinnakihis varieerub, sest avatus avamerele ja liigendunud

rannajoon loovad mitmekesise keskkonna. Samuti suubub Eesti rannikumerre mitmeid jõgesid, mistõttu maismaalt tulev koormus mõjutab esiti rannikualasid.

5 Andmed ja meetodika

Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituut teostab riikliku keskkonnaseire programmi raames avamere seiret aastast 2010. Samast aastast on tehtud ka regulaarselt Secchi sügavuse mõõtmisi. Käesolevas töös on analüüsitud Secchi sügavusi perioodist 2010–2020. Enamik andmetest on kogutud seirereiside käigus. Lisaks on analüüsitud 2019. aasta hägususe andmeid ning uuritud nende seost Secchi sügavustega. Andmete analüüsi eesmärgiks on iseloomustada Secchi sügavuste ja hägususe andmete põhjal heljumi looduslikku fooni Eestit ümbritseva mereala pinnakihi. Andmetöötlemiseks kasutati peamiselt Microsoft Excelit, aga ka MATLAB tarkvara.

Mõõtmised on tehtud Tallinna Tehnikaülikooli uurimislaeva Salme pardalt. Hägususe andmed on kogutud SeaBird 19 plus V2 SeaCAT CTD sondiga, mille küljes on hägususe andur Turbidity Meter WET Labs ECO-NTUrt. Kõik uurimislaeva pardal tehtud mõõtmised protokollitakse (joonis 5). Protokollidel on esitatud mõõdistuse ehk protokollide koostamise kuupäev, reisi nimetus, jaama nimetus, kus mõõdistus läbi viidi, asukoha koordinaadid (laius- ja pikkuskraad) ning visuaalselt hinnatud oluline laine kõrgus ja pilvisus. Lisaks on kirjas mõõdetud Secchi sügavus, kui seda oli võimalik mõõta, ning veeproovide võtmise puhul on märgitud, milliselt sügavuselt proov võeti ja milliste laboratoorsete analüüside jaoks see on ette nähtud. Secchi sügavused digitaliseeriti mõõtmisprotokollidelt ning andmed koguti Microsoft Exceli töölehtedele.

Reis nr 3 Kuupäev 12.08.2009

Jaam nr 23

Meteo _____

Algus		Lõpp	
Aeg	<u>09:03</u>	Aeg	<u>09:12</u>
Lat	<u>59° 41,2 N</u>	Lat	<u>59° 41,2 N</u>
Lon	<u>24° 37,5 E</u>	Lon	<u>24° 37,6 E</u>
Sügavus	<u>87m</u>	Sügavus	

CTD	
Secchi	<u>3.1</u>

Veeproovid

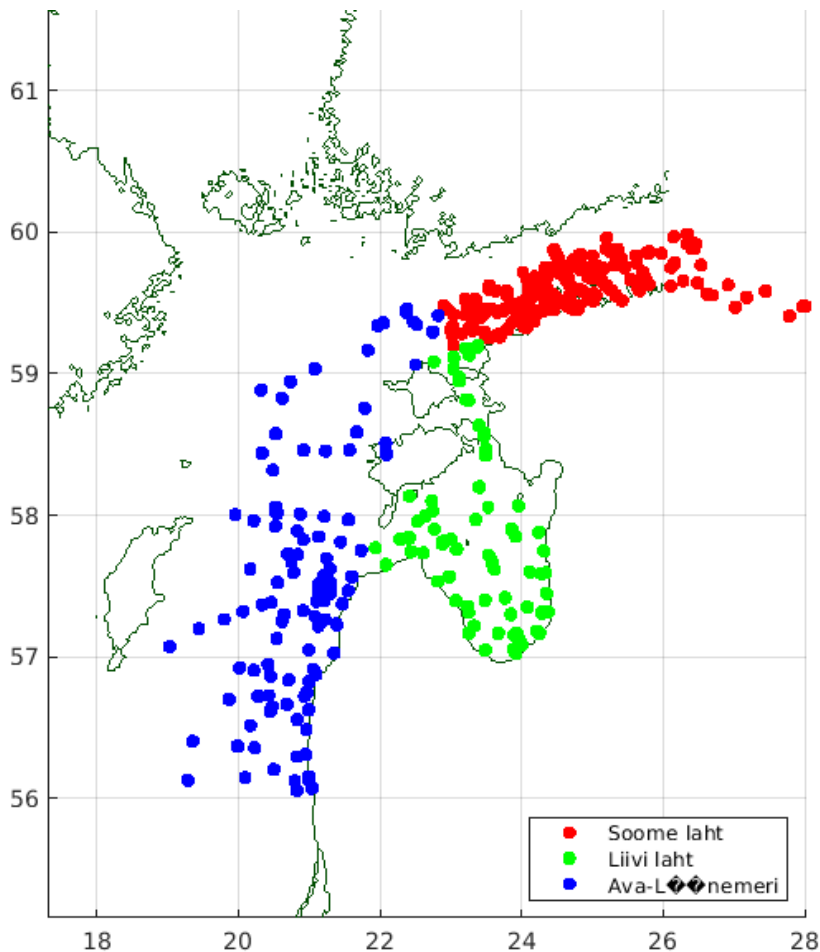
batomeetri nr	sügavus	märkus
1	<u>40</u>	
2	<u>30</u>	
3	<u>20</u>	
4	<u>20</u>	
5	<u>15</u>	<u>che</u>
6	<u>10</u>	
7	<u>5</u>	<u>che</u>
8	<u>5</u>	<u>AS 10</u>
9	<u>2</u>	
10		
11		
12		

Joonis 5. Mõõtmiste protokoll näidis uurimislaeval täitmiseks

5.1 Secchi sügavused aastatel 2010–2020

Siinses töös analüüsitakse andmeid perioodist 2010–2020. Andmeid on ka varasemast perioodist, ent nende ebaregulaarsuse ning vähesuse tõttu pole neid töösse kaasatud. Lühikesed andmerekad ei anna piisavat ülevaadet kogu aastast ning lokaalsed punktid ei pruugi olla iseloomulikud suuremale merealale. Peale andmete digitaliseerimist kasutati MATLAB tarkvara andmete sorteerimiseks ning punktide visualiseerimiseks kaardil. Tarkvara abil jaotati andmed vastavalt

valitud merealade piiridele. Soome lahe vahemikuks määrati 59,2° N–60,7° N ja 22,9° E–30,0° E, Ava-Läänemere puhul umbes 56,0° N–60,7° N ja 18,0° E–22,9° E ja Liivi laht loeti kokku Väinamerega vahemikus 57,0° N–59,2° N ja 21,75° E–24,6° E. Joonisel 6 on näidatud mõõtepunktide jaotumine Eesti ümber. Ava-Läänemere piirkonnas on kaasatud punkte ka kaugemalt kui ainult Eestit ümbritsev mereala, et oleks võimalik paremini hinnata avamerel valitsevaid tingimusi. Arvutuste ja graafikute tegemiseks kasutati Microsoft Excelit.



Joonis 6. Töös vaadeldavate Secchi andmete jaotus merealade järgi. Rohelisega on kujutatud Liivi lahe, punasega Soome lahe ja sinisega Ava-Läänemere piirkonda arvestatud mõõdistuspunktide asukohad

5.2 Hägususe ja Secchi sügavuse vaheline seos 2019. aasta andmete põhjal

Secchi sügavus ja hägusus on mõlemad on vee läbipaistvust iseloomustavad parameetrid, kuid andmete iseloom ning kogumise viis on erinev. Secchi kettaga mõõdetud sügavus on punktväärtus ja see annab infot kogu mõõdetud veekihi ulatuses. Hägusust mõõdetakse

veesambas eri sügavustel. Konkreetset analüüsitavad andmed aastast 2019 on eelnevalt töödeldud ning väärtused on esitatud iga meetri järel.

Hägususe andmeid on kasutatud, leidmaks nende seos Secchi sügavustega. Kasutusele on võetud mõõdistuspaarid, mis langesid kokku nii ajaliselt kui asukoha koordinaatidelt. Secchi sügavuse ja hägususe andmepaarides on hägususe väärtus maksimaalne mõõdetud väärtus pinnalt kuni selles punktis mõõdetud Secchi sügavuseni. See tähendab, kui Secchi sügavus oli antud asukohas 5 meetrit, siis Secchi sügavusele vastav hägususe väärtus on hägususe maksimum vahemikus 0–5 meetrit. 2019. aastal teostati 119 Secchi ja 147 hägususe mõõdistust. Andmepaare oli 45: Soome lahes 34, Liivi lahes 4 ja Ava-Läänemere piirkonnas 7. Paarid jagunesid aastaegade arvestuses järgmiselt: talvel 3, kevadel 13, suvel 28 ja sügisel 1.

Secchi ketta mõõdistuste ja hägususe andmete vahel on tugev seos (Baughman *et al.*, 2015). Tugeva korreleerumise alusel saab Secchi sügavused konverteerida hägususeks. On eeldatud, et Secchi sügavuse ja hägususe vahel on negatiivne eksponentsiaalne seos kujul

$$y = a * x^b,$$

kus y on hägusus, x Secchi sügavus ning a ja b on koefitsiendid (sh $b < 0$). Eksponentsiaalne seos tähendab, et lineaarne seos

$$Y = kX + c,$$

kehtib väärtuste naturaalloogarithmide vahel. Eelnevas valemis on Y naturaalloogarithm hägusus väärtusest, X naturaalloogarithm Secchi väärtusest ning k ja c on koefitsiendid. Koefitsientide k ja c põhjal leitakse koefitsiendid a ja b järgnevalt:

$$a = e^c$$

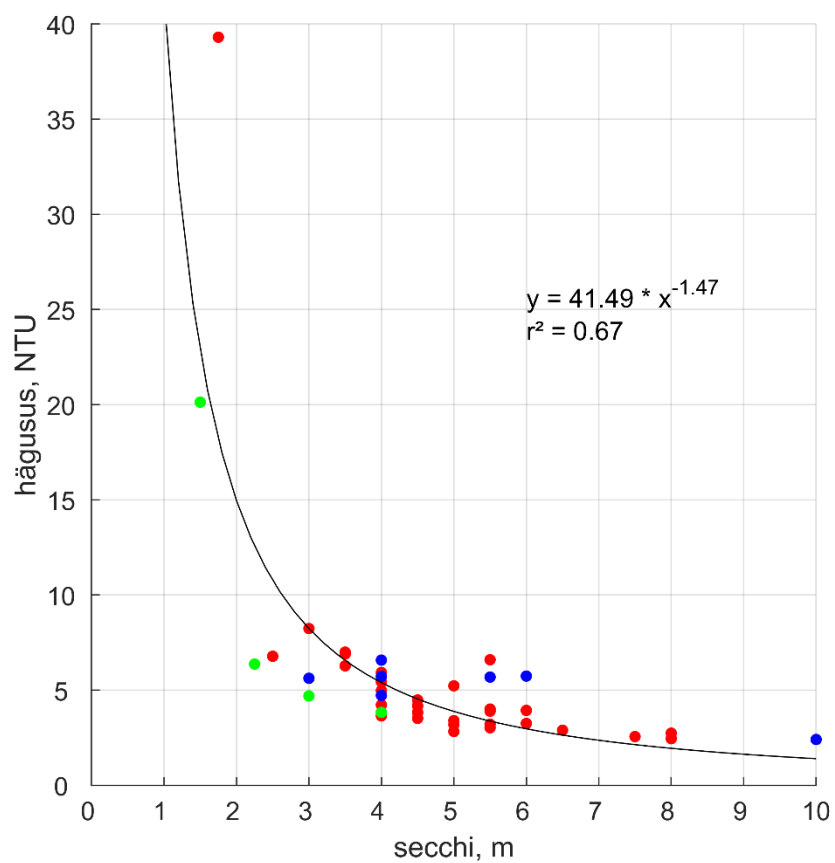
$$b = k$$

Secchi sügavuse ja hägususe vahel kehtib 2019. aasta andmete põhjal järgnev seos:

$$y = 41.49 * x^{-1.47}$$

(Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021).

Joonisel 7 on kujutatud eelnev seos ning punktide värvid vastavad töös varasemalt kasutatud merealade värvidele. Seose loomine ja kasutatud andmed on kirjeldatud Lisas 1. Loodud seose põhjal on Secchi sügavused perioodil 2010–2020 teisendatud hägususe väärtusteks ning analüüsitud tulemuste peatükis.



Joonis 7. Seos Secchi sügavuse ja hägususe vahel 2019. aasta andmete põhjal. Punasega on kujutatud Soome lahe, rohelisega Liivi lahe ja sinisega Ava-Läänemere piirkonda jäävad andmed

Allikas: (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021)

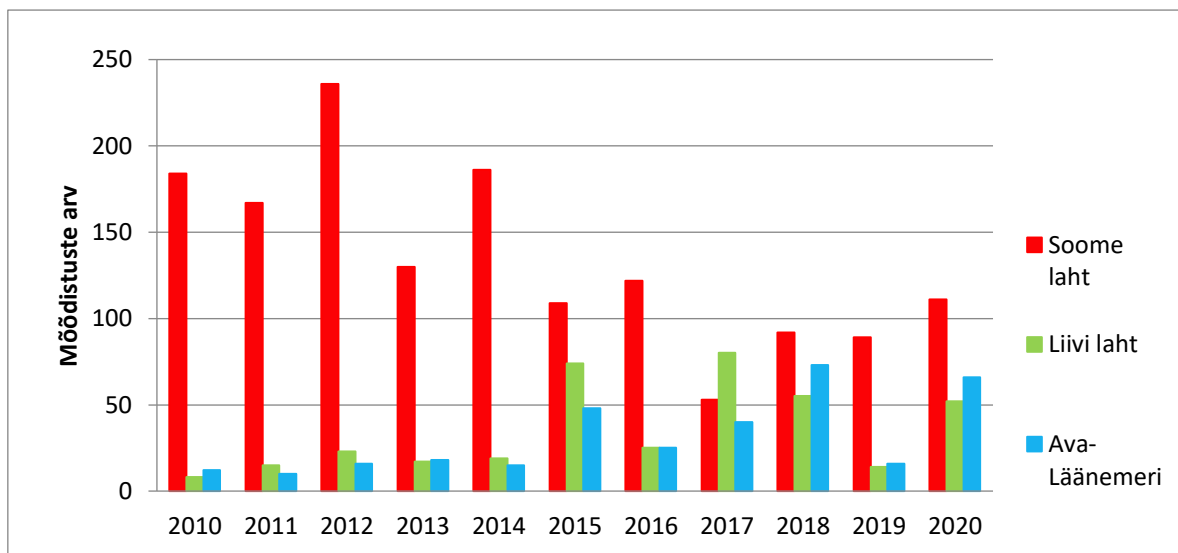
6 Tulemused

Käesolevas peatükis on analüüsitud Secchi sügavuste andmeid ja nende põhjal hinnatud pinnakihi hägusust perioodil 2010–2020. Secchi sügavuste puhul on kirjeldatud mõõdistuste jaotust merealade lõikes (aastate ja aastaegade arvestuses) ning esitatud maksimaalsed, minimaalsed ja keskmised väärtused. Järgnevalt on leitud seos Secchi sügavuste ja 2019. aastal kogutud hägususe andmete vahel. Seose põhjal hinnati 2010–2020 aastate oletatavat maksimaalset heljumi sisaldust pinnakihis. Hägususe väärtusi ei ole konverteeritud heljumi kontsentratsioonideks, sest 2019. aastast on vähe kattuvaid punkte, kus analüüsiti veeproovist heljumit ning mõõdeti samal ajal ka hägusust. Seega järeldused heljumi sisalduse kohta Eestit ümbritseval merealal on kaudsed.

6.1 Secchi sügavus – mõõdistuste jagunemine

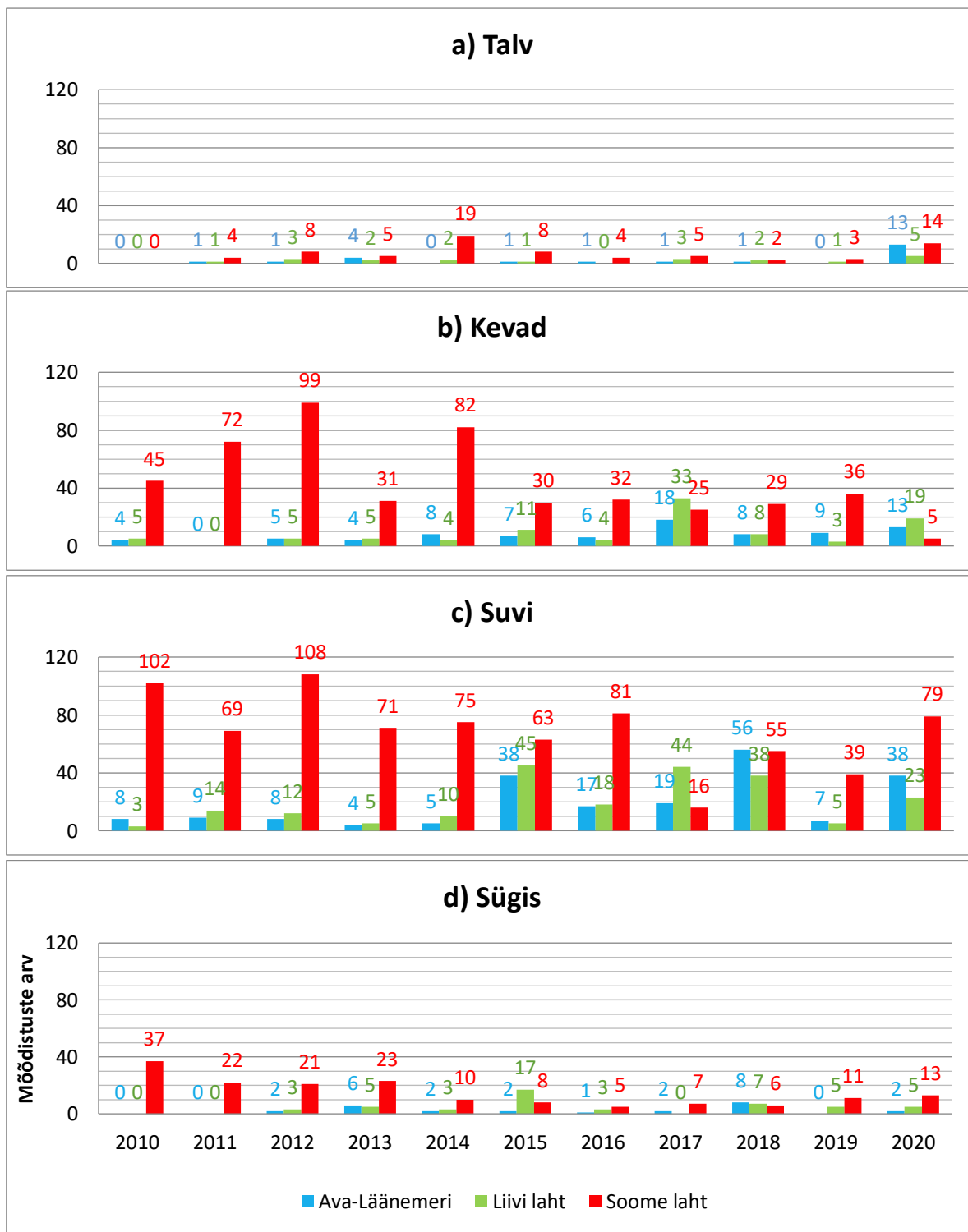
Eestit ümbritsev mereala jaotub kolme eri piirkonna vahel: Soome laht, Liivi laht, Ava-Läänemeri. Merealade eripärad võivad mõjutada ka heljumi iseloomulikku sisaldust. Esitatakse kui palju erinevatel aastatel Secchi sügavust mõõdeti ja kuidas need jaotusid aastaegade kaupa. Aastaajad on jaotatud meteoroloogilise arvestuse alusel: kevad (märts, aprill, mai), suvi (juuni, juuli, august), sügis (september, oktoober, november) ja talv (detsember, jaanuar, veebruar). Vaadeldaval ajaperioodil detsembris Secchi kettaga mõõtmisi ei tehtud. Aastate lõikes kuvatud talvised mõõdistusandmed vastavad iga aasta jaanuari ja veebruari tulemuste kohta. Tuuakse välja maksimaalsed, minimaalsed ja keskmised väärtused merealade kaupa kevadel ja suvel. Lisaks näidatakse aasta keskmisi Secchi sügavusi.

Aastatest 2010–2020 oli Secchi kettaga teostatud 2200 mõõdistust ja jooniselt 8 on nähtav antud mõõdistuste jagunemine aastate vahel. Kõige suurem osa andmetest on aastast 2012 (275 mõõdistust) ja kõige vähem aastast 2019 (119 mõõdistust). Kõige rohkem ehk 67,2% kogu mõõdistustest tehti Soome lahes. Liivi lahe piirkonnas teostati 17,4% mõõdistustest ja Ava-Läänemeres 15,4%. Vaatluse all oleva perioodi jooksul Soome lahes tehtavate mõõdistuste hulk vähenenud, aga Liivi lahes ja Ava-Läänemeres pigem kasvanud.



Joonis 8. Secchi sügavuse mõõdistamiste jagunemine aastatel 2010–2020, merealade ja aastate lõikes

Joonisel 9 on kujutatud mõõdistuste jaotumine aastaegade kaupa. Enamus, 53,8%, andmeid on pärit suvest. Kevadisse perioodi jääb 30,2%, sügisesse 10,8% ja talvesse 5,2% Secchi sügavuse mõõdistustest. Seega üle poole mõõdistustest tehti suvisel ajal ja Soome lahe piirkonnas. Kevadel ja suvel võib merevee seisund kiirelt muutuda. Suvisel ajal tehakse rohkem seirereise. Näiteks kujuneb kevadel sesoonne termokliin ja algab kevadõitseng, suvel võivad tekkida vetikakogumid. Selliste protsesside uurimine ja jälgimine on oluline. Talvel on veesambas vähem muutuseid ehk olukord on stabiilsem – vesi on madalamatel aladel põhjani ja sügavamatel aladel püsiva halokliinini (~60 m) läbisegunenud. Mõõtmiste arv oleneb ka ilmastikuoludest. Secchi sügavuste mõõtmisi viiakse läbi vaid valgel ajal ning väiksema lainetusega. Pimedal ajal pole ketast näha ning tugeva lainetusega ei saa täpset sügavust määrata.

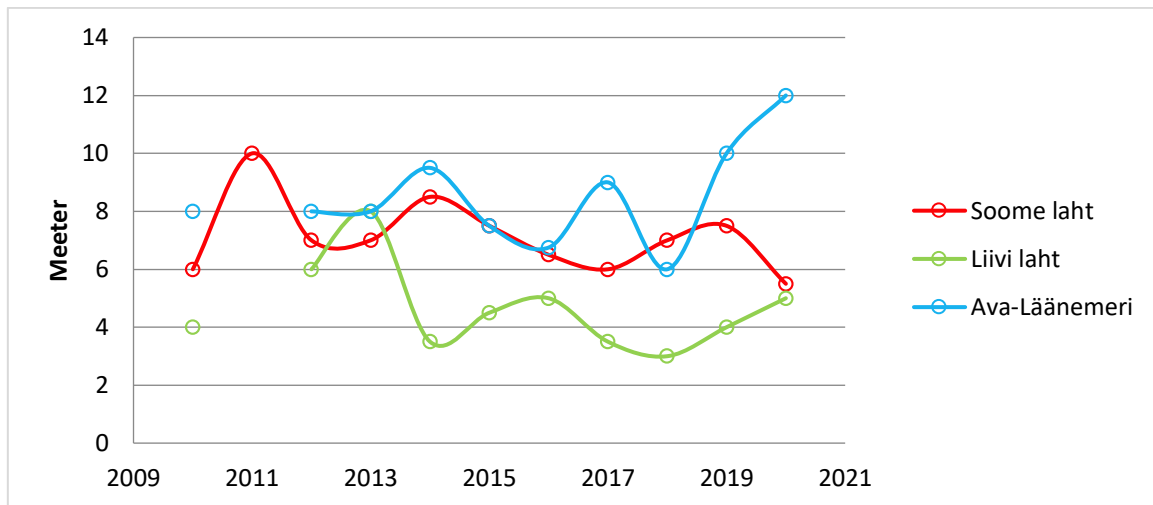


Joonis 9. 2010–2020 aastate Secchi mõõdistuste jagunemine aastaegade arvestuses

6.2 Maksimaalsed Secchi sügavused (kevad-suvi)

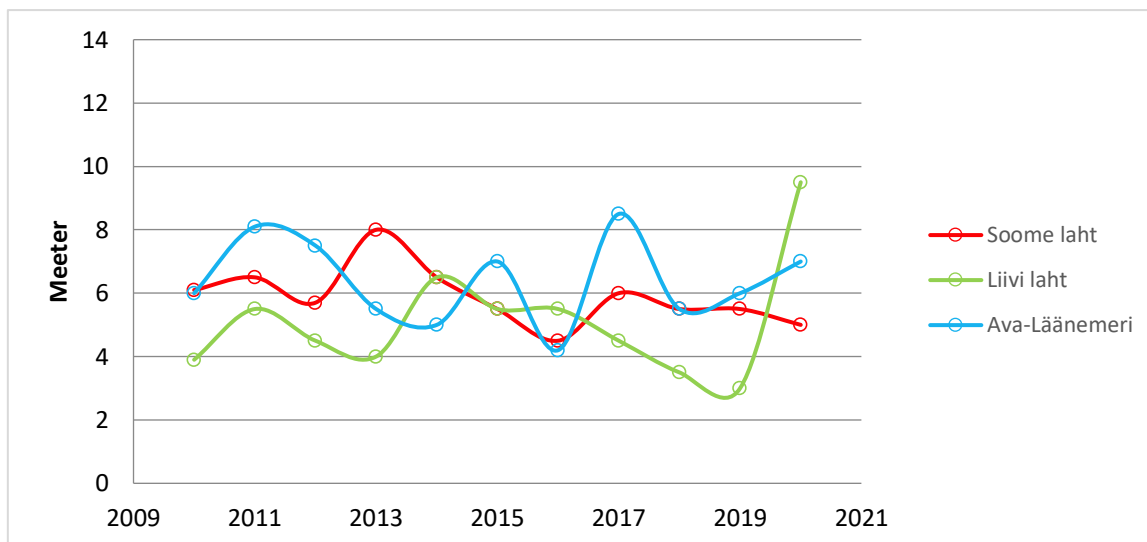
Joonisel 10 on kujutatud Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere kevadisi maksimaalseid Secchi sügavusi perioodil 2010–2020. Kevadised maksimaalsed väärtused igal merealal on

püsinud vaadeldud 11-aastase perioodi jooksul sarnasel tasemel. Soome lahe keskmine kevadine maksimum perioodil 2010–2020 oli $7,1 \pm 1,3$ m ja Ava-Läänemeres $8,5 \pm 1,7$ m. Liivi lahes oli perioodi keskmine kevadine maksimum $4,7 \pm 1,5$ m, mis on madalam Soome lahe ja Ava-Läänemerega võrreldes.



Joonis 10. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere kevadised maksimaalsed Secchi sügavused perioodil 2010–2020

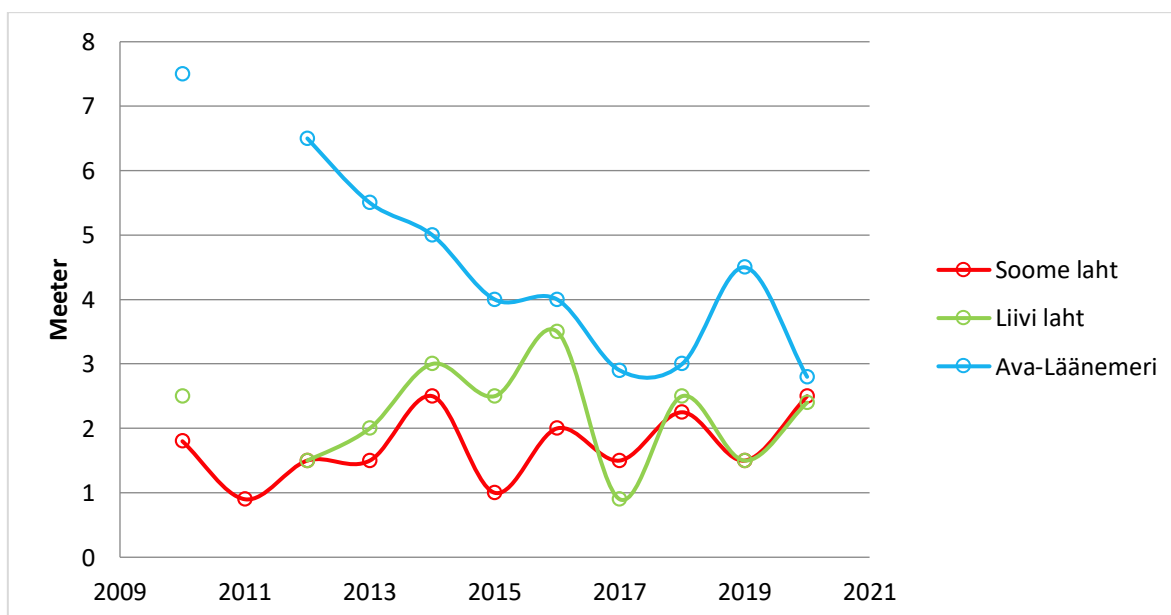
Joonisel 11 on kujutatud Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere suviseid maksimaalseid Secchi sügavusi perioodil 2010–2020. Sarnaselt kevadega on suvised maksimumid igal merealal on püsinud vaadeldud perioodi jooksul stabiilsed. Ka suvel on Liivi lahes maksimumid pigem madalamad teiste merealadega võrreldes. Soome lahe keskmine suvine maksimum perioodil 2010–2020 oli $5,9 \pm 1,0$ m, Ava-Läänemeres $6,4 \pm 1,3$ m ja Liivi lahes $5,1 \pm 1,8$ m. Üldiselt on Soome lahe ja Ava-Läänemere piirkonnas suvisel ajal vee läbipaistvus veidi halvem kui kevadel. Liivi lahes see erinevus selge ei ole. Kevadõitsenguga algab aktiivne hõljumi kasvu periood. Seega on veesambas pidev elutegevus ning seeläbi tekib ka enam jääke. Lisaks soodustab suvekuudel kõrgem veetemperatuur Läänemeres tsüanobakterite vohamist. Tsüanobakterite kogumid levivad üle Läänemere hoovuste abil ning suve teises pooles on enamik Eesti rannikuveest sellest mõjutatud. Hõljumi massi kasvades ei pääse valgus enam sügavamatesse veekihtidesse, mistõttu valguse hulk väheneb veesambas ning veekogu läbipaistvus väheneb.



Joonis 11. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere suvised maksimaalsed Secchi sügavused perioodil 2010–2020

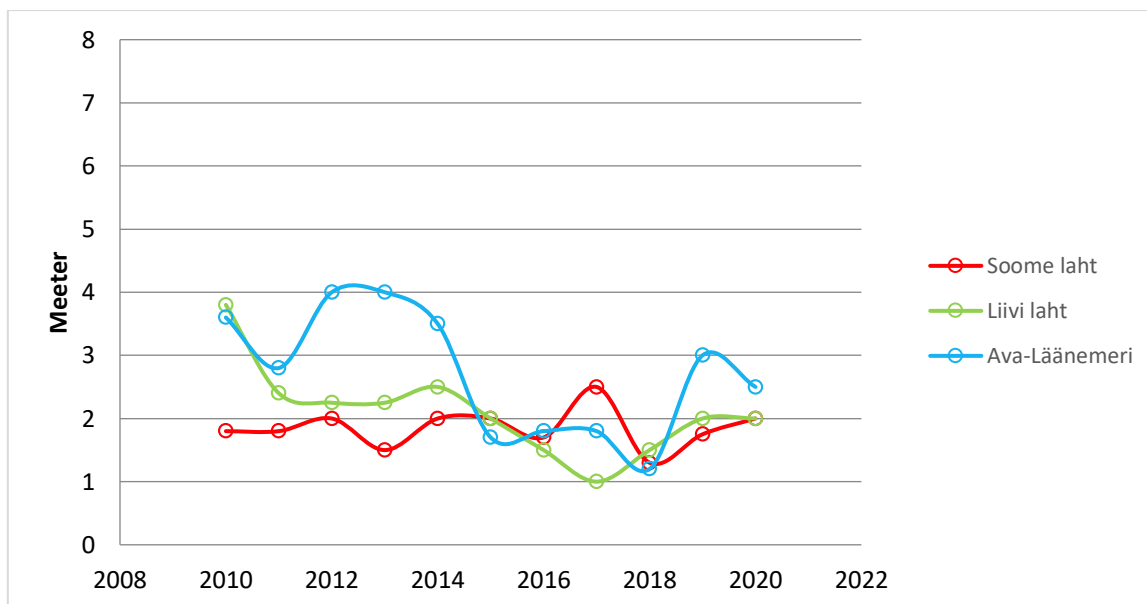
6.3 Minimaalsed Secchi sügavused (kevad-suvi)

Joonisel 12 on kujutatud Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere kevadisi minimaalseid Secchi sügavusi perioodil 2010–2020. Soome lahe keskmine kevadine miinimum oli $1,7 \pm 0,5$ m ja Liivi lahes $2,2 \pm 0,8$ m. Ava-Läänemere keskmine kevadine miinimum perioodil 2010–2020 oli $4,6 \pm 1,6$ m, mis võib olla aga üle hinnatud. Graafikult tundub, et Ava-Läänemeres on aastate jooksul vee läbipaistvus oluliselt halvenenud, kuid Ava-Läänemeres oli kevadisi mõõtepunkte terve perioodi jooksul pigem vähe (enamasti <10) (vt joonis 9 b), mistõttu sellist järeldust teha ei saa.



Joonis 12. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere kevadised minimaalsed Secchi sügavused perioodil 2010–2020

Joonisel 13 on kujutatud Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere suviseid minimaalseid Secchi sügavusi perioodil 2010–2020. Kõikides piirkondades on perioodi keskmine miinimum sarnane. Soome lahe keskmine suvede miinimum oli $1,9 \pm 0,3$ m, Liivi lahes $2,1 \pm 0,7$ m ja Ava-Läänemeres $2,7 \pm 1,0$ m. Minimaalsed sügavused on Soome ja Liivi lahes nii kevadel kui ka suvel sarnased.



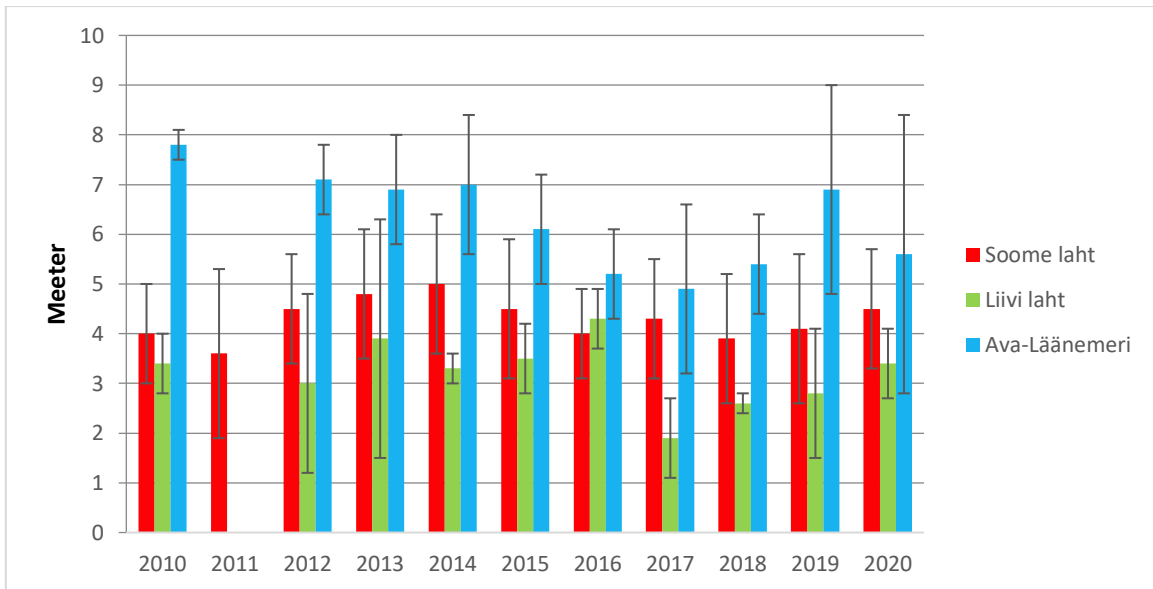
Joonis 13. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere suvised minimaalsed Secchi sügavused perioodil 2010–2020

Andmete põhjal hinnangut trendide kohta anda ei saa, kuna mõõtmisi on kohati vähe (< 10), eriti Liivi lahes ja Ava-Läänemeres. Et meres liiguks olukord paranemise suunas, oleks oodatav tulemus näha nii maksimaalsetes kui ka minimaalsetes Secchi sügavustes tõusvat trendi. Kõige usaldusväärsemalt saab hinnata olukorda Soome lahes, kus on mõõtmisi pidevalt mõnekümnest sajani. Võimalik, et 11-aastane periood on Secchi sügavustes trendi nägemiseks liialt lühike. Miinimumide puhul on olukord nii kevadel kui ka suvel püsinud stabiilsena. Soome lahe kevadiste ja suviste maksimumide trend on pigem negatiivne. Trendi determinatsioonikordaja on aga < 0.3 , mistõttu ei pruugi trend kirjeldada vaadeldava perioodi muutusi täpselt.

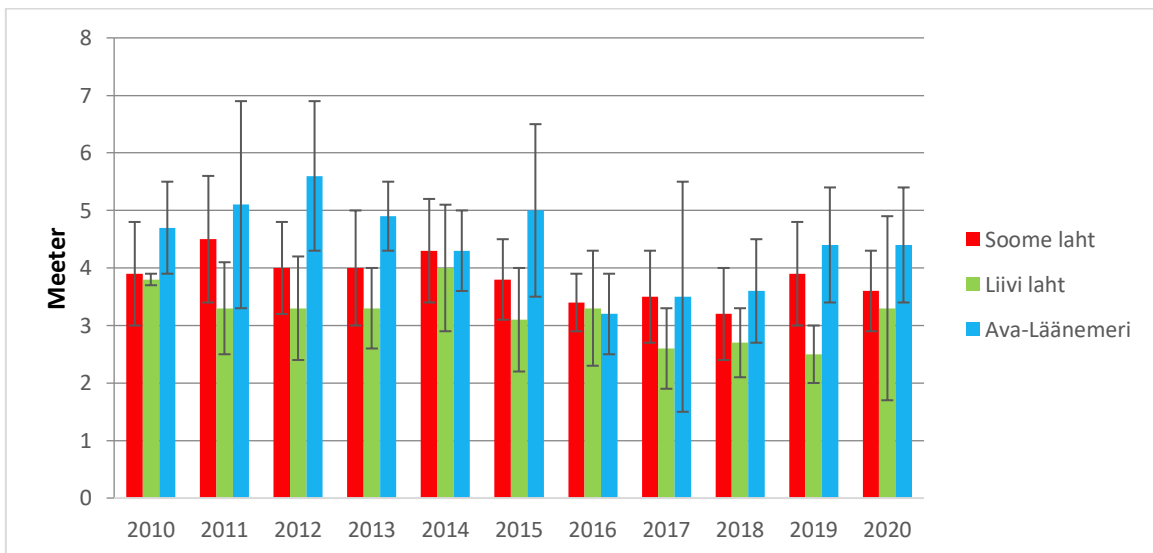
6.4 Keskmised Secchi sügavused (kevad-suvi)

Joonisel 14 on kujutatud Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere kevadised keskmised Secchi sügavused. Joonisel 15 on kujutatud Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere suvised keskmised Secchi sügavused. Lisaks on joonistel näha vearibad, mis näitavad standardhälvet. Standardhälve iseloomustab Secchi sügavuste hajuvust keskmise väärtuse suhtes. Soome lahes

on keskmine vee läbipaistvus suvel veidi halvem kui kevadel, vastavalt $3,8 \pm 0,4$ m ja $4,3 \pm 0,4$ m. Samas on muutlikkus kevadel suurem kui suvel. Ka Ava-Läänemeres on Secchi sügavused suvel pigem madalamad kui kevadel, vastavalt $4,4 \pm 0,7$ m ja $6,3 \pm 1,0$ m. Muutlikkus on Ava-Läänemeres nii kevadel kui ka suvel sarnane. Liivi lahes sellist erinevust välja ei tule ning vee läbipaistvus on kevadel $3,2 \pm 0,7$ m ja suvel $3,2 \pm 0,5$ m.



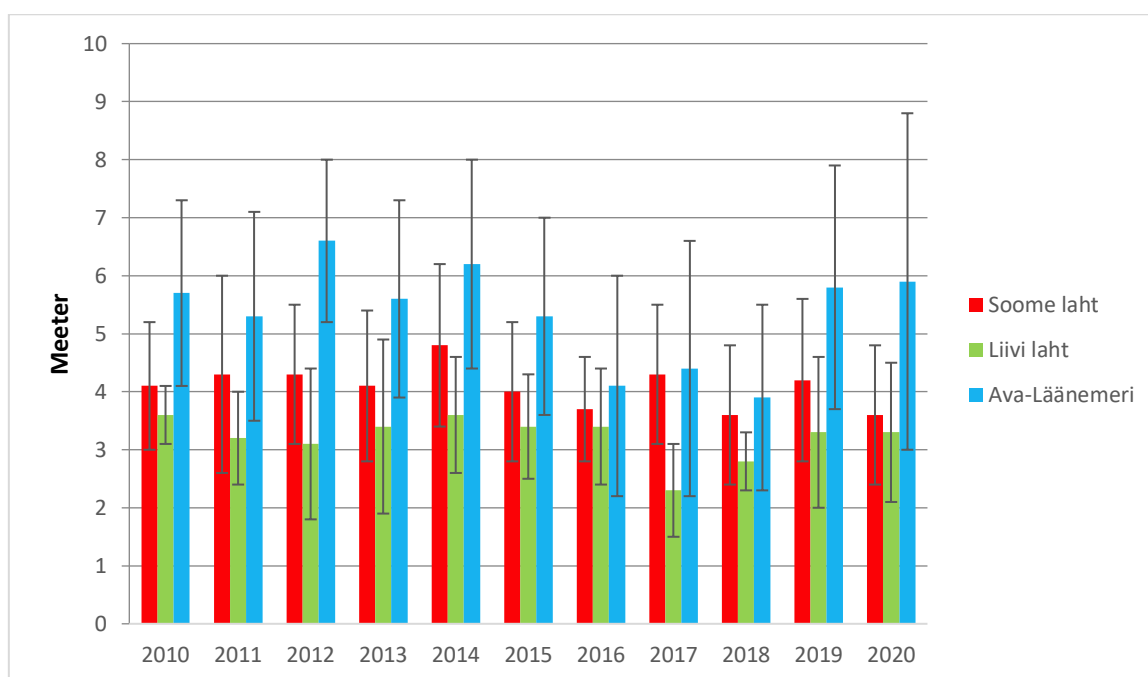
Joonis 14. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere kevadised keskmised Secchi sügavused perioodil 2010–2020



Joonis 15. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere suvised keskmised Secchi sügavused perioodil 2010–2020

6.5 Aasta keskmised Secchi sügavused (kõik aastaajad)

Joonisel 16 esitatud perioodi 2010–2020 keskmised Secchi sügavused viitavad, et üldiselt on vee läbipaistvus püsinud vaadeldava 11 aasta jooksul stabiilsel tasemel. Keskmiselt on Eestit ümbritseval merealal kõige parem vee läbipaistvus Ava-Läänemere piirkonnas ($5,3 \pm 0,9$ m). Soome lahes on nähtavus veidi halvem ($4,1 \pm 0,4$ m) ning kõige kehvemad näitajad on Liivi lahes ($3,2 \pm 0,4$ m). Tuleb välja tuua, et aasta keskmised võivad olla kallutatud madalamate väärtuste poole, sest sügisel ja talvel on palju vähem mõõtmisi tehtud kui kevadel ja suvel. Samas võib aga arvata, et talvel on vee läbipaistvus parem, kuna toimub vähem muutusi orgaanilise heljumi koguses. Seega mõõdetakse tõenäoliselt ka suuremaid Secchi sügavusi võrreldes suvise ajaga.



Joonis 16. Soome lahe, Liivi lahe ja Ava-Läänemere keskmised Secchi sügavused perioodil 2010–2020 (kõik aastaajad)

6.6 Hägusus perioodil 2010–2020

Peatükis on esitatud hägusus perioodil 2010–2020. Väärtused on arvutatud mõõdetud Secchi sügavustest ning näitavad oletatavat maksimaalset hägusust mõõdetud Secchi sügavuse ulatuses. Iseloomulik keskmine Secchi sügavus Ava-Läänemere piirkonnas on 5 m, Soome lahes 4 m ja Liivi lahes 3 m. Joonisel 17 ja 18 on esitatud vastavalt kevadised ja suvised hägususe maksimumid Eestit ümbritseval merealal.

Soome lahe piirkonnas kujutab joonis 17 ja joonis 18 vastavalt kevadist ja suvist maksimaalset hägusust umbes 4 meetri paksuses veekihis. Selgelt eristub Narva lahe piirkond ($59,5^{\circ}$ N, $27,8^{\circ}$ E) kõrgema hägususe tasemega. Lahes on hägususe enamasti 8–10 NTU, aga 2015. aastal on mõõdetud ka 15 NTU. Hägususe oletatav maksimaalne tase langeb liikudes idast läände ja rannikult avamere suunas ning on vahemikus 4–6 NTU. Näiteks 2014. aastal oli aga Soome lahe lääneosas hägususe tase ainult 3 NTU. Aastatevahelises muutlikkuses perioodil 2010–2020 eristuvad kõrgema ja madalama hägususe tasemega aastad. Kui lahe lääneosas on hägususe enamasti 3–4 NTU, siis 2016. ja 2018.–2019. aastatel oli see pigem 4–6 NTU. Paistab silma, et 2018. ja 2019. aastal ulatub hägusam (8–10 NTU) vesi lahe idaosast kuni keskosani, vastavalt umbes Kolga laheni ($59,6^{\circ}$ N, $25,5^{\circ}$ E) ja Käsmu laheni ($59,6^{\circ}$ N, $25,9^{\circ}$ E). Suvisel ajal on Soome lahes oodatav hägususe maksimaalne kõrgem kui kevadel, ning see on kõrgem peaaegu kogu mõõdistatud lahe piirkonna ulatuses. Narva lahe piirkonda iseloomustab hägususe 8–10 NTU nagu kevadeti. Lahe kesk- ja lääneosas on hägususe keskmiselt umbes 6 NTU, aga madalama hägususe tasemega (~ 4 NTU) on aastad 2011, 2014–2015.

Liivi lahe piirkonnas kujutab joonis 17 ja joonis 18 vastavalt kevadist ja suvist maksimaalset hägusust umbes 3 meetri paksuses veekihis. Perioodil 2010–2020 on enamasti Liivi lahes mõõdistatud punktides hägususe 6–8 NTU, aga 2017.–2018. aastal on lahe keskosas mitmes punktis hägususe >10 NTU. Seega võib aastatevaheline muutlikkus olla suur. Suvisel ajal mõõdistati Riia lahte laiemalt. Vaadeldava perioodi alguses on suviti Liivi lahes hägususe 6–8 NTU, aga aastatel 2015–2020 on hägususe kõrgem, 8–10 NTU. Võrreldes aastaid 2017, 2018 ja 2020, mil nii kevadel kui ka suvel on Liivi laht kaetud sarnase hulga punktidega, nähtub, et suvel on kõrgema hägususega ala laiem kui kevadel. 2017. ja 2018. aastatel on nii kevadel kui suvel kogu Riia laht kaetud kõrgema hägususega veekihiga. 2020. aastal on lahe keskosas ala, kus hägususe tase langeb 8 NTU pealt 6 NTU ligi.

Ava-Läänemere piirkonnas kujutab joonis 17 ja joonis 18 vastavalt kevadist ja suvist maksimaalset hägusust umbes 5 meetri paksuses veekihis. Ava-Läänemeri on kaetud Saaremaast ja Hiiumaast läände jääva merealaga. Kevadel on hägususe keskmiselt 2–4 NTU. Aastatel 2019–2020 on ka punkte, kus hägususe on umbes 1 NTU. Suvine oletatav hägususe maksimaalne on Ava-Läänemere piirkonnas suhteliselt ühtlaselt 4–6 NTU. Madalamaid väärtusi (<4 NTU) esineb laialdasemalt 2011. ja 2015. aastal.

6.7 Heljumi sisaldus

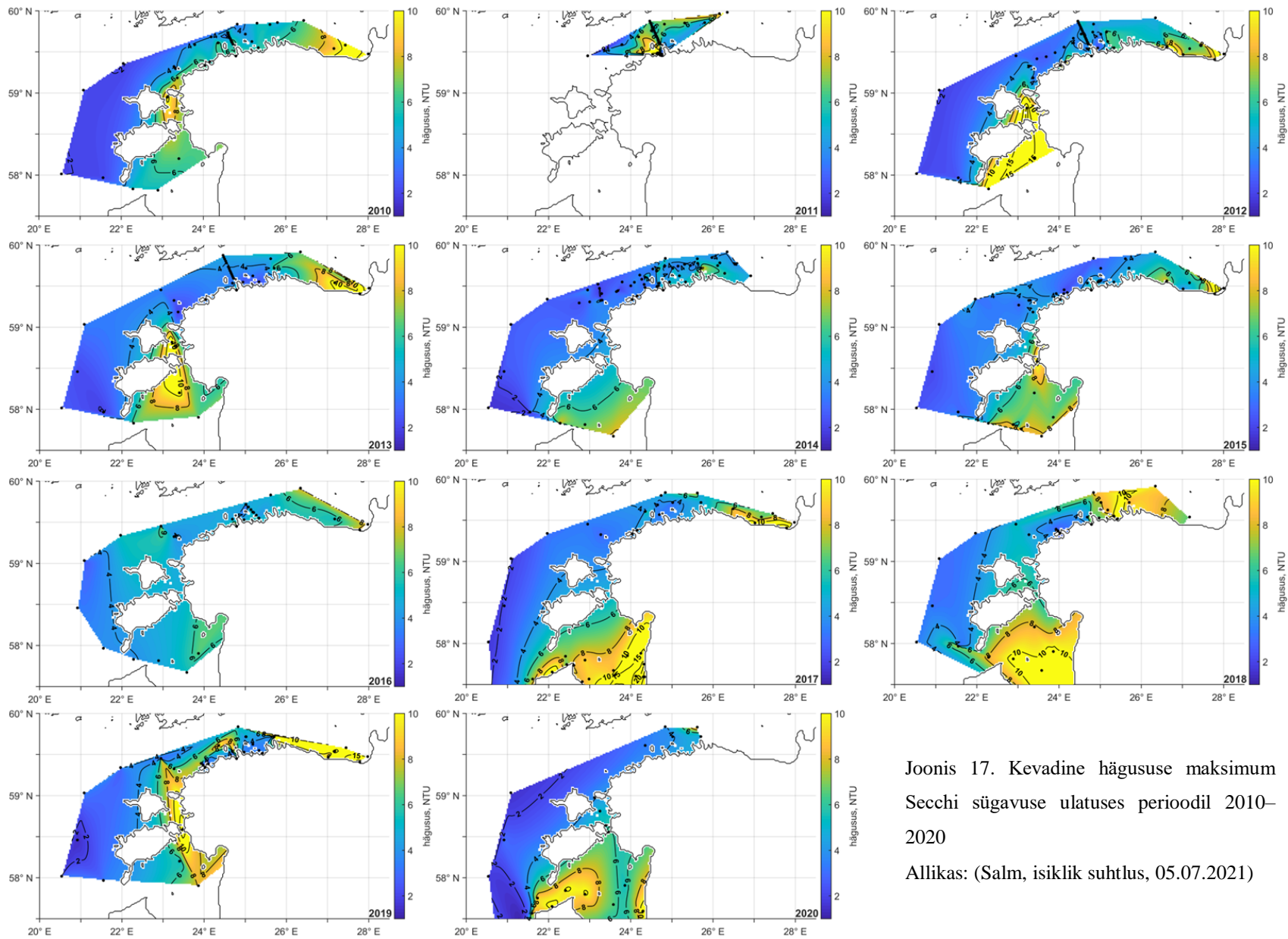
Väinameres tehtud uuringu põhjal on leitud, et heljumi kontsentratsioon (mg/l) ja hägusus (NTU) on ligikaudu võrdsed (Liblik ja Lips, 2011). See uuring käsitles aga rannikumerd, kus hägusus on kõrge. Avameres võib seos olla teistsugune. Sellegipoolest on hägusus ja heljum võrdelises seoses ning mida suurem on hägusus, seda rohkem on veesambas heljunit ja vastupidi. Joonisel 17 ja 18 on esitatud vastavalt kevadised ja suvised oletatavad hägususe maksimumid. Eesti rannikut ümbritseval merealal oli hägusus kõige madalam Ava-Läänemeres ja Soome lahe lääneosas, kus iseloomulik sügavus on 50–100 m. Tegemist on sügavaima piirkonnaga Eesti ümber. Seega heljumi sisaldus on väikseim avameres. Samuti nähtus Soome lahe mõõtepunktide järgi, et hägusus oli pigem kõrgem rannikualadel ning madalam avameres. Tõenäoliselt on avamere ja rannikualas leiduva heljumi koostis erinev, tulenevalt osiste allikatest.

Üldiselt saab mõõtepunktide järgi välja tuua, et kõrgema hägususega piirkonnad on Narva laht ning Liivi lahe idaosa. Lisaks on ka Väinameres hägusus kõrge – mõõtepunkte oli vähe, aga hägususe tase oli tihti >10 NTU. Erandiks oli 2020. aasta, mil nii kevadel kui ka suvel oli Väinameres hägususe maksimum 4–6 NTU. Heljumi sisaldust mõjutavad oluliselt lokaalsed tingimused. Liblik ja Lips (2011) on leidnud, et Väinameres mõjutavad heljumi kontsentratsioone peamiselt tuulest põhjustatud segunemine ja maismaalt tulev koormus. Väinamerre suubub Kasari jõgi, mis on selle piirkonna suurima sissevooluga jõgi. Liivi lahte suubub Daugava jõgi ja kuna vesi ringleb lahes kellaosutile vastupidises suunas, viib vesi Daugava jõest saabunud saasteaineid ja setteid mööda kallast ülespoole laiali. Narva lahte suubub Narva jõgi, mille mõju on tuntavam rannikupiirkonnas. Soome lahe idaosa mõjutab üldiselt ka Neeva jõe sissevool, mis on üks suurimatest Läänemerre suubuvatest jõgedest.

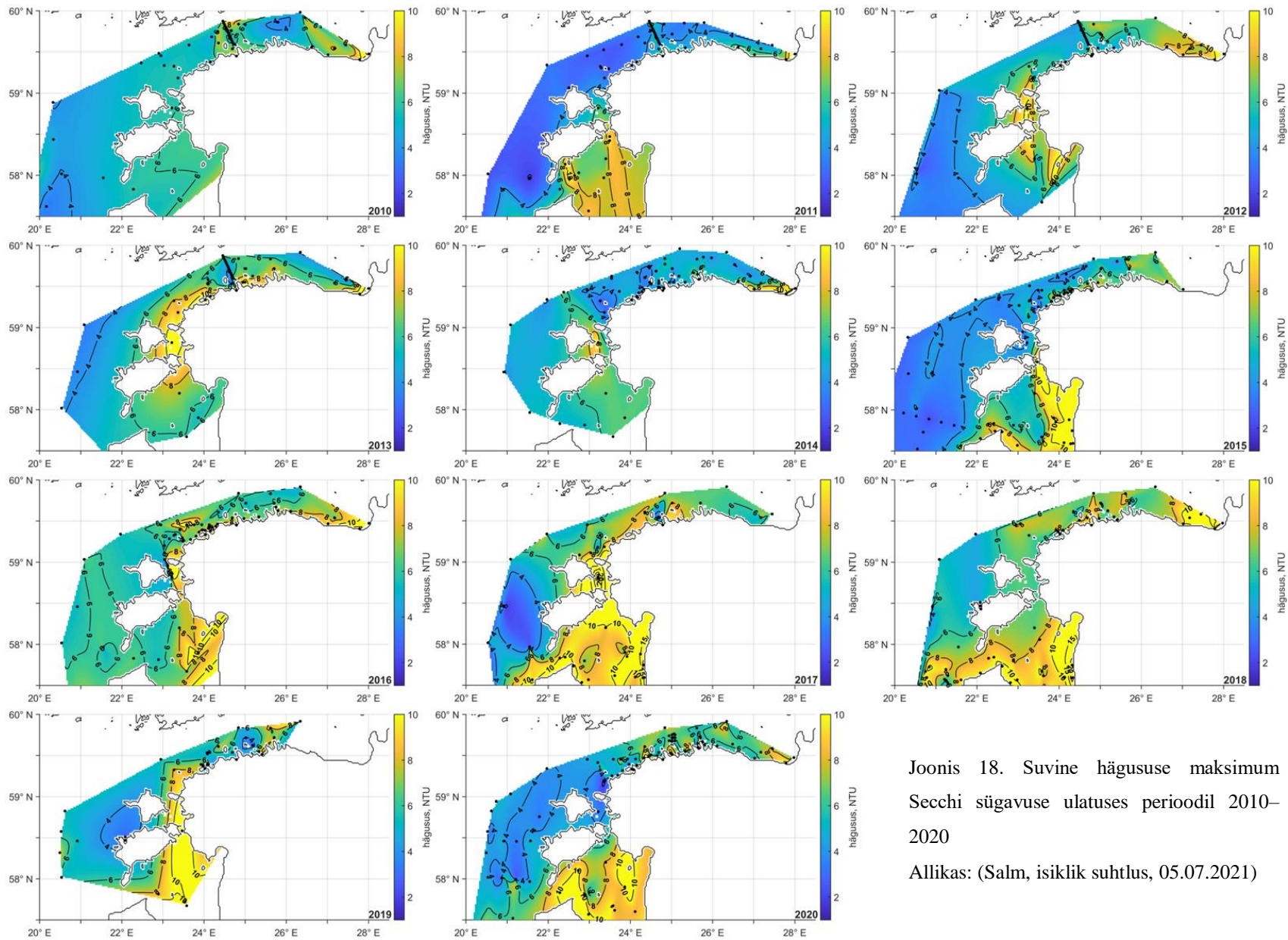
Töös on hinnatud kevade ja suve andmeid. Nähtus, et keskmiselt oli hägususe sisaldus veesambas suvel kõrgem kui kevadel. Suviti Ava-Läänemere ja Soome lahe piirkonnas, põhjustab kõrgemat hägususe sisaldust aktiivne produktsiooni periood. Vertikaalne segunemine on piiratud sesoonse termokliiniga ning alates kevadest hakkab materjal kuhjuma. Heljumi levik oleneb ilmastikuoludest. Hoovused küll kannavad hõljuvaid aineid pidevalt ringi, ent tuulevaiksed perioodid soodustavad hõljumite kogumite teket ning seega ka lokaalset heljumi hulga suurenemist.

Avameres on hägususe peamiseks mõjutajaks hoovused ja tuuled, mis kannavad heljunit laiali ja toovad rannikualadele kogunenud heljumi avamere poole edasi. Rannikupiirkonnas on

maismaalt tulev koormus pidev. Jõed kannavad setteid ja saasteained merre kõikidel aastaegadel, kuid aastaegade lõikes on see mõju erinev. Näiteks kevadine suurvesi suurendab jõgede sissevoolu. Suurenev sissevool selgitab, miks kevadistel joonistel on näha, et mõnel aastal ulatub hägune vesi rannikust kaugemale. Siis on tõenäoliselt nähtav ka Põhja-Eesti rannikualale suubuvate väiksemate jõgede mõju. Suvine tsüanobakterite õitseng mõjutab ava- ja rannikumerd sarnaselt. Õitsengu tulemusena tekkivad kogumikud levivad kogu mereala ulatuses. Kiirus ja intensiivsus olenevad ilmastikuoludest. Arvatavasti ei ole resuspensiooni mõju kevadel ja suvel domineeriv. Resuspensioon on tugevam sügiseti, kui tuuled on tugevamad. Tuule tugevus muutub aastaegade ja kevadsuvisel perioodil on tuuled keskmiselt nõrgemad kui sügisel-talvel.



Joonis 17. Kevadine hägususe maksimum
 Secchi sügavuse ulatuses perioodil 2010–
 2020
 Allikas: (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021)



Kokkuvõte

Heljum on vees heljuv tahke aine, mis koosneb erinevatest mineraalsetest ja orgaanilistest osakestest. Orgaanilise ja mineraalse osa suhe heljumis on muutlik. Orgaanilise osa moodustavad elusorganismide lagunemise järel tekkivad osakesed, aga ka jõed kannavad erinevat orgaanikat maismaalt merre. Rannikualasid mõjutab rohkem heljumi anorgaaniline osa, mis jõuab veesambasse rannikuerosiooni, ojade ja jõgede sissevoolu või põhjasetete kaudu. Tiheda inimasustuse ja tööstustega piirkondadest võib jõgede kaudu merre jõuda lisaks suurele hulgale toitainetele ka ohtlikke aineid.

Käesolevas töös hinnati heljumi sisaldust kaudselt ehk kasutades vee läbipaistvuse andmeid. Visuaalselt mõõdetakse vee läbipaistvust Secchi kettaga, mis üks vanimaid mõõtevahendeid. Tegemist on valge (või sektorite kaupa must-valge) metallist kettaga, mille läbimõõt on 30 cm. Ketas lastakse vette, kuni seda pole enam veepinnalt näha. Saadud sügavust nimetatakse Secchi sügavuseks ning see näitab, kui sügavale valgus vees levib. Hägusus on vee läbipaistvust iseloomustav optiline näitaja. Andmed saadakse suhtelistes ühikutes. Uurimis- ja seirereiside käigus kogutakse veeproove ja tehakse mõõtepunktides CTD sondiga mõõtmisi. Sondiga mõõdetakse erinevaid parameetreid, millest üks on hägusus. Hägususe anduri andmete ja samal ajal kogutud veeproovidest hinnatud heljumi kontsentratsioonide vahel leitakse regressiooniseos, mille abil saab hägususe teisendada heljumi sisalduseks. Nii on võimalik hinnata heljumit kohtades, kus heljumit otseselt mõõdetud ei ole. Veeproovide tegemine on ressursimahukas.

Eesti mereala kuulub Läänemere kirdeossa ning koosneb kolmest Läänemere alampiirkonnast: Soome laht, Liivi laht ja Läänemere avaosa. Eesti rannajoon ja ümbritseva mereala sügavusjaotus varieeruvad oluliselt. Võib arvata, et Eestit ümbritseval merealal heljumi sisaldus ja selle osiste osakaal pinnakihis varieerub, sest avatus avamerele ja liigendunud rannajoon loovad mitmekesise keskkonna.

Aastatest 2010–2020 oli Secchi kettaga teostatud 2200 mõõdistust – kõige suurem osa andmetest on aastast 2012 (275 mõõdistust) ja kõige vähem aastast 2019 (119 mõõdistust). Kõige rohkem ehk 67,2% kogu mõõdistustest tehti Soome lahes. Liivi lahe piirkonnas teostati 17,4% mõõdistustest ja Ava-Läänemeres 15,4%. Enamus, 53,8%, andmeid on pärit suvest. Kevadisse perioodi jääb 30,2%, sügisesse 10,8% ja talvesse 5,2% Secchi sügavuse mõõdistustest. Seetõttu vaadeldi töös peamiselt kevadsuviseid andmeid ning sügistalvisel perioodil kogutud andmeid jäid osaliselt kõrvale.

Kevadised ja suvised maksimaalsed Secchi sügavused on igal merealal püsinud vaadeldud 11-aastase perioodi jooksul sarnasel tasemel. Liivi lahes oli kevadise ja suvise perioodi keskmine maksimum vastavalt 4,5 m ja 5 m, mis oli madalam Soome lahe (7 m ja 6 m) ja Ava-Läänemerega (8,5 m ja 6,5 m) võrreldes. Soome lahe ja Ava-Läänemere piirkonnas on suvisel ajal on vee läbipaistvus veidi halvem kui kevadel. Liivi lahes see erinevus selge ei ole. Kevadised ja suvised minimaalsed sügavused on Soome lahes (vastavalt 1,5 m ja 2m) ja Liivi lahes (2 m ja 2 m) nii kevadel kui ka suvel sarnased. Ava-Läänemeres võib kevadine kõrge miinimum (4,5 m) olla üle hinnatud väheste mõõtepunktide (<10) tõttu. Suvel oli Ava-Läänemere minimaalseks sügavuseks 2,5 m. Kõige usaldusväärsem on hinnang Soome lahe kohta, kus on mõõtmisi pidevalt mõnekümnest sajani. Et merevee kvaliteet paraneks, oli oodatav tulemus näha tõusvat trendi nii maksimaalsetes kui ka minimaalsetes Secchi sügavustes. Statistiliselt usaldusväärseid trende ei täheldatud, mis tähendab, et 11-aastane periood võib olla liiga lühike Secchi sügavustes muutuste täheldamiseks.

Keskmiselt on Eestit ümbritseval merealal kõige parem vee läbipaistvus Ava-Läänemere piirkonnas ($5,3 \pm 0,9$ m). Soome lahes on nähtavus veidi halvem ($4,1 \pm 0,4$ m) ning kõige kehvemad näitajad on Liivi lahes ($3,2 \pm 0,4$ m). Aasta keskmised võivad olla kallutatud madalamate väärtuste poole, sest sügisel ja talvel on palju vähem mõõtmisi tehtud kui kevadel ja suvel. Samas tõenäoliselt on talvel vee läbipaistvus parem ehk mõõdetud Secchi sügavused oleksid suuremad, kuna produktsioon on madal ning vertikaalne segunemine on võrreldes suvega palju ulatuslikum. Keskmised väärtused kinnitavad varasema analüüsi tulemusi, kus leiti, et viimase sajandi jooksul on Secchi sügavus on vähenenud Läänemere põhjaosas 9 m-lt 5 m-le ja Soome lahes 8 m-lt 4 m-le ning Liivi lahes on vee läbipaistvus üldiselt väiksem võrreldes teiste alambasseinidega.

Hägusus ja heljum võrdelises seoses. Seega, mida suurem on hägusus, seda rohkem on veesambas heljunit ja vastupidi. Hägususe ja Secchi sügavuste vaheline seos leiti 2019. aasta andmete põhjal. Seose abil teisendati Secchi sügavused hägususe väärtusteks. Hägusus perioodil 2010–2020 näitab oletatavat maksimaalset hägusust mõõdetud Secchi sügavuse ulatuses. Üldiselt saab mõõtepunktide järgi välja tuua, et kõrgema hägususega piirkonnad on Narva laht, Liivi lahe idaosa ja Väinameri. Madalaim on hägusus Ava-Läänemeres ja Soome lahe lääneosas. Soome lahes oli punkte nii ranniku- kui ka avameres. Nähtus, et tihti oli hägusus kõrgem rannikualadel ning madalam avameres ja suviti oli erinevus tugevam. Vastavalt võib eeldada, et rannikupiirkonnas kõrgemat ja avameres madalamat heljumi sisaldust. Heljumi koostis on

ilmselt aga mõjutatud erinevatest protsessidest. Näiteks rannikualasid mõjutab maismaalt tulev koormus enam kui avamerd.

Käesolevat lõputööd on võimalik edasi arendada, lisades teiste aastate (2010–2020) hägususe mõõtmisi ja kasutada veeproovidest leitud heljumi kontsentratsioone. Hägususe ja heljumi vaheline seos võimaldab hinnata heljumi sisaldust täpsemalt. Lisaks võiks uurida, kas ava- ja rannikumeres on suhe hägususe ja heljumi vahel sarnane.

Summary

Natural variability of total suspended matter in the surface layer of the sea area surrounding Estonia

Mari Kasemets

The thesis is written in Estonian.

The Baltic Sea is defined as one of the most polluted seas in the world. The catchment area is several times larger than the sea itself and, thus, the amount of pollutants from industries, households and agriculture brought in the sea is significant. Previous studies have assessed that water has become more turbid over the years. The aim of this thesis was to characterize the natural background of the total suspended matter in the surface layer of the sea area surrounding Estonia. The analysis bases on the water transparency and turbidity data collected by the Department of Marine Systems of Tallinn University of Technology in 2010–2020. The data was divided according to the sub-basins of the Baltic Sea – Gulf of Finland, Gulf of Riga and the Baltic Proper. The characteristics of the sea (e.g. depth, bottom sediments, inflow) and the surrounding land area determine the typical levels and the composition of the total suspended matter. Most of the data were collected in spring and summer (84%) and the coverage was the best in the Gulf of Finland (67,2% of the data). Comparing the data from spring and summer the analysis of the Secchi depths suggest that the water transparency is better in spring in the Gulf of Finland and in the Baltic Proper. The production increases when the spring bloom begins. Therefore, the dead particulate organic material accumulates in the surface layers while the seasonal thermocline limits vertical mixing. In general, water transparency has remained stable over the period of 2010–2020, but the period may be too short to detect trends. Previous studies have found that the Secchi depths have decreased from 9 m to 5 m in the northern Baltic Proper and from 8 m to 4 m in the Gulf of Finland during previous decades and in the Gulf of Riga, the water transparency is lower than in the other sub-basins. The average Secchi depths corroborate this result. On average, the Secchi depth is $5,3 \pm 0,9$ m in the Baltic Proper, $4,1 \pm 0,4$ m in the Gulf of Finland and $3,2 \pm 0,4$ m in the Gulf of Riga.

The concentration of the total suspended matter and turbidity is proportionally related meaning that the higher levels of turbidity indicate to the larger amount of the total suspended matter in the water and contrary. A relationship between Secchi depth and turbidity were found based on the data from 2019. The turbidity converted from Secchi depths show the maximum of turbidity

over the measured Secchi depth. The general level of turbidity varied in 2010–2020 suggesting that in some years, the water is more turbid. The highest levels of turbidity were found in the Gulf of Narva, in the eastern part of the Gulf of Riga and in Väinameri. The total suspended matter in those areas are affected by river inflow, vicinity of the coast, shallow depths and their combined effect. The lowest levels of turbidity were found in the Baltic Proper and in the western Gulf of Finland where characteristic depths are 50–100 m. Turbidity was found to be higher in the coastal and lower in the offshore areas. In summer, the difference was stronger. The higher and lower concentration of the total suspended matter can be assumed respectively. However, the composition is probably different. For example, the effect of anthropogenic loads is larger in the coastal areas.

This thesis can be developed further by involving the turbidity measurements from the other years (2010–2020) and using the concentrations of the total suspended matter from water samples. Finding the relationship between turbidity and the total suspended matter allows to assess the levels of the total suspended matter in the sea area surrounding Estonia more accurately.

Keywords: total suspended matter, water transparency, turbidity, Secchi disk, the Baltic Sea.

Viidatud allikad

- Kyryliuk D. & Kratzer S. (2019). Summer Distribution of Total Suspended Matter Across the Baltic Sea, *Frontiers in Marine Science*. (22.03.2021)
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2018.00504/full>
- IES - Institute for Environmental Solutions (2016). Joonis 2. Daugava jõgi kannab Läänemerre toitainetele lisaks ka ohtlikke aineid. (18.07.2021)
<http://www.videsinstituts.lv/en/projects/water/reducing-nutrient-inflows-into-the-baltic-sea>
- SKYE (2017). Joonis 1. Tsüanobakterite kogumid Soome Lahe ja Ava-Läänemere piiril 2017. aasta suvel. (03.05.2021)
[https://www.syke.fi/en-US/Current/Algal_bloom_monitoring_July_27_2017_Bloo\(43932\)](https://www.syke.fi/en-US/Current/Algal_bloom_monitoring_July_27_2017_Bloo(43932))
- Morel, A., & Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22, lehekülg 709–722. (22.03.2021)
<https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- Kirk, J. T. O. (1985). Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. *Cambridge University Press* (22.03.2021)
https://books.google.ee/books?hl=en&lr=&id=It5GePwa2EIC&oi=fnd&pg=PR11&ots=JTrmXVbpKe&sig=bNhJZihx9qbJuYMEYuEN1ONEhWQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- IOCCG. (2000). Remote sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters, Sathyendranath, S. (Ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, nr. 3 IOCCG. (22.03.2021) <https://ioccg.org/wp-content/uploads/2015/10/ioccg-report-03.pdf>
- Randla M., Uudeberg K., Ligi M., Bourrin F. (2018). Heljumi omaduste ja dünaamika varieerumine Pärnu lahes. *Kaugseire Eestis 2018*, lehekülg 46. (20.07.2021)
<https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4600>
- Padis'ak J., Hajnal E., Naselli-Flores L., Dokulil M., Nõges P., Zohary T. (2010). Convergence and divergence in organization of phytoplankton communities under various regimes of physical and biological control. *Hydrobiologia*. 639. 205–220. 10.1007/s10750-009-0021-5. (03.05.2021)

https://www.researchgate.net/publication/226090693_Convergence_and_divergence_in_organization_of_phytoplankton_communities_under_various_regimes_of_physical_and_biological_control

Lips I. (2011). Fütoplanktoni vähem tuntud pool. (18.07.2021)

http://eestiloodus.horisonit.ee/artikkel4227_4202.html

HELCOM. (2009). Eutrophication in the Baltic Sea. An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. *Baltic Sea Environment Proc.* 115B, lehekülj 15–17. (02.05.2021) <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP115B-1.pdf>

Raudsepp, U., Laanemets, J., Haran, G., Alari, V., Pavelson, J., Kouts, T. (2011). Flow, waves and water exchange in the Suur Strait, Gulf of Riga, in 2008. *Oceanologia*, 53, lehekülj 35-56 (22.03.2021) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0078323411500028>

Sipelgas L. & Siitam L. (2020). Paldiski Lõunasadama süvendustööde aegse heljumi seire aruanne. (09.04.2021) <https://www.ts.ee/wp-content/uploads/2020/05/Paldiski-L%C3%B5unasadama-s%C3%BCvendust%C3%B6%C3%B6de-heljumi-seire-aruanne-2020.pdf>

Noorma A., Lang M., Alikas K., Jakobson L., Olesk A., Kutser T., Post P., Toll V., Uiboupin R., Sipelgas L., Raudsepp U., Rikka S., Oja T., Sagris V., Puust R., Liibusk A., Sepp K., Järveoja M., Voormansik K. (2020). Kaugseire jätkusuutliku rakendamise kava. *Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamise programmi (RITA) tegevus I raames 2019–2020 aastate projekt „Kaugseire andmete kasutuselevõtt avalike teenuste väljatöötamisel ja arendamisel“ („KAUGSEIRE“, leping nr 7.8-3/18/17).* (03.05.2021) <https://datadoi.ee/bitstream/handle/33/305/Kaugseire%20j%C3%A4tkusuutliku%20rakendamise%20kava.pdf?sequence=9&isAllowed=y>

Ohde, T., Siegel, H. (2001). Correction of bottom influence in ocean colour satellite images of shallow water areas of the Baltic Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 22, lehekülj 297-313. (22.03.2021)

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311601449943>

Keskkonnaagentuur (2018). Riikliku keskkonnaseire programmi mereseire allprogramm. *Keskkonnaagentuur*. (20.07.2021)

<https://keskkonnaagentuur.ee/keskkonnaagentuuri-tegevusvaldkonnad/vesi/meri#mereseire>

Preisendorfer, R. W. (1986). Secchi disk science: Visual optics of natural waters. *Limnology and Oceanography*, 31, lehekülj 906–926. (22.03.2021)

Anderson, D. M., Andersen, P., Bricelj, V. M., Cullen, J. J., Rensel, J. E. (2001). Monitoring and Management Strategies for Harmful Algal Blooms in Coastal Waters. *Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No. 59*. (22.03.2021)

Nõges, P. (2020). Uuring Peipsi järve füüsikalise-keemilise ja fütoplanktoni kvaliteedinäitajate klassipiiride täpsustamiseks, lehekülj 16. (22.03.2021)

https://www.envir.ee/sites/default/files/Vesi/Uuringudjaaruanded/2021/peipsi_vrd_kriteeriumite_aruanne_2020.pdf

Google Maps (2021) Joonis 3. Läänemere osad. (2021). Satelliitfoto: Google Maps. (02.05.2021)

<https://www.google.com/maps>

Ojaveer, H., Jaanus, A., MacKenzie, B. R., Martin, G., Olenin, S., Radziejewska, T., Telesh, I., Zettler, M., Zaiko, A. (2010). Status of Biodiversity in the Baltic Sea. *PLoS ONE*, 5. (22.03.2021) <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0012467>

Elken, J. & Matthäus, W. (2008). Baltic Sea oceanography. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. BALTEX Publication*. (03.05.2021)

https://www.researchgate.net/publication/284270361_Baltic_Sea_oceanography

Lips, U. & Lips I. (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*. Väljaanne 101, leheküljed 107-119. (03.05.2021)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967064513002208>

Liblik T. & Lips U. (2012). Eesti mereala keskkonnaseisundi esialgne hindamine. *TÜ EESTI MEREINSTITUUT*. Lehekülj 18–34. (09.04.2021)

https://www.envir.ee/sites/default/files/ia_aruanne.pdf

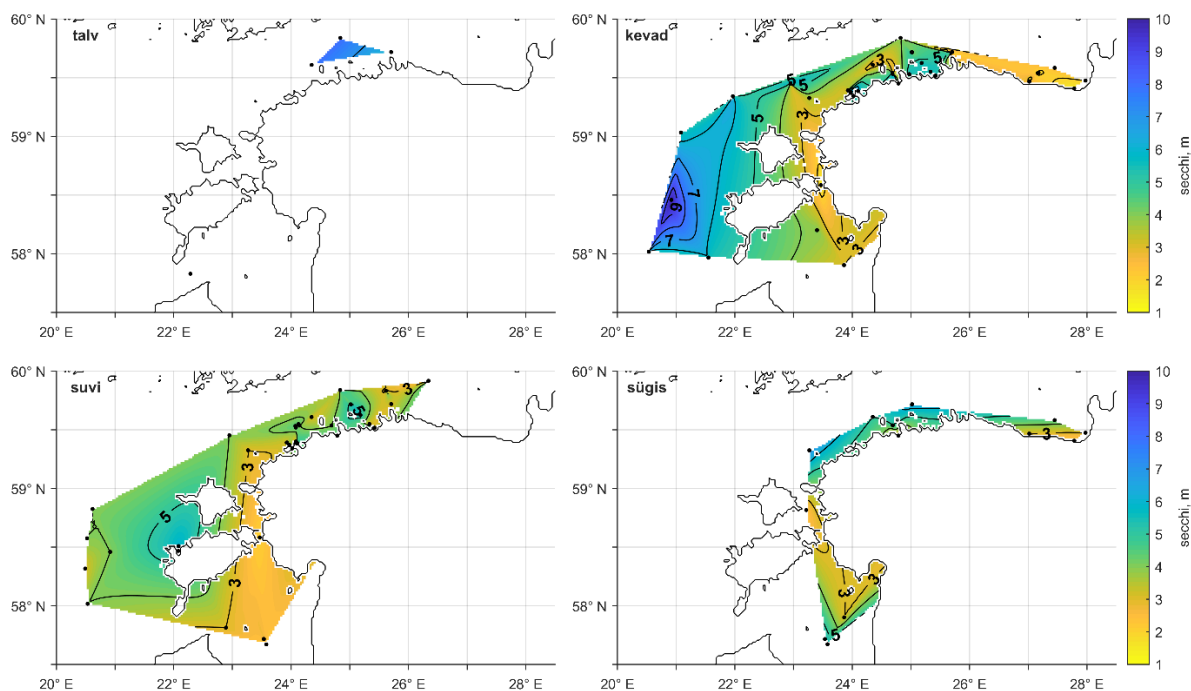
Keskkonnaagentuur, (2021). Joonis 4. Eesti mereala jaotus. (20.07.2021)

<https://keskkonnaagentuur.ee/keskkonnaagentuuri-tegevusvaldkonnad/vesi/meri#mereseire>

- Lundberg, C. (2014). Water Quality of the Baltic Sea. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 4, lehekülg 251–269. (09.04.2021) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00077-3>
- Lainela S. (2012). Eesti mereala keskkonnaseisundi esialgne hindamine. *TÜ EESTI MEREINSTITUUT*. Lehekülg 35–40. (09.04.2021) https://www.envir.ee/sites/default/files/ia_aruanne.pdf
- Liblik T., 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*, 64:561-566. (20.05.2021) https://www.researchgate.net/publication/258993400_Spreading_of_suspended_matter_in_a_shallow_sea_area_influenced_by_dredging_activities_and_variable_atmospheric_forcing_Results_of_in-situ_measurements
- Baughman C., Jones B., Bartz K. K., Young D. (2015). Reconstructing Turbidity in a Glacially Influenced Lake Using the Landsat TM and ETM+ Surface Reflectance Climate Data Record Archive, Lake Clark, Alaska. *Remote Sensing*, 7(10):13692-13710. (20.05.2021) https://www.researchgate.net/publication/283018161_Reconstructing_Turbidity_in_a_Glacially_Influenced_Lake_Using_the_Landsat_TM_and_ETM_Surface_Reflectance_Climate_Data_Record_Archive_Lake_Clark_Alaska

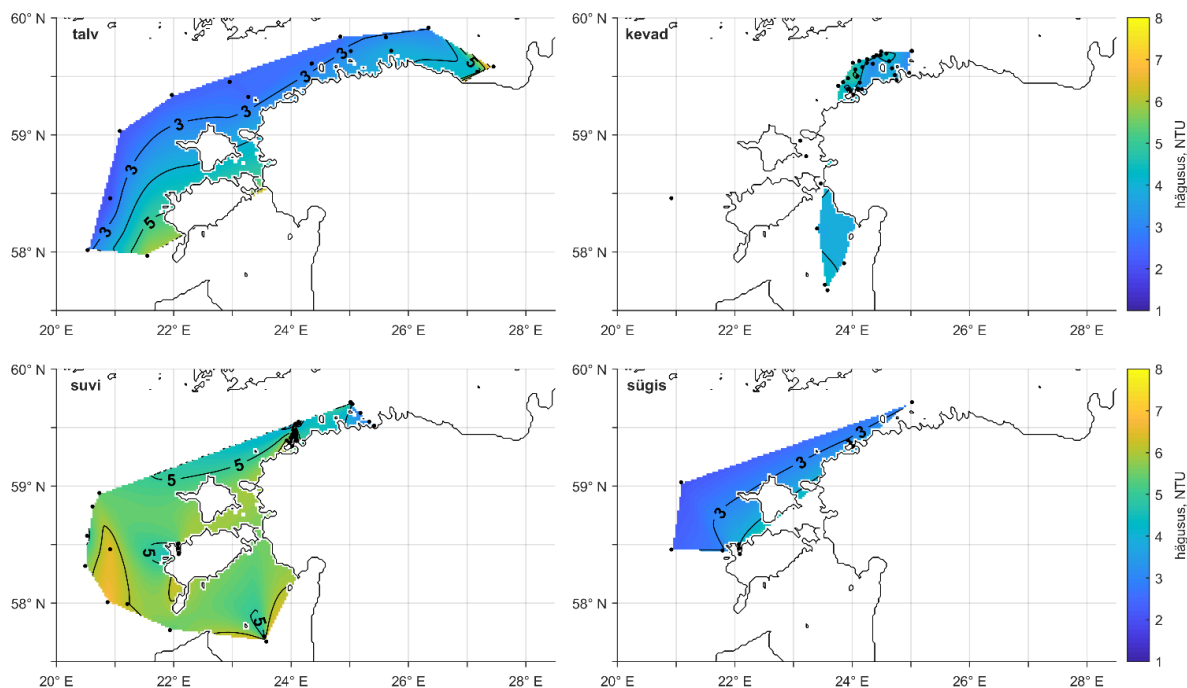
Lisa 1 – hägususe ja Secchi sügavuse vaheline seos

Joonisel 19 ja joonisel 20 on kujutatud vastavalt mõõdetud Secchi sügavusi ja hägusust Eestit ümbritseval merealal 2019. aastal. Joonistel esitatud andmeid kasutati hägususe ja Secchi sügavuse vahelise seose leidmiseks. Hägususe andmed jaotuvad Secchi sügavustest erinevalt. Näiteks võrreldes Secchi sügavustega on hägusust talvel mõõdetud enam, aga kevadel vähem. Talvest on ainult kolm Secchi mõõtepunkti Soome lahes ning hinnanguline läbipaistvus on umbes 6–7 m. Vastava hägususe maksimum umbes 3 NTU. Üldiselt kasvavad Secchi sügavuse väärtused rannikult avamere suunas ehk vesi on selgem pigem avamerel. Näiteks kevadel on Eesti rannikualadel Secchi sügavus umbes 3 m, aga Ava-Läänemere piirkonnas on mõõdetud vee läbipaistvuseks 9 m. Rannikualadel on kevadel hägususe maksimum umbes 4–5 NTU (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021).



Joonis 19. Secchi sügavused eri aastaegadel Eestit ümbritseval merealal 2019. aastal. Mustad punktid märgivad mõõtepunkte

Allikas: (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021)



Joonis 20. Hägusus eri aastaegadel Eestit ümbritseval merealal 2019. aastal. Mustad punktid märgivad mõõtepunkte

Allikas: (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021)

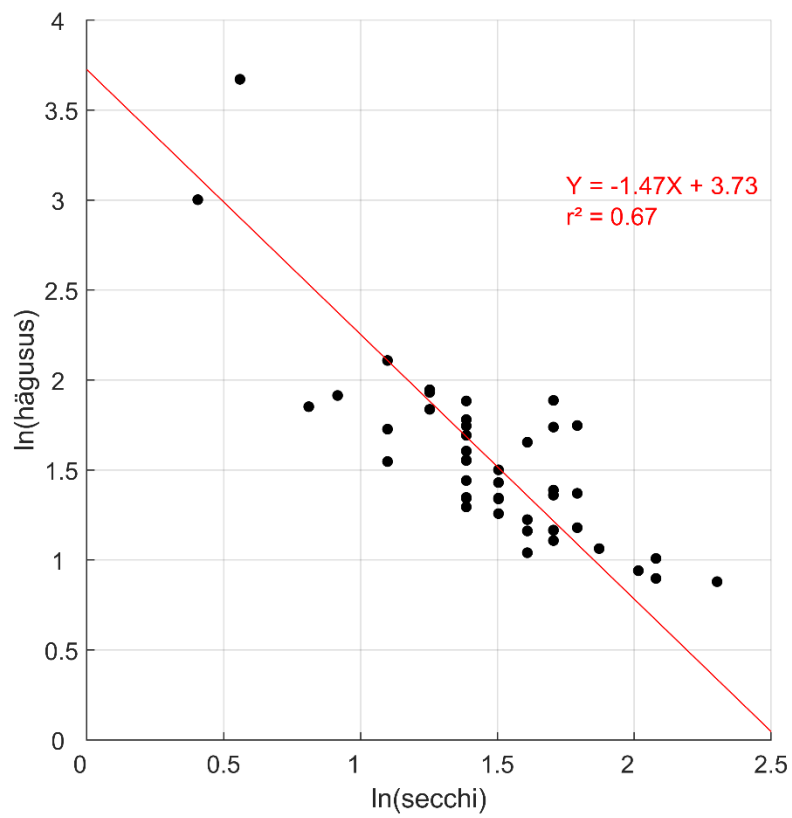
Kokkulangeva 45 andmepaari põhjal leiti lineaarne seos hägususe ja Secchi sügavuse kuupäevnaturaallogaritmide vahel (joonis 21). Kehtiv seos on

$$Y = -1.47X + 3.73$$

Seose determinatsioonikordaja on 0.67. Vastav eksponentsiaalne seos Secchi sügavuse ja hägususe vahel on (ptk. 5.2, joonis 7)

$$y = 41.49 * x^{-1.47}$$

Teisendatud hägususe väärtus näitab hägususe maksimumi Secchi sügavuse ulatuses. Punktides, kus samaaegset Secchi sügavust mõõdetud pole, on hägususe maksimumi valimiseks kasutatud mereala keskmist Secchi sügavust (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021).



Joonis 21. Lineaarne seos hägususe ja Secchi sügavuse naturaallogaritmide vahel

Allikas: (Salm, isiklik suhtlus, 05.07.2021)

Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Mari Kasemets

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) enda loodud teose “Heljumi sisalduse looduslik muutlikkus Eestit ümbritseva mereala pinnakihis”, mille juhendaja on doktorant-nooremteadur Kai Salm.

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

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

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

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

25.07.2021

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