

**TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL**

Matemaatika-loodusteaduskond

Okeanograafia õppetool

**ESMASTE OPTILISTE PARAMEETRITE  
MUUTLIKKUS LOODE-EESTI RANNIKUMERES 2013.**

**AASTA SUVEL**

**Bakalaureusetöö**

**Age Arikas**

Juhendaja: Laura Siitam, Meresüsteemide instituut,

nooremteadur

Kaasjuhendaja: Rivo Uiboupin, Meresüsteemide instituut,

vanemteadur

Maa-teadused

2015

## Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

Age Arikas

Allkiri ja kuupäev

Juhendaja: Laura Siitam

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Allkiri ja kuupäev

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

nimi, allkiri, kuupäev

## LÜHIKOKKUVÕTE

Antud töö teemaks on esmaste optiliste parameetrite muutlikkus Loode-Eesti rannikumeres 2013. aasta suvel. Esmasteks optilisteks parameetriteks on neeldumise ja hajumise omadusi veekeskkonnas erinevatel kiirguse lainepikkustel kirjeldavad neeldumiskoeffitsient  $a$  ja hajumiskoeffitsient  $b$ . Nende koeffitsientide summa moodustab nõrgenemiskoeffitsiendi  $c$ . Käesolevas töös on uuritud instrumendiga AC-Spectra mõõdetud neeldumis- ja hajumiskoeffitsientide seoseid bioloogiliste ja füüsikaliste parameetritega veesamba ülemises kihis. Erinevate vee kihtide võrdlusest nähtub, et hajumine on segunenud kihis suurem kui termokliinis, väärtused on vahemikus  $1,1-1,9 \text{ m}^{-1}$  ja  $0,8-1,4 \text{ m}^{-1}$ , vastavalt 400 ja 700 nm juures. Seda muutlikust põhjustavad muutused klorofüllü väärtustes ja bioloogilises produktsioonis. Samas segunenud kihis ja termokliinis asetsevad neeldumisspektrid on üksteisega võrreldes üsna sarnased, väärtused varieeruvad vahemikus  $1,1-1,2 \text{ m}^{-1}$  400 nm juures ja  $0,01-0,05 \text{ m}^{-1}$  700 nm lähedal.

Regulaarne kontaktmõõtmiste teostamine on kulukas ning tehniliselt raskendatud, sellepärast on üha aktuaalsemaks muutunud satelliitkaugseire kasutamine. Probleemiks on, et Läänemeri on optiliselt keerukas veekogu, mille tõttu on sobivaid kaugseirealgoritme raskem leida. Lisaks on raskendavateks faktoriteks päikese madal kõrgus suurtel laiuskraadidel, pidev pilvkate ning kõrge lahustunud orgaanilise aine kontsentratsioon. Kaugseire andmete sobivuse üle otsustamiseks on antud töös uuritud Loode-Eesti rannikumere kontaktmõõtmiste andmete vastavust satelliidilt saadud andmetega. Tulemuste võrdlus näitab, et determinatsioonikordaja  $R^2$  neeldumiskoeffitsientide vahel on 0,675 ning klorofüllü väärtuste võrdluses 0,405, ehk parameetrite omavaheline kokkulangevus on hea või keskmine.

Võtmesõnad: optika, *in situ*, esmased optilised omadused, kaugseire, rannik

## ABSTRACT

### **Variability of inherent optical properties in the coastal waters of northwestern Estonia during summer 2013**

The Diploma work focuses on variability of inherent optical properties in the coastal waters of northwestern Estonia during summer 2013. The main inherent optical properties are absorption coefficient  $a$ , scattering coefficient  $b$  and beam attenuation coefficient  $c$  ( $c = a + b$ ). Absorption coefficients and scattering coefficients are investigated in this diploma and their relation to biological and physical parameters is analyzed. From the results we can conclude that scattering is more intensive in the upper mixed layer than in thermocline, the values are in between of 1,1-1,9  $\text{m}^{-1}$  and 0,8-1,4  $\text{m}^{-1}$ , respectively nearby 400 and 700 nm. On the other hand, absorption spectra in those layers are pretty similar when comparing with each other, the values are in between of 1,1-1,2  $\text{m}^{-1}$  nearby 400 nm and 0,01-0,05  $\text{m}^{-1}$  around 700 nm.

Performing regular *in situ* measurements is expensive and technically troublesome, due to that exploitation of remote sensing has increased. The problem is that Baltic Sea is optically complex water body, where finding suitable remote sensing algorithms is challenging. In order to test the suitability of remote sensing data for monitoring of water quality parameters in northwestern Estonia coastal water the satellite data and *in situ* measurement are compared in this diploma. In conclusion the coefficients of determination are 0,675 between absorption coefficients and 0,405 when comparing with chlorophyll  $a$  values.

Key words: optica, *in situ*, inherent optical properties, remote sensing, coast

## SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT.....	4
SISUKORD.....	5
SISSEJUHATUS.....	6
1. PIIRKONNA KIRJELDUS .....	8
2. ESMASED OPTILISED OMADUSED.....	10
3. SATELLIITKAUGSEIRE.....	12
4. KASUTATUD ANDMED JA MEETODID .....	14
4.1. Laborianalüüs.....	14
4.2. AC-spektra.....	14
4.3. Satelliitandmed .....	15
4.4. Temperatuur, soolsus ja klorofüll- <i>a</i> fluorestsents.....	15
4.5. Võrdlusmeetodid .....	16
5. TULEMUSED .....	17
5.1. Veekeskkonna olukorra kirjeldus seirepäevadel .....	17
5.2. Vee pinnakihi ja segunenud kihi spektrid .....	20
5.3. Neeldumiskoeffitsiendi ja hajumiskoeffitsiendi võrdlus .....	22
5.4. Vertikaalsed profiilid .....	24
5.5. Satelliitkaugseire .....	30
KOKKUVÕTE .....	32
VIIDATUD ALLIKAD .....	34

## SISSEJUHATUS

Üheks rannikumere seire osaks on teostada järjepidevat vee kvaliteedi seiret (Keskkonnaagentuur 2011). Vee optilise kvaliteedi uurimiseks teostatakse mõõtmisi veekeskkonna optiliselt aktiivsete ainete ning esmaste optiliste parameetrite kohta. Esmasteks optilisteks parameetriteks on neeldumise ja hajumise omadusi veekeskkonnas erinevatel kiirguse lainepikkuste kirjeldavad neeldumiskoeffitsient  $a$ , hajumiskoeffitsient  $b$  ning nõrgenemiskoeffitsient  $c$ . Optiliselt aktiivseteks aineteks on fütoplankton, kollane aine ja heljum (Leppäranta jt 2009). Läänemeri, sealhulgas Eesti rannikumeri, on optiliselt keerukas veekogu, tänu millele ei saa hinnata kollase aine ehk CDOMi ja heljumi kontsentratsioone klorofüllü kaudu, kuna suurem osa CDOMi ja heljumi pärineb maismaalt (Kutser jt 2008). Käesoleva töö üheks eesmärgiks oli instrumendiga AC-Spectra<sup>1</sup> mõõdetud neeldumis- ja hajumiskoeffitsientide vertikaalsete profiilide seostamine bioloogiliste ja füüsikaliste parameetritega. Lisaks võrrelda neeldumis-, hajumis- ja nõrgenemisspektreid ülemises segunenud kihis ning termokliinis.

Kuna rannikuvee omadused muutuvad kiiresti nii ajas kui ruumis, siis on vajalik uurida antud alasid piisava tiheduse ja sagedusega. Regulaarne kontaktmõõtmiste teostamine on tehniliselt ja majanduslikult keerukas, sellepärast on üha aktuaalsemaks muutunud satelliitkaugseire kasutamine, mis võimaldab koguda operatiivset ja regulaarset infot suurte alade kohta (Arst 2003). Usaldusväärse informatsiooni kogumist raskendab asjaolu, et Eesti rannikumeri kuulub vee optilise klassifikatsiooni järgi teist tüüpi (*Case II*) vete ehk optiliselt keerukamate vete rühma. Samuti põhjustab suur CDOMi kontsentratsioon tugevat valguse neeldumist veepinnal. Tänu sellele ei tööta Eesti rannikumeres standardsed algoritmid, mida

---

<sup>1</sup> AC-Spectra – *Spectral Absorption and Attenuation Meter*

kosmoseagentuurid välja pakuvad (Kutser jt 2008). Seega tuleb väljatöötada kohalikesse oludesse sobivamaid algoritme. Nende arendamiseks on vajalikud mitmesugused vee optiliste omaduste *in situ* mõõtmised.

Käesoleva töö eesmärgiks oli samuti klorofüll-*a* ja neeldumiskoeffitsientide määramine optiliselt satelliitpildilt kasutades neeldumis- ja hajumiskoeffitsientide parametrizeerimist vastavalt vee tüübile. Lisaks võrrelda omavahel optiliselt satelliitpildilt kaugseire algoritmiga arvutatud klorofüll-i ja neeldumiskoeffitsientide vastavate kontaktmõõtmistega saadud väärtustega.

## 1. PIIRKONNA KIRJELDUS

Läänemeri on peaaegu suletud veekogu, kus veevahetus toimub kitsaste ning madalate Sundi ja Beldi väinade kaudu. Ühtlasi on Läänemeri maailma üks suuremaid riimveekogusid, mille vesi on segu Põhjamere soolasest veest ning jõgede ja sademete mageveest. Aastane jõgede sissevool on umbes 440 m<sup>3</sup>, mõjutades kõige rohkem mere põhja- ja idaosas, kus soolsus on kõige väiksem. Läänemere keskmine sügavus on ligikaudu 52 m, üldpindala 412 600 m<sup>2</sup> ning veehulk 21 000 m<sup>3</sup> (Helsinki Commission 2009, Schernewski jt 2002).

Antud töös on uuritud Läänemere alamvesikonda Soome lahte, täpsemalt lõunarannikut Pakri ja Lahepere lahe piirkonnas (Joonis 1). Vee segunemist uuritavas piirkonnas mõjutab nii tuule energia kui ka mere stratifikatsioon. Soome lahes on valdavad edela ja põhja-loode tuuled (NNW), väga harva puhub kagutuul (Soomere jt 2001). Suvel on Soome laht tugevalt stratifitseeritud, mil esineb temperatuuri hüppekiht termokliin<sup>2</sup> ja soolsuse hüppekiht halokliin<sup>3</sup>. Soolsusest ning temperatuurist tingitud stratifikatsioon takistab veekihtide vertikaalset segunemist ning eufootilise kihi rikastamist biogeenidega. Üldiselt on ülemise segunenud veekihi sügavus 10-20 m, milles temperatuur on vahemikus 15-20 °C. Alumise külmema kihi temperatuur võib olla vahemikus 2-4 °C. Soolsus varieerub Soome lahes nii horisontaalselt kui vertikaalselt. Soome lahe idaosas on pinnakihi soolsus vahemikus 1-3 PSU ning lääneosas kuni 6 PSU. Lahe sügavamates piirkondades asub halokliin ligikaudu 60-70 m sügavusel (Lips jt 2008). Kihistatus tingib toitainete ammendumise ülemises segunenud veekihis, mida asustab fütoplankton.

---

<sup>2</sup> Termokliin – veekiht, kus temperatuur sügavusega järsult väheneb

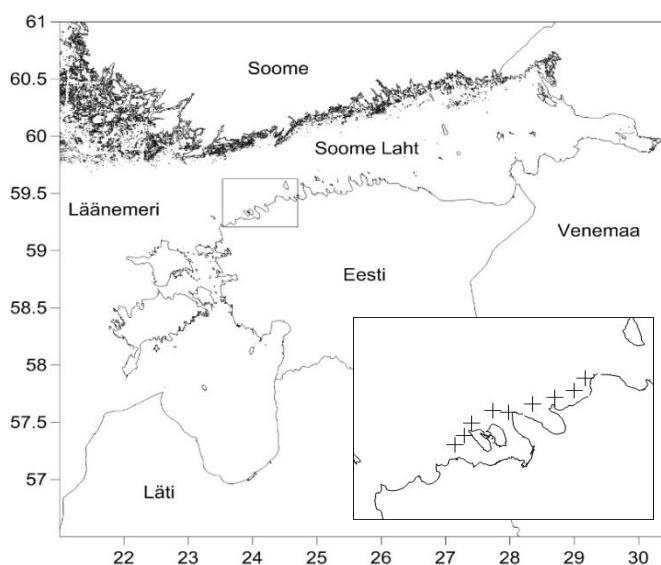
<sup>3</sup> Halokliin – veekiht, kus soolsuse gradient hüppeliselt muutub



Toitaineid tuuakse alumistest kihtidest ülemisse tuulte tekitatud vertikaalse segunemise või rannikumeres esinevate süvavee kergetega.

Kaldaga paralleelselt puhuv tuul põhjustab rannikul süvavee kerget ehk apvellingut ning pealisvee sukeldumist ehk daunvellingut. Antud protsessid sõltuvad tuule kestvusest ja tuule suunast rannajoone suhtes. Need on nähtused, mis mõjutavad temperatuuri, soolsuse, toitainete ja fütoplanktoni vertikaalset jaotust. Soome laht on tuntud sageli esinevate apvellingu sündmuste poolest (Uiboupin jt 2012). Lahe kitsuse tõttu toimub paaris mehhanism - apvellingu sündmusega ühel rannikul kaasneb daunvelling vastas rannikul (Suhhova jt 2015).

Pakri lahe lõunaosa on suhteliselt madal ning sügavused jäävad enamasti alla 10 m. Lahe pära ja Kurkse väina madalas piirkonnas tõstavad hoovused ja lainetus üles setteid, mis jäävad vette hõljuma ja muudavad merevee häguseks, seetõttu on nendes piirkondades vee läbipaistvus looduslikult väiksem. Pakri lahe põhjaosas on vesi üle 40 m sügav ning suhteliselt läbipaistev, ulatudes suvel 5-6 m ja sügis-talvel kuni 11 m (Sipelgas jt 2007). Pakri lahte liigub vesi lõuna poolt Pakri saari läbi Kurkse väina läänest itta, siis pöörduv hoovus loode-põhja suunda, liikudes piki poolsaart. Pakri poolsaare tipust möödudes liigub vesi itta (Kink jt 2000). Lahepere laht asub Pakri ja Lohusalu poolsaare vahel, selle sügavus keskosas ulatub 10-12 m, lahe suudmes 35 m.



Joonis 1 Uuringu piirkond Eesti rannikumeres.

## 2. ESMASED OPTILISED OMADUSED

Veekeskkonnas toimub valguskiirguse neeldumine ja hajumine, seda nii keskkonna enda kui ka optiliselt aktiivsete ainete poolt (*Optically Active Substances*, OAS). Peamisteks optiliselt aktiivseteks aineteks on fütoplankton (klorofüll-*a*), värviline lahustunud orgaaniline aine ehk kollane aine (CDOM - *colored dissolved organic matter*) ja heljum (TSM - *total suspended matter*). Neeldumise ja hajumise omadusi veekeskkonnas erinevatel kiirguse lainepikkustel kirjeldavad neeldumiskoeffitsient  $a$  ja hajumiskoeffitsient  $b$ , mida ühtlasi nimetatakse esmasteks optilisteks omadusteks (*Inherent Optical Properties*, IOP). Nende koeffitsientide summa moodustab nõrgenemiskoeffitsiendi  $c$ . Seega

$$c(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \quad (1)$$

Kuna optiliselt aktiivsed ained on üksteisest sõltumatud, siis kogunõrgenemiskoeffitsient  $C_{tot}$  kujuneb erinevate optiliselt aktiivsete ainete ja puhta vee nõrgenemiskoeffitsientide koosmõjul:

$$C_{tot} = C_w + C_{CDOM} + C_{chl} + C_{sm} \quad (2)$$

kus  $C_w$  on puhta vee,  $C_{CDOM}$  värvunud lahustunud orgaanilise aine,  $C_{chl}$  klorofüll-*a* ja  $C_{sm}$  heljumi nõrgenemiskoeffitsiendid. Sarnaselt valemiga 2 saab defineerida koguneeldumis- ja koguhajumiskoeffitsiendid ( $a_{tot}$ ,  $b_{tot}$ ) (Leppäranta jt 2009, Arst 2003).

Esmaste optiliste omaduste hulka kuuluvad veel hajumisindikaator  $\beta$  (*volume scattering function*), mis kirjeldab üksikasjalikumalt, millistes suundades valgus hajub, ja tagasihajumiskoeffitsient  $b_b$ , milleks on kiirgus, mis hajub veekeskkonnast tagasi ülespoole (Strömbeck 2001). Tagasihajumiskoeffitsient  $b_b$  on optilises kaugseires oluline komponent, mida illustreerib kaugseire peegeldusteguri võrrand,

millest selgub, et kaugseire peegeldustegur on võrdeline kiirguse tagasihajumiskoeffitsiendi ja neeldumiskoeffitsiendi suhtega:

$$R \approx C \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (3)$$

kus  $C$  on muutuja, mis sõltub päikese seniitnurgast,  $b_b(\lambda)$  on spektraalne tagasihajumiskoeffitsient,  $a(\lambda)$  on spektraalne neeldumiskoeffitsient ning  $\lambda$  on vastav lainepikkus (Kutser jt 2008).

Igale OAS-le on omane iseloomulik neeldumis- ja hajumisspekter. Näiteks CDOM neelab eriti tugevalt lühikesi lainepikkusi ehk valgus neeldub tugevalt lillas ja sinises spektriosas ning neeldumisintensiivsus väheneb eksponentsiaalselt pikemate lainepikkuste suunas (Levin jt 2013, Harff jt 2011).

Klorofüll-*a* omab kahte neeldumismaksimumi: spektri sinises alas 440 nm läheduses ja spektri punases osas 670 nm ümbruses. Spektri rohelises osas asub klorofüll-i neeldumismiinum (Roesler jt 2013, Harff jt 2011). Heljumi osakeste tõttu toimuv neeldumine ja hajumine sõltub osakeste suurusest, kujust ning nende optilistest omadustest. Lühikesed lainepikkused hajuvad intensiivsemalt, kui heljumi osakeste suurus on väiksem kui 1  $\mu\text{m}$ . Suuremate osakeste puhul on lainepikkuse sõltuvus nõrgem (Leppäranta jt 2009).

### 3. SATELLIITKAUGSEIRE

Kaugseire on kasulik meetod kogumaks infot vee kvaliteeti mõjutavate parameetrite kohta üle kogu veekogu (Kutser jt 2008). Veekogude optiline kaugseire toimib tänu sellele, et veest tagasihajunud kiirguse spektraalne koostis erineb pealelangeva kiirguse omast, kuna erinevad optiliselt aktiivsed ained omavad neeldumismaksimume spektri erinevates osades (Arst 2003).

Morel ja Prieur (1977) klassifitseerisid veed nende optiliste omaduste varieeruvuse suhtes kahte rühma: Tüüp I (*Case I*) ja Tüüp II (*Case II*). Esimese tüübi (*Case I*) alla kuuluvad puhtad ookeaniveed, mille optilisi omadusi mõjutavad peamiselt vesi ise ning klorofüll-*a* (Sathyendranath 2000). Antud klassi puhul toimub klorofüll-i määramine kõrge täpsusega, mille kaugseire algoritmid põhinevad empiirilistel seostel fütoplanktoni pigmendi kontsentratsiooni ja veest tuleneva kiirguse suhetel erinevatel lainepikkustel (Bukata 2005). Teise tüübi (*Case II*) puhul on tegemist optiliselt keerukamate ranniku- ja siseveekogudega, mille optilisi omadusi määravad peale fütoplanktoni ja vee enda ka veekogusse sissekantud lahustunud orgaaniline aine ja heljum. Antud klassis varieeruvad optiliselt aktiivsed ained üksteisest sõltumatult suures ulatuses, mille tõttu on sobivaid kaugseirealgoritme raskem leida (Darecki jt 2002). Läänemere puhul on samuti tegemist teist tüüpi (*Case II*) veega, mille tõttu ei saa antud piirkonnas kasutada globaalseid klorofüll-i algoritme. Näiteks Läänemere puhul kalduvad kaugseirealgoritmid klorofüll-*a* kontsentratsioone ülehindama. Samuti on rannikualadel suhteliselt kõrge tagasihajumine, mis on põhjustatud heljuvate setete suurest sisaldusest. Lisaks tuleb rannikuvete puhul arvestada kaldapiirkondade naabrusefektiga, kuna maismaa läheduse tõttu võib sensor registreerida signaali suurema peegeldusteguriga maapikslitelt (Harff jt 2011).

Läänemere jaoks on sobilik kasutada MERIS<sup>4</sup> satelliitsensorit, mis on spetsiaalselt loodud optiliselt keerukate vete tarbeks (Raag jt 2014). MERIS satelliitsensor asub Euroopa Kosmoseagentuurile kuuluva satelliidi Envisat (*Environmental Satellite*) pardal, mille missioon lõppes ametlikult 9. mail 2012. aastal (ESA 2012). MERIS sensoril on 15 spektraalkanalit, mis katavad spektraalvahemiku 390-1040 nm. Atmosfääri korrektsiooni arvutustes kasutatakse lähiinfrapunase piirkonna kanaleid ning veekogude seireks kasutatakse nähtava laineala kaheksat kanalit (Kirk 2011). Antud sensori tulemite hulka kuuluvad klorofüll (Chl), mineraalse hõljumi (TSM) ja lahustunud orgaanilise aine (CDOM) kontsentratsioonid ja neeldumiskoeffitsiendid.

---

<sup>4</sup> MERIS - *The MEdium Resolution Imaging Spectrometer*

## 4. KASUTATUD ANDMED JA MEETODID

### 4.1. Laborianalüüs

Heljumi kontsentratsioon (mg/L) ja klorofüll-*a* kontsentratsioon (mg/m<sup>3</sup>) on määratud laborianalüüsi käigus. Antud kontsentratsioonide täpsemat kirjeldust võib lugeda Helsinki Commission (1988) väljaandest. Klorofüll-*a* kontsentratsioon arvutati valemiga (Helsinki Commission 1988):

$$Chl\ a = \frac{10^3 \times e \times (665\ nm - 750\ nm)}{83 \times V \times l}$$

kus Chl *a* on klorofüll-*a* (mg/m<sup>3</sup>), *e* on etanooli hulk (ml), *V* on filtreeritud vee ruumala (l), *l* on küveti paksus (cm) ning 83 on 96%-lise etanooli neeldumiskoeffitsient.

### 4.2. AC-spektra

Vee esmaseid optilisi parameetreid (*a* ja *c*) on mõõdetud *in situ*, kasutades spektromeetrit AC-spectra (AC-S). Neeldumis (*a*)- ja nõrgenemiskoeffitsiente (*c*) on mõõdetud valgusspektri vahemikus 402-730 nm, ~4 nm spektraalse lahutusega. Mõõtmistulemustest on arvutatud vee hajumiskoeffitsient (*b*) vastavalt valemile  $b(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda)$ .

Hajumiskoeffitsientide (lainepikkusel 554 nm) ja neeldumiskoeffitsientide (lainepikkusel 443,5 nm) vertikaalsete profiilide kujutamiseks on kasutatud ODV<sup>5</sup> tarkvara. Esmalt on andmeid töödeldud ODV matemaatilise filtriga *Moving Average*, millega keskmistati mõõtmistulemused. Kõigi kolme kuupäeva puhul keskmistati iga mõõtmisjaama 20 mõõtmistulemust ning kirjutati välja 50 keskmistamisega saadud

---

<sup>5</sup> ODV - *Ocean Data View*

väärtust. Keskmistamisega saadud väärtustest koostati hajumiskoeffitsientide ja neeldumiskoeffitsientide vertikaalsed profiilid.

### 4.3. Satelliitandmed

Töös kasutatud satelliitpilt pärineb MERIS sensorilt, mida on töödeldud ja analüüsitud programmiga Beam<sup>6</sup>. Töötlemisel tarkvaraga Beam on kasutatud C2R<sup>7</sup> protsessorit, mis on loodud spetsiaalselt mitmekomponendiliste teist tüüpi vete ja rannikuvee seireks. Protsessor viib läbi atmosfäärikorrektsiooni ning seejärel muundab vee pinnalt tagasihajunud kiirguse vee kvaliteedi parameetriteks. C2R arvutused põhinevad närvivõrgustiku ehk NN<sup>8</sup> meetodil. Protsessor tuletab esmased optilised omadused (IOP) satelliitsensori poolt mõõdetud veepinnalt tagasihajunud kiirgusest (Doerffer jt 2007). Esmased optilised omadused, milledeks on fütoplanktoni neeldumiskoeffitsient, lahustunud orgaanilise aine neeldumiskoeffitsient, heljumi neeldumiskoeffitsient ning heljumi hajumiskoeffitsient, tuletatakse kaheksas erinevas spektrikanalis. Empiiriliste algoritmide rakendamise kaudu saadakse heljumi kuivkaalu kontsentratsioon (mg/L) ning klorofüll-i kontsentratsioon (mg/m<sup>3</sup>) (Arroyo Pedrero 2009).

### 4.4. Temperatuur, soolsus ja klorofüll-*a* fluorestsents

Andmed temperatuuri, soolsuse, sügavuse ning klorofüll-*a* fluorestsentsi kohta pärinevad CTD<sup>9</sup> ja fluorimeetriga varustatud sondilt (SeaBird). Kuigi CTD sondi poolt otsesteks mõõdetavateks parameetriteks on rõhk, temperatuur ja elektrijuhtivus, arvutatakse automaatselt vee elektrijuhtivuse kaudu soolsus ning rõhu väärtustest sügavus. CTD sonde kasutati koos veeproovide kogujaga, mis võimaldas veeproove erinevatelt sügavustelt hiljem laboris analüüsida.

---

<sup>6</sup> Beam - *Basic ERS & ENVISAT (A)ATSR and MERIS toolbox*

<sup>7</sup> C2R - *Case-2-Regional*

<sup>8</sup> NN - *Neural Network*

<sup>9</sup> CTD - *Conductivity, Temperature and Depth*

Vertikaalsete profiilide koostamiseks on kasutatud ODV tarkvara. Graafikute joonistamisel on interpoleerimise võrgustikuks kasutatud *Weighted Average Gridding*ut. Kuna 4. juuli mõõtmistulemused on puudulikud, siis on kasutusse võetud ainult 17. juuli ja 31. juuli vertikaalsed profiilid.

#### **4.5.Võrdlusmeetodid**

Antud töös on koostatud andmete omavaheliste seoste leidmiseks graafikud temperatuuri, soolsuse, fluorestsentsi, neeldumiskoeffitsiendi ja hajumiskoeffitsiendi vertikaalsetest jaotustest. Samuti neeldumis-, hajumis- ja nõrgenemisspektritest vee pinnakihi ning termokliini sees, mis on saadud iga mõõtmispäeva keskmise leidmisel. Vastavalt neeldumis- ja hajumiskoeffitsiendi domineerimisele lainepikkusel 443,5 nm on koostatud graafikud, milles on vaadeldavad mõõtmisjaamad, kus neeldumine või hajumine ületab 50% kogu nõrgenemisest. Antud väärtuste hajuvuse mõistmiseks on kantud graafikutele ka keskmine ning standardhälbed.

Kaugseire andmete sobivuse üle otsustamiseks on koostatud hajuvusdiagrammid, mis kujutavad seost kaugseire pildi pealt arvatud väärtuste, AC-spectra mõõdetud väärtuste ja laboriandmete vahel. Täpsuse hindamiseks on arvatud determinatsioonikordaja  $R^2$  ning lineaarne korrelatsioonikordaja  $r$ , samuti on joonisele märgitud regressiooni joon ja regressioonivõrrand.



## 5. TULEMUSED

### 5.1. Veekeskkonna olukorra kirjeldus seirepäevadel

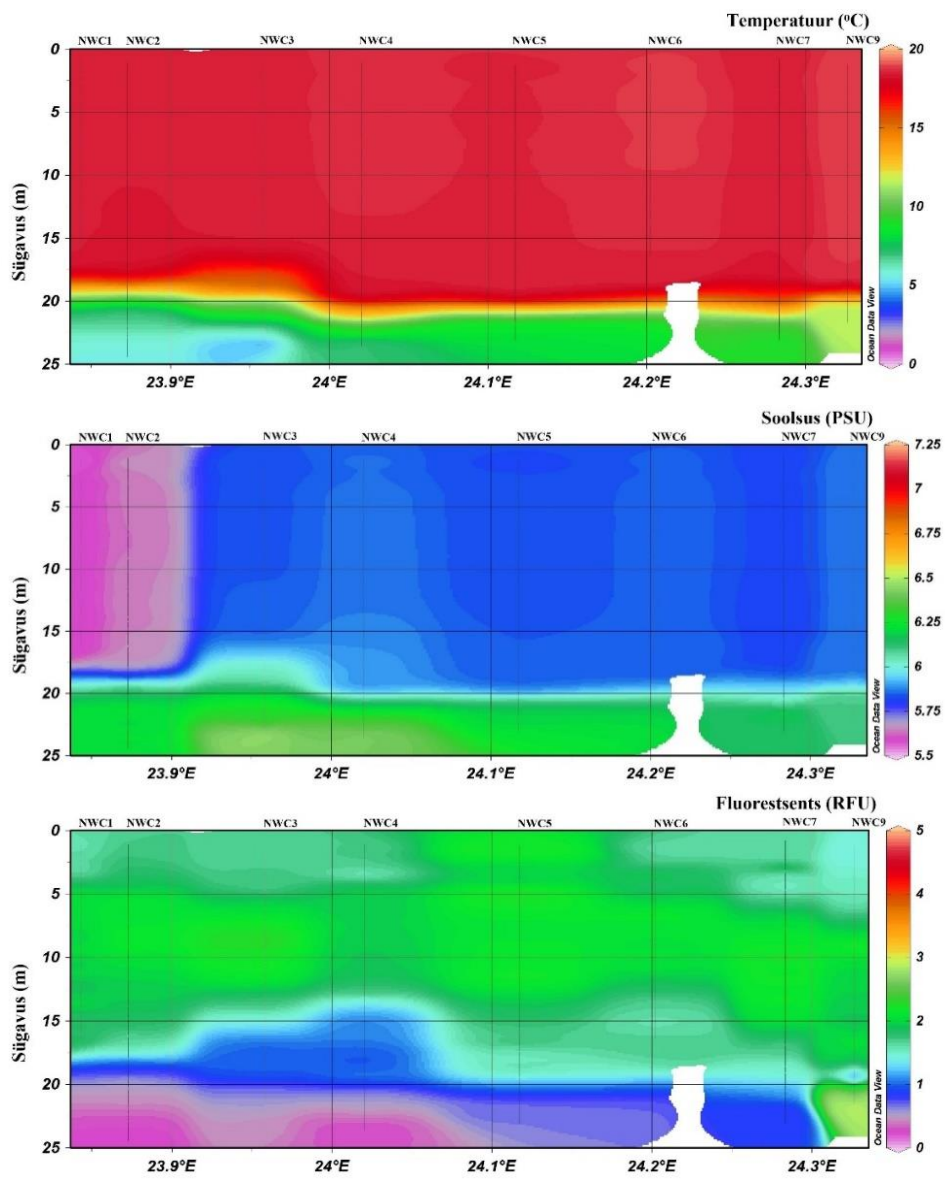
Mõõdistuste ajal oli vee pinnakihi keskmine temperatuur 18 °C. Mõlemal kuupäeval, nii 17. juuli kui 31. juuli, oli mõõtmispiirkond temperatuuri järgi vertikaalselt stratifitseerunud (Joonis 2-3). Selgesti eristuv termokliin asus 17. kuupäeval umbes 5 m sügavamal kui 31. kuupäeval. Ülemise läbisegunenud kihi sügavus oli 17. juulil ligikaudu 17,5-20 m ning 31. juulil 10-15 m. Termokliini aluse veekihi temperatuur jäi vahemikku 5-7 °C ja 3-5 °C, vastavalt kuupäevadel 17. juuli ning 31. juuli. Antud kuupäevadel olulisi ruumilisi erinevusi mõõtmispiirkonna temperatuuri horisontaalses jaotuses ei esinenud.

17. kuupäeva mõõdistuste ajal jäi soolsus vahemikku 5,8-6,0 PSU, väljaarvatud jaamades NWC1 ja NWC2, kus veidi magedam vesi soolsusega 5,6-5,7 PSU oli ülemises 17,5 m kihis. Sügavusel 23 m suurenes soolsus väärtuseni 6,5 PSU. 31. kuupäeval muutusid soolsuse väärtused pinnakihis vahemikus 5,7-6,0 PSU ning suurenesid väärtuseni 6,8 PSU ligikaudu 24 m sügavusel (Joonis 2-3).

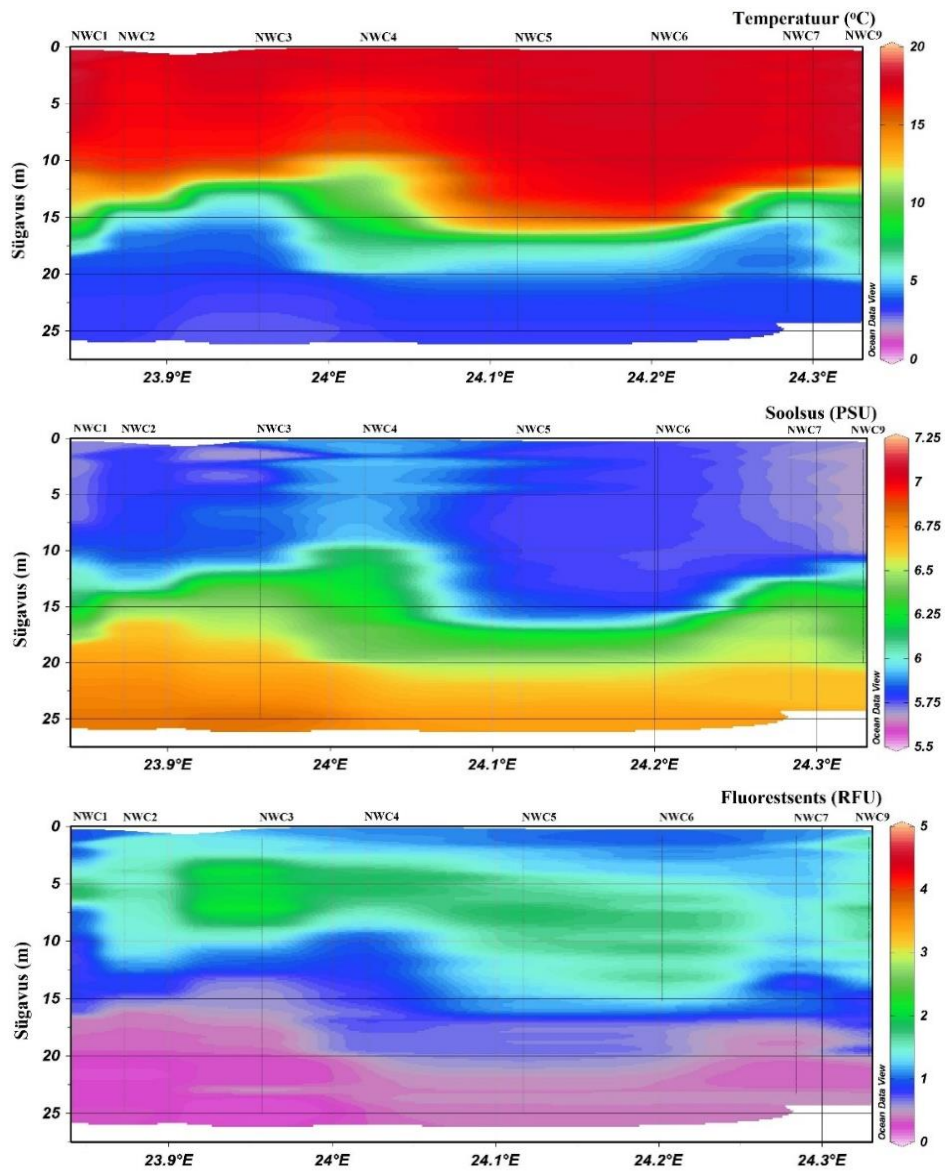
Mõõdetud klorofüll-*a* fluorestsentsi väärtuste profiilid on toodud joonistel 2 ja 3. 17. kuupäeval teostatud mõõtmiste väärtused jäid ülemises 15 m veekihis vahemikku 1,0-5,0 RFU<sup>10</sup>. Klorofüll-*a* fluorestsentsi väärtused olid kõige suuremad jaamas NWC7 ligikaudu 3 m sügavusel ning jaamas NWC9 umbes 21,5 m sügavusel (joonis 2). 31. kuupäeval oli täheldatav klorofüll-*a* fluorestsentsi väärtuste küllaltki suur horisontaalne muutlikkus ülemises 15 m veekihis. Väärtused jäid vahemikku 2,7-4,9 RFU. Sügavamal kui 20 m olid klorofüll-*a* fluorestsentsi väärtused alla 0,6 RFU (joonis 3).

---

<sup>10</sup> RFU – *Relative Fluorescence Units*



Joonis 2 17.07.2013 temperatuuri, soolsuse ja fluorestsentsi vertikaalne jaotus.



Joonis 3 31.07.2013 temperatuuri, sooluse ja fluorestsentsi vertikaalne jaotus.

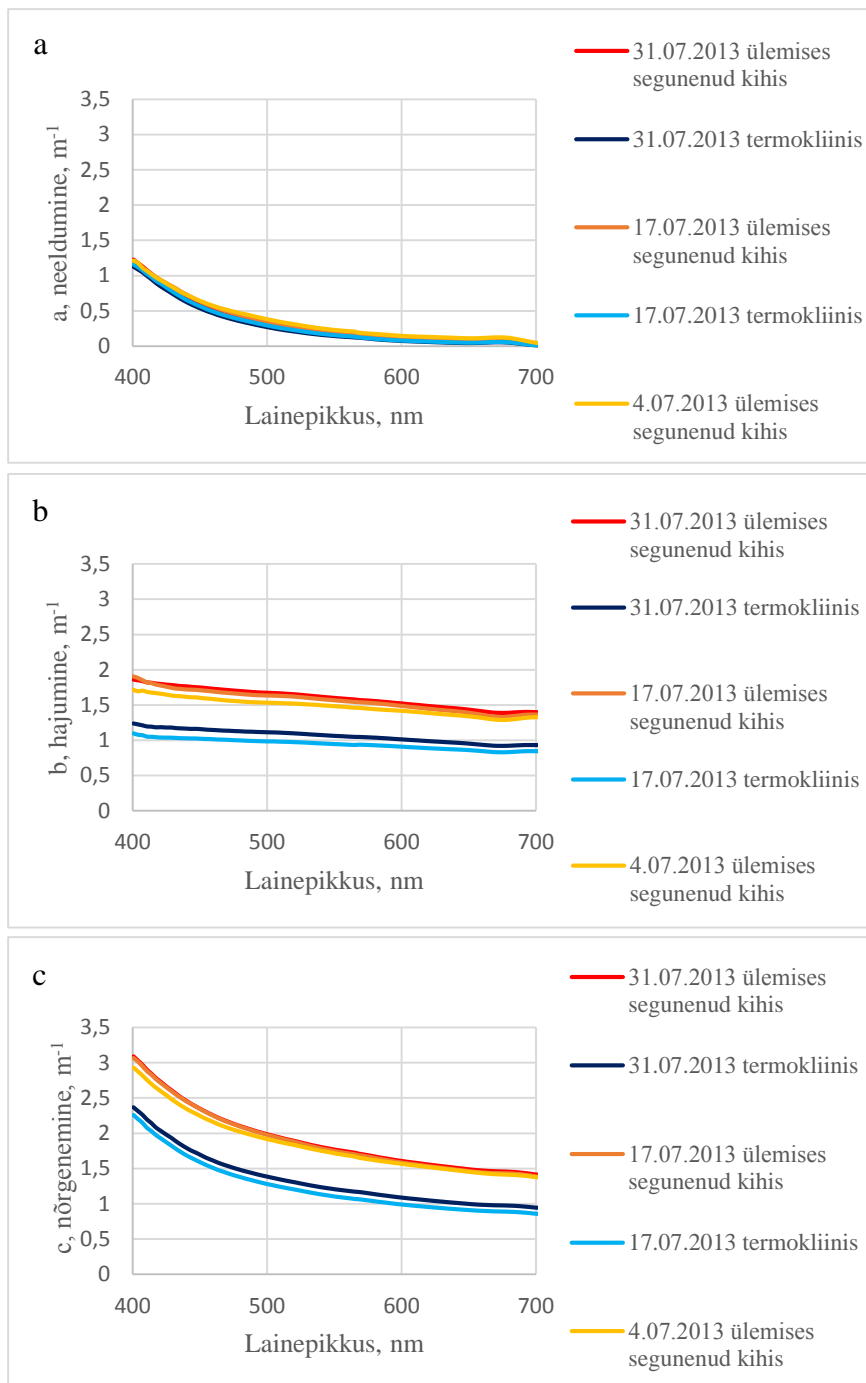
## 5.2. Vee pinnakihi ja segunenud kihi spektrid

Joonisel 4 osades a, b ja c on toodud vastavalt neeldumis-, hajumis- ja nõrgenemiskoeffitsientide spektrid kolmel mõõtmiskuupäeval. Muutused spektrite kujus ja intensiivsuses näitavad, et aset on leidnud muutused optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonides.

Joonisel 4a on toodud neeldumisspektrid vee pinnakihis ning termokliinis. Jooniselt on näha, et neeldumisspektrid Eesti rannikumere erinevates mõõtmispunktides on üsna sarnased, väärtused varieeruvad vahemikus  $1,1-1,2 \text{ m}^{-1}$  400 nm juures ja  $0,01-0,05 \text{ m}^{-1}$  700 nm lähedal. Neeldumisspektritele on iseloomulik eksponentsiaalne vähenemine lainepikkuse suurenemisega. Neeldumine on tugevam spektri sinises osas, muutudes järjest nõrgemaks suurematel lainepikkustel. Samas on täheldatav spektrite neeldumispäiged 675 nm läheduses.

Kui võrrelda hajumisspektreid antud kuupäevadel, võib näha üsna suurt varieeruvust, väärtused on vahemikus  $1,1-1,9 \text{ m}^{-1}$  ja  $0,8-1,4 \text{ m}^{-1}$ , vastavalt 400 ja 700 nm juures (joonis 4b). Ülemise veekihi hajumiskoeffitsientide väärtused on võrreldes termokliini keskelt mõõdetutega suuremad. Spektritel on õrnalt näha klorofüll-*a* neeldumispäik 660 nm juures, mis on iseloomulik fütoplanktoni hajumisspektrile.

Kõigil kolmel kuupäeval käituvad nõrgenemiskoeffitsiendi väärtused sama mustriga nagu hajumiskoeffitsiendi väärtused, näidates samuti üsna suurt variatsiooni kolme mõõtmiskuupäeva lõikes (joonis 4c). Sarnaselt hajumiskoeffitsiendi spektritele on ka nõrgenemiskoeffitsientide spektrite väärtused suuremad ülemises veekihis. Nõrgenemine muutub  $2,3-3,1 \text{ m}^{-1}$  400 nm juures ja  $0,9-1,4 \text{ m}^{-1}$  700 nm juures.



Joonis 4 Neeldumis-, hajumis- ja nõrgenemisspektrid ülemises segunenud kihis ja termokliinis.

### 5.3. Neeldumiskoeffitsiendi ja hajumiskoeffitsiendi võrdlus

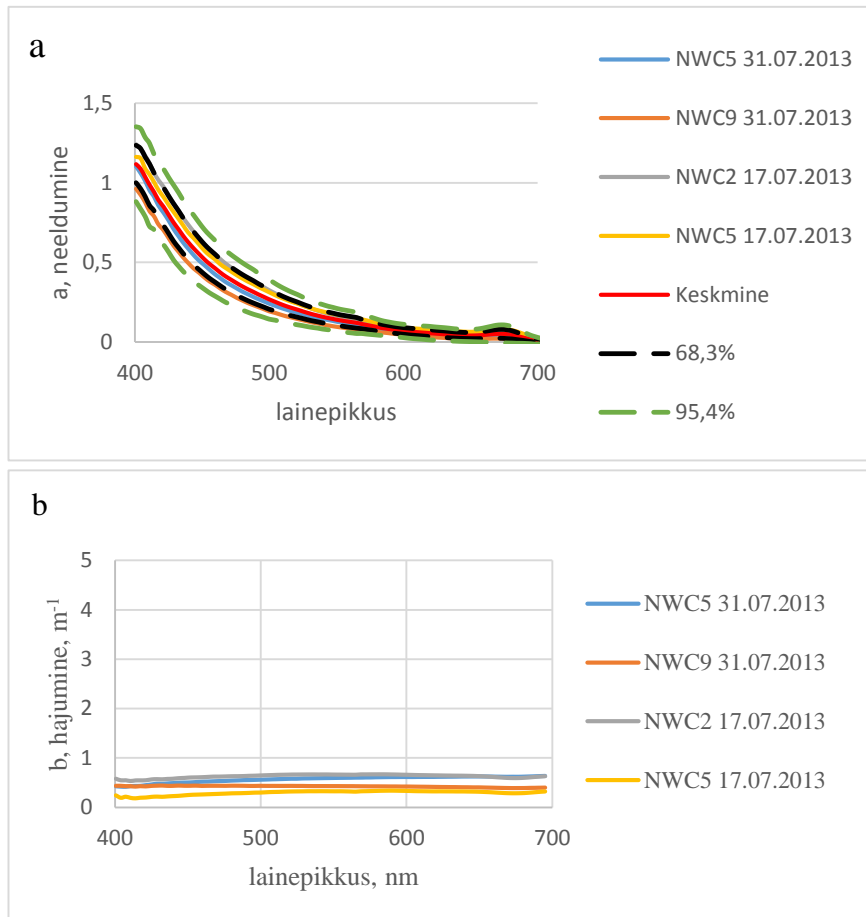
Vastavalt neeldumis- ja hajumiskoeffitsiendi domineerimisele lainepikkusel 443,5 nm (koeffitsient ületab 50% kogu nõrgenemisest), saab tulemused jagada kahte rühma. Mõõtmisjaamade lõikes domineeris peamiselt hajumine (35 mõõtejaamas). Kõigest neljal korral teostatud mõõtmistest oli neeldumine lainepikkusel 443,5 nm ülekaalus ning seda ainult termokliinis.

17. juulil domineeris neeldumine jaamades NWC5 ja NWC9 ning 31. juulil jaamades NWC2 ja NWC5. Antud jaamade neeldumiskoeffitsientide spektrid ning standardhälbed on toodud joonisel 5a. Klorofüll-*a* kontsentratsioon nendes jaamades oli vahemikus 2,86-4,65 mg/m<sup>3</sup> (10 m sügavusel) ning heljumi kontsentratsioon vahemikus 0,4-3,4 mg/L (10 m sügavusel). Neeldumiskoeffitsientide väärtused lainepikkusel 443,5 nm jäävad vahemikku 0,46-0,69 m<sup>-1</sup> (joonis 5a) ning hajumiskoeffitsientide väärtused samal lainepikkusel 0,23-0,59 m<sup>-1</sup> (joonis 5b). Standardhälve neeldumiskoeffitsiendi jaoks oli 0,10. Neeldumine oli kõige ülekaalukam 17. juulil jaamas NWC5, mil neeldumiskoeffitsient lainepikkusel 443,5 nm ületas vastavat hajumiskoeffitsienti ligikaudu 47,6%. Heljumi kontsentratsioon sellel alal oli 3,4 mg/L ning klorofüll-*a* kontsentratsioon 4,64 mg/m<sup>3</sup>.

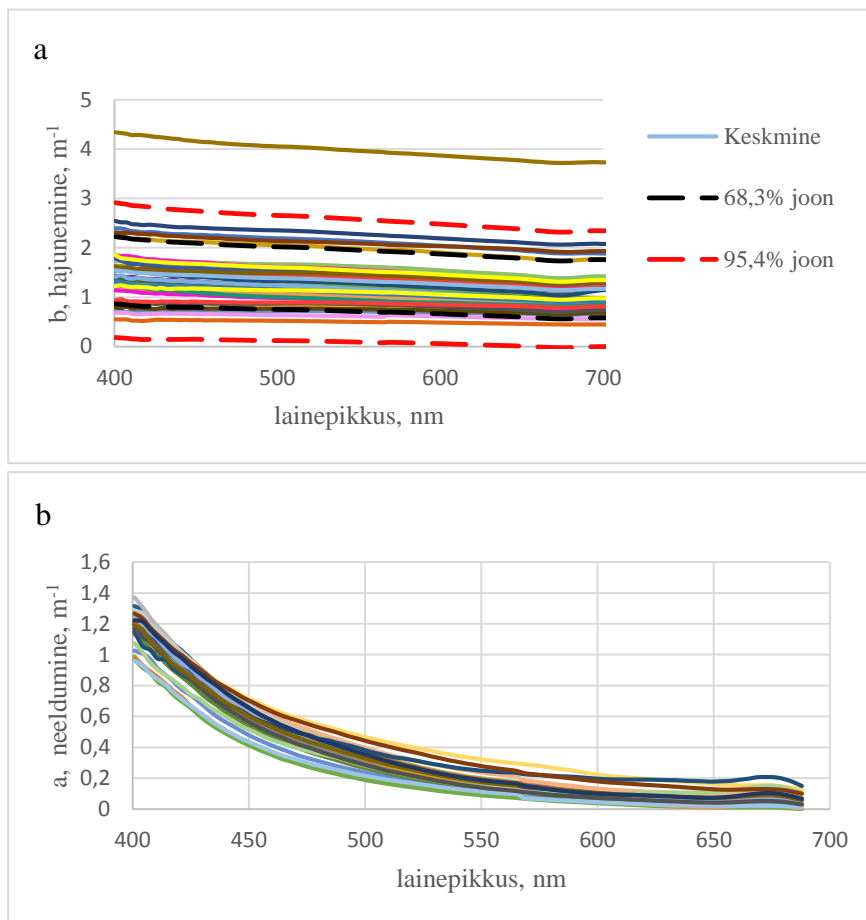
Mõõtmisjaamades, kus domineeris hajumine (joonis 6), varieerusid vastavad hajumiskoeffitsientide väärtused vahemikus 0,54-4,18 m<sup>-1</sup> (joonis 6a) ning neeldumiskoeffitsientide väärtused 0,46-0,77 m<sup>-1</sup> (joonis 6b). Standardhälve hajumiskoeffitsiendi jaoks oli 0,65. Hajumine oli kõige ülekaalukam 31. juulil jaamas NWC6, mil hajumiskoeffitsient lainepikkusel 443,5 nm ületas vastavat neeldumiskoeffitsienti 73,28%. Kahjuks puuduvad andmed antud jaama klorofüll-*a* ning heljumi kontsentratsioonide kohta.

Üle kogu vaadeldava spektripiirkonna on mõlema rühma neeldumisspektrid üksteisega sarnasemad kui hajumisspektrid. Üldiselt on kõikide spektrite puhul eristatavad neeldumis- ning hajumispiigid 675 nm ümbruses. Mõlemad hajumisspektrid on kujult lamedad, kuid jaamades, kus domineeris neeldumine, on täheldatav õrn hajumisintensiivsuse kasv laineala suurenedes, muutudes 0,24-0,58 m<sup>-1</sup> 400 nm juures ja 0,32-0,64 m<sup>-1</sup> 700 nm juures (joonis 5b). Jaamad, kus

domineeris hajumine, on nii neeldumis- kui ka hajumisspektrid suurema hajuvusega ehk standardhälbe väärtused on suuremad (joonis 6). Selle põhjuseks on ilmselt antud rühma 9 korda suurem mõõtmisjaamade arv.



Joonis 5 a - Mõõtmisjaamade neeldumisspektrid, kus neeldumine lainepikkusel 443,5 ületas hajumist (üle 50%); nende spektrite keskmine ning ühekordne ja kahekordne standardhälve (vastavalt 68,3% ja 95,4%); b - Hajumisspektrid, kus neeldumine lainepikkusel 443,5 ületas hajumist (üle 50%).



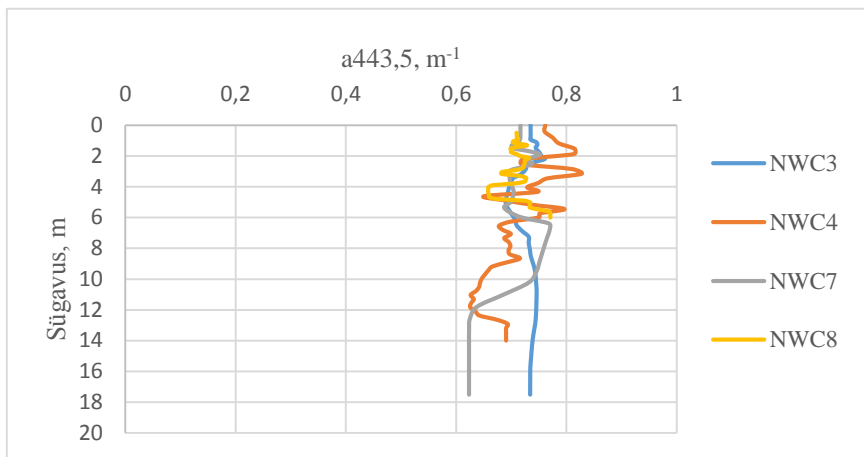
Joonis 6 a - Mõõtmisjaamade hajumisspektrid, kus hajumine lainepikkusel 443,5 ületas neeldumist (üle 50%), nende spektrite keskmine ning ühekordne ja kahekordne standardhälve (vastavalt 68,3% ja 95,4%); b – Neeldumisspektrid, kus hajumine lainepikkusel 443,5 ületas neeldumist (üle 50%).

#### 5.4. Vertikaalsed profiilid

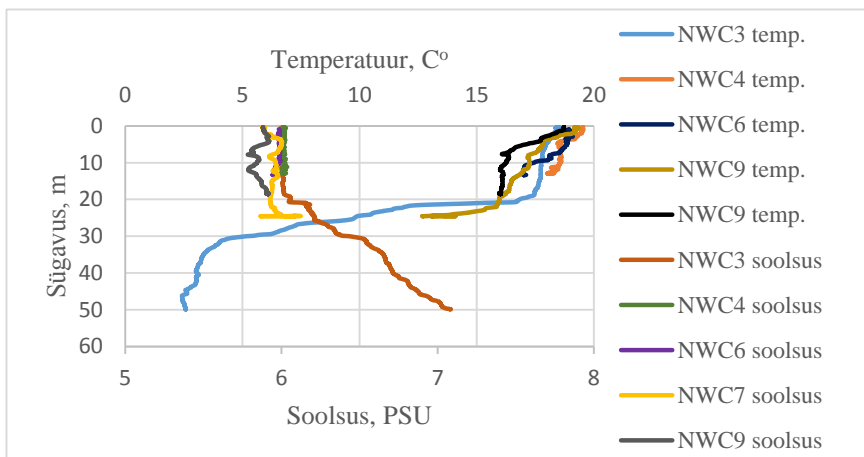
Käesolevas peatükis on omavahel võrreldud kolme mõõtepäeva keskmistatud neeldumiskoeffitsiente lainepikkusel 443,5 nm ja hajumiskoeffitsiente lainepikkusel 554,8 nm koos teiste veeparameetritega, milledeks on klorofüll-*a* fluorestsents, soolsus ja temperatuur.



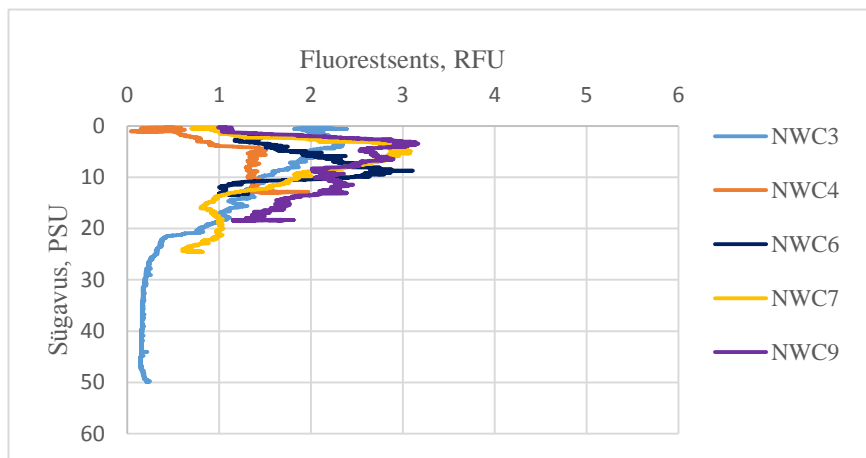
4. juuli vertikaalsest jaotusest (joonis 7) nähtub, et 5 m pinnakihis varieeruvad neeldumiskoeffitsientide väärtused üsna sarnaselt, olles vahemikus 0,66-0,83 m<sup>-1</sup>. Siiski ühist mustrit välja ei joonistu. Ainult jaama NWC7 mõõtmistulemustest on selgelt näha, et sügavuse kasvuga neeldumine väheneb. Kuna 4. juuli neeldumiskoeffitsientide profiilid ulatuvad kõigest 17 m, sama mõõtepäeva keskmine termokliin ning halokliin jäi aga 20 m sügavusele (joonis 8), seega ei saa teha järeldusi, kuidas oleks neeldumine muutunud nendes kihtides.



Joonis 7 Keskmiostatud neeldumiskoeffitsienti lainepikkusel 443,5 nm vertikaalprofiilid 04.07.2013 mõõtejaamades.

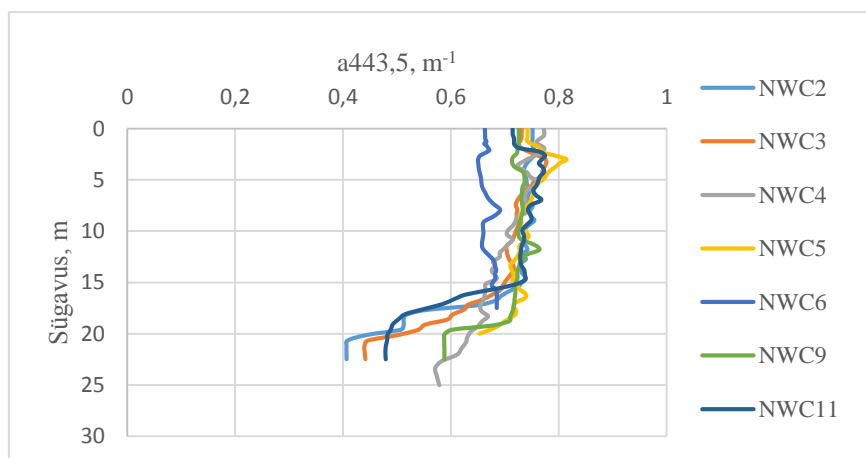


Joonis 8 Soolsuse ja temperatuuri vertikaalprofiilid 04.07.2013 mõõtejaamades.

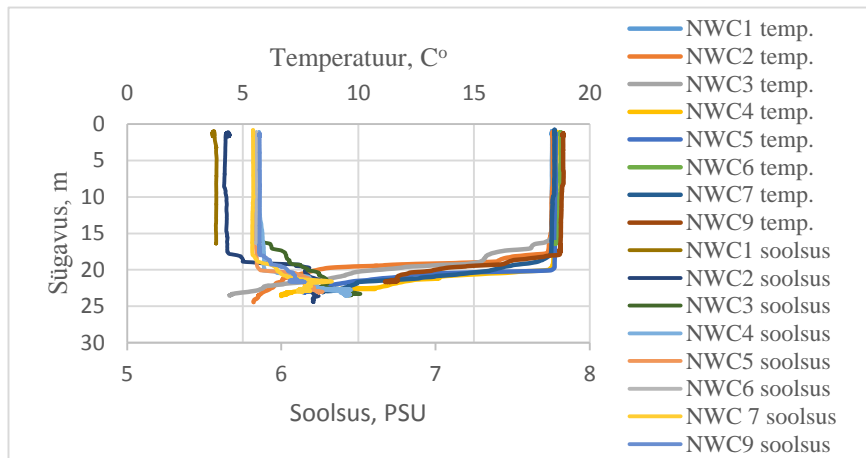


Joonis 9 Klorofüll-*a* fluorestsentsi vertikaalprofiilid 04.07.2013 mõõtejaamades.

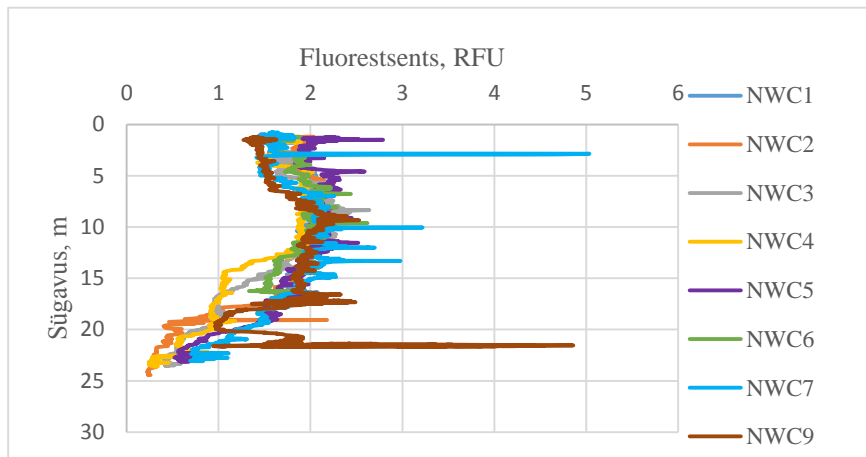
17. juuli profiilil (joonis 10) on täheldatav jaamas NWC5 neeldumise järsk suurenemine umbes 3 m sügavusel, neeldumiskoeffitsienti väärtused ulatuvad kuni  $0,81 \text{ m}^{-1}$ . Jooniselt 12 on näha, et jaamas NWC5 toimub fluorestsentsi suurenemine ligikaudu 1,5 m sügavusel, kus väärtused ulatuvad 2,79 RFU, samas 3 m sügavusel suuremaid fluorestsentsi väärtusi ei mõõdetud. Mõnevõrra erineb mõõtejaam NWC6, kus neeldumiskoeffitsiendid on kuni 12,5 m märksa väiksemad. Sama mõõtepäeva profiilidelt on selgelt näha, kuidas sügavuse kasvuga koeffitsientide väärtused vähenevad. Jaamades NWC2, NWC3, NWC9 ja NWC11 hakkavad väärtused eriti selgelt vähenema alates 15 m sügavusel. Jooniselt 11 on vaadeldav, et antud sügavuse lähedal hakkab toimuma ka temperatuuri järsk alanemine ning soolsuse suurenemine.



Joonis 10 Keskmistatud neeldumiskoeffitsienti lainepikkusel 443,5 nm vertikaalprofiilid 17.07.2013 mõõtejaamades.

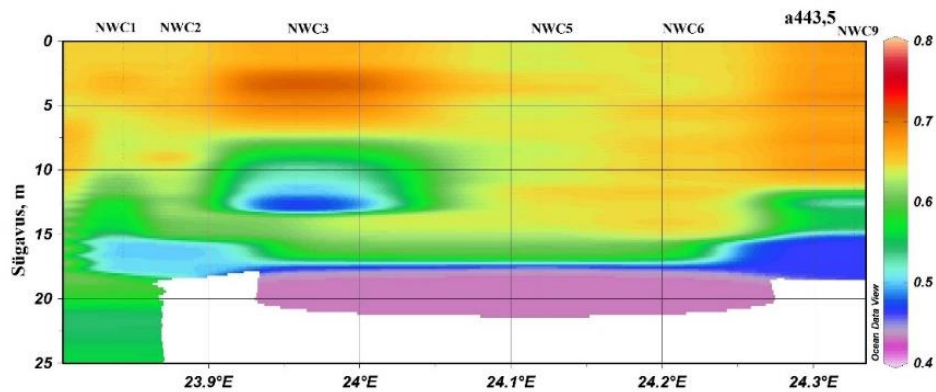


Joonis 11 Soolsuse ja temperatuuri vertikaalprofiilid 17.07.2013 mõõtejaamades.



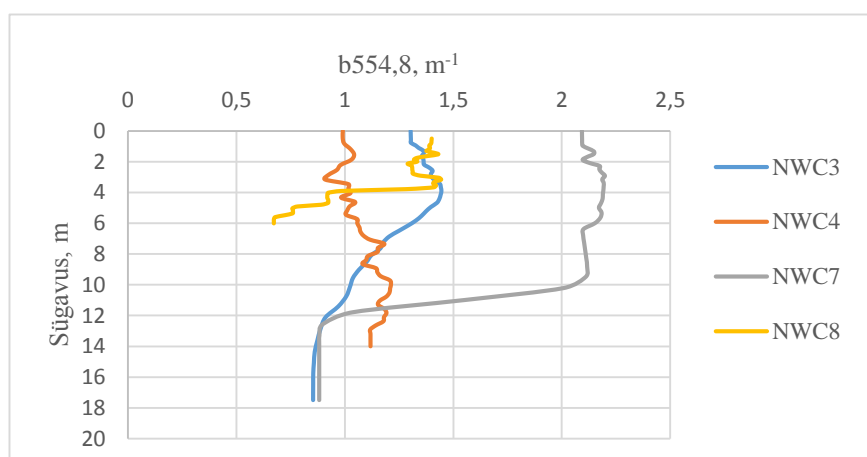
Joonis 12 Klorofüll-*a* fluorestsentsi vertikaalprofiilid 17.07.2013 mõõtejaamades.

31. juulil mõõdetud pinnakihi neeldumiskoeffitsientide väärtused olid mõnevõrra väiksemad, varieerudes  $0,63-0,71 \text{ m}^{-1}$  (joonis 13). Antud mõõtepäeval kuni umbes 7,5 m olulisi ruumilisi erinevusi mõõtmispiirkonna neeldumiskoeffitsientide väärtuste horisontaalses jaotuses ei esinenud. Selgelt erineb jaam NWC3, kus umbes 11 m sügavusel langevad neeldumise väärtused kuni  $0,46 \text{ m}^{-1}$ . Jooniselt 3 on vaadeldav, et see võib olla tingitud termokliini ja halokliini asetsemisest antud sügavuse lähedal.



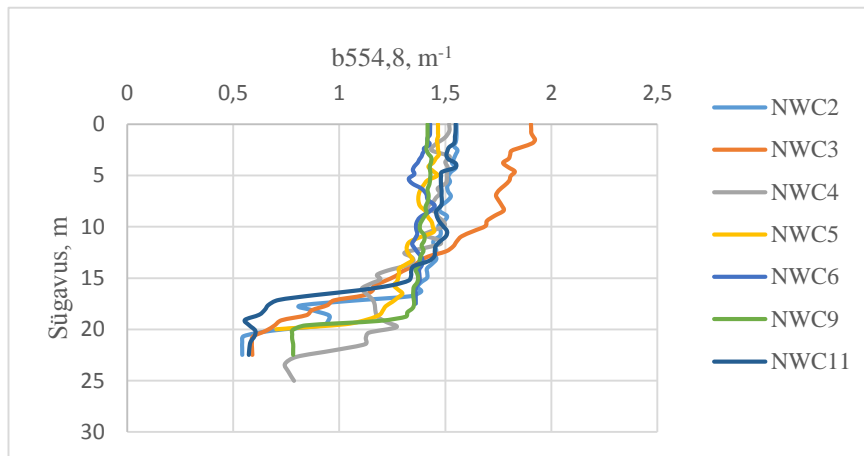
Joonis 13 Keskmistatud neeldumiskoeffitsienti lainepikkusel 443,5 nm vertikaalne jaotus 31.07.2013 mõõtejaamades.

4. juuli hajumiskoeffitsientide vertikaalsed profiilid lainepikkusel 554,8 nm (joonis 14) varieeruvad mõõtepiirkonna lõikes üsna palju, 5 m pinnakihis  $0,9-2,2 \text{ m}^{-1}$ . Kõige suuremad väärtused on jaamas NWC 7, kus hajumiskoeffitsientide väärtused jäävad 10 m pinnakihis vahemikku  $2,1-2,2 \text{ m}^{-1}$ , alates 10 m hakkavad väärtused järsult alanema olles 12,5 m sügavusel  $0,9 \text{ m}^{-1}$ . Jooniselt 9 on näha, et samas jaamas asetseb fluorestsentsi maksimum 5 m lähedal, kust alates väheneb ning muutudes stabiilsemaks 16 m sügavusel. Jaamades NWC3, NWC7 ja NWC8 toimub sügavuse kasvuga hajumise vähenemine, jaamas NWC 4 võib täheldada vastupidist tendentsi, kus sügavuse kasvuga hajumine suureneb. Jooniselt 9 on täheldatav, et samas jaamas toimub sügavuse kasvuga ka fluorestsentsi väärtuste suurenemine.



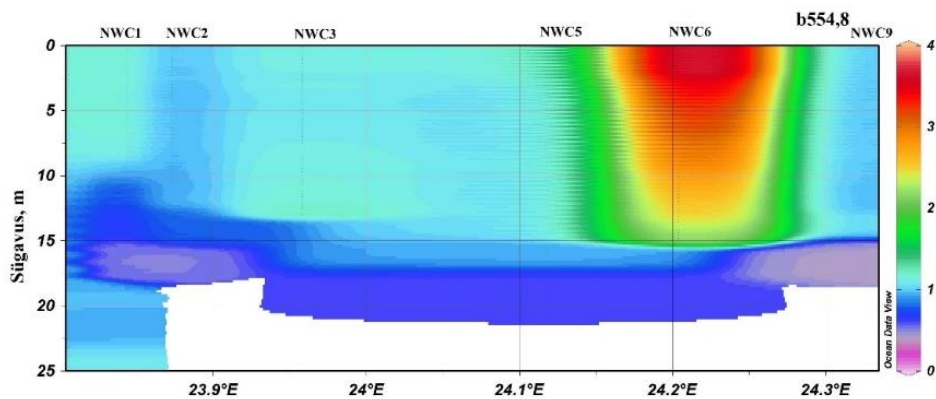
Joonis 14 Keskmistatud hajumiskoeffitsienti lainepikkusel 554,8 nm vertikaalprofiilid 04.07.2013 mõõtejaamades.

17. juuli koefitsientide pinnakihi väärtused varieeruvad eri piirkondades kõige vähem. Antud kuupäeva vertikaalselt profiililt on näha (joonis 15), et hajumine käitub sarnase mustri järgi nagu neeldumine (joonis 10) ehk väärtused hakkavad sügavuse kasvuga vähenema.



Joonis 15 Keskmistatud hajumiskoeffitsienti lainepikkusel 554,8 nm vertikaalprofiilid 17.07.2013 mõõtejaamades.

31. juulil oli hajumine kõige intensiivsem jaamas NWC6 (joonis 16), kus 5 m pinnakihi hajumiskoeffitsientide väärtused on vahemikus 3,46-3,87 m<sup>-1</sup>. Samas antud jaamas suuremaid klorofüllit, soolsuse ning temperatuuri kõikumisi ei ole täheldada (joonis 3). Hajumisgraafik langeb hästi kokku joonisega 3, hajumine väheneb ligikaudu 15 m sügavusel, kuhu lähedale jäävad ka termokliin ning halokliin.

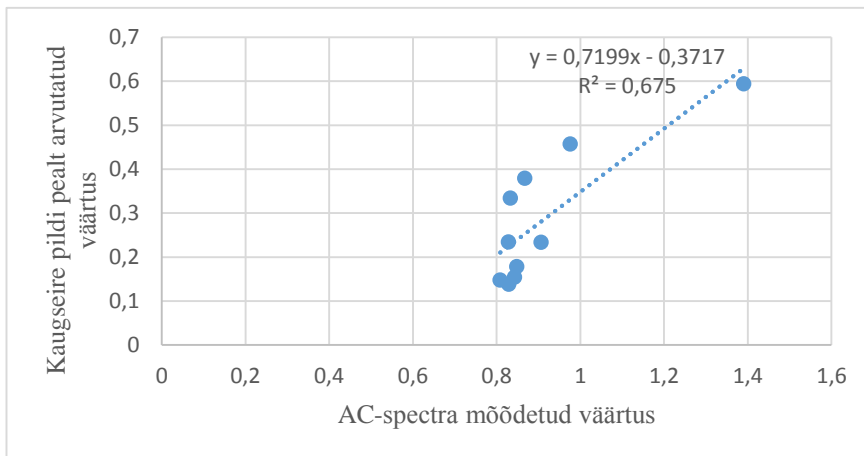


Joonis 16 Keskmistatud hajumiskoeffitsienti lainepikkusel 554,8 nm vertikaalne jaotus 31.07.2013 mõõtejaamades.

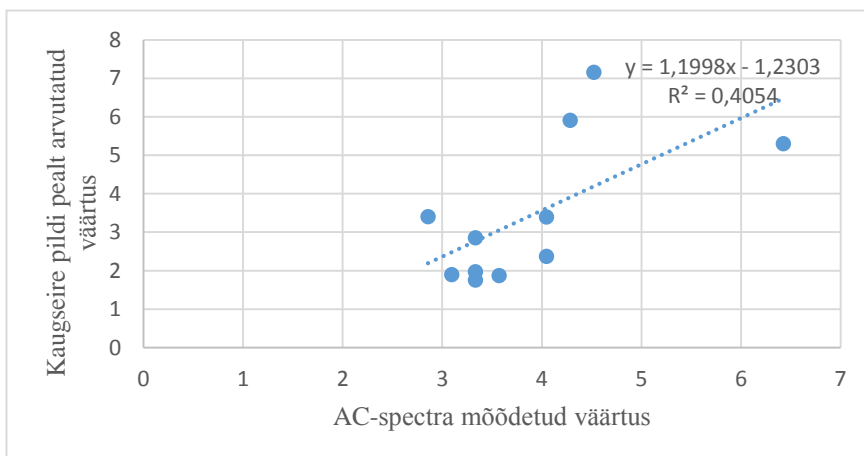
### 5.5. Satelliitkaugseire

Hindamaks kaugseire andmete sobivust esmaste optiliste parameetrite muutlikuse jälgimiseks teostati võrdlev analüüs satelliitandmete ja kontaktmõõtmiste vahel.

Joonisel 17 on toodud võrdlev graafik AC-spectra poolt mõõdetud neeldumiskoeffitsientide lainepikkusel 441,7 nm ja kaugseire pildi pealt arvatud neeldumiskoeffitsientide lainepikkusel 443 nm vahel. Regressioonisirge determinatsioonikordaja  $R^2$  kontaktmõõtmiste ja satelliidimõõtmiste vahel on 0,675, mis on üsna hea tulemus. Lineaarne korrelatsioonikordaja  $r$  antud tulemite vahel on 0,822 ehk seos on tugev. Determinatsioonikordaja  $R^2$  laboratoorselt mõõdetud klorofüll-*a* ja kaugseire pildi pealt arvatud klorofüll-*a* vahel on 0,405 ning lineaarne korrelatsioonikordaja  $r$  0,637 (joonis 18), seega seos antud andmete vahel on keskmine. Hajuvusdiagrammidelt on näha (joonised 18-19), et mõlemal juhul on lineaarne seos positiivne, kuid seos neeldumiskoeffitsientide vahel on tugevam kui klorofüll-i andmete vahel. Järeldub, et satelliitpildilt määratud esmastest optilistest omadustest klorofüll-i arvutamisel viga suureneb.



Joonis 17 Seos kaugseire pildi pealt saadud spektri a443 väärtuse ning mõõdetud spektri a441,7 väärtuse vahel.



Joonis 18 Seos kaugseire pildi pealt saadud klorofüllü väärtuse ning laboratoorselt mõõdetud väärtuse vahel.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös on seostatud Loode-Eesti rannikumeres mõõdetud vee esmased optilised parameetrid bioloogiliste ja füüsikaliste parameetritega. Kasutades spektromeetriga AC-Spectra mõõdetud väärtusi, koostati vee pinnakihi ja segunenud kihi neeldumis-, nõrgenemis- ja hajumisspektrite graafikud. Muutused spektrite kujus ja intensiivsuses näitasid, et mõõteperioodi vältel (4.07.2013, 17.07.2013 ja 31.07.2013) leidsid aset muutused optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonides. Kõige rohkem varieerusid hajumis- ning nõrgenemisspektrid, samuti käitusid antud spektrid üsna sarnase mustriga järgi, olles intensiivsemad ülemises veekihi. Neeldumisspektritele oli iseloomulik eksponentsiaalne vähenemine lainepikkuse suurenemisega, samas olid täheldatavad klorofüll-*a* neeldumispikiidid 675 nm läheduses.

Hajumiskoeffitsientide (lainepikkusel 554 nm) ja neeldumiskoeffitsientide (lainepikkusel 443,5 nm) keskmistatud mõõtmistulemustest koostati vertikaalsed profiilid, mida võrreldi temperatuuri, soolsuse ja fluorestsentsi vertikaalsete jaotustega. Töö uurimusliku osa tulemused näitasid, et üldiselt sügavuse kasvades neeldumise ja hajumise intensiivsus vähenes. Esines seos neeldumis- ja hajumiskoeffitsientide väärtuste ja termokliini ning halokliini vahel – antud kihtides toimus järsk koeffitsientide väärtuste vähenemine.

Samuti võrreldi omavahel neeldumis- ja hajumiskoeffitsientide lainepikkusel 443,5 nm, sõltuvalt sellest, mis koeffitsient ületas 50% kogu hajumisest. Põhiliselt domineeris hajumine, kõigest neljal korral teostatud mõõtmistest oli neeldumine lainepikkusel 443,5 nm ülekaalus. Mõõtmisjaamades, kus domineeris neeldumine, jäid neeldumiskoeffitsientide väärtused vastaval lainepikkusel vahemikku 0,46-0,69 m<sup>-1</sup> ning hajumiskoeffitsientide väärtused 0,23-0,59 m<sup>-1</sup>. Standardhälve



neeldumiskoeffitsient a443,5 jaoks oli  $0,10 \text{ m}^{-1}$ . Jaamades, kus oli ülekaalus hajumine, varieerusid vastavad hajumiskoeffitsientide väärtused vahemiku  $0,54\text{-}4,18 \text{ m}^{-1}$  ning neeldumiskoeffitsiendid  $0,46\text{-}0,77 \text{ m}^{-1}$ . Standardhälve hajumiskoeffitsient b443,5 jaoks oli  $0,65 \text{ m}^{-1}$ .

Lisaks võrreldi omavahel optiliselt satelliitpildilt kaugseire algoritmiga arvutatud klorofüll-i ja neeldumiskoeffitsientide vastavate kontaktmõõtmistega saadud väärtustega. Kaugseire andmete sobivuse üle otsustamiseks koostati vastavate parameetrite hajuvusdiagrammid. Determinatsioonikordaja  $R^2$  neeldumiskoeffitsientide vahel oli  $0,675$  ning klorofüll-i väärtuste võrdluses  $0,405$ . Järeldus, et kaugseirealgoritmid ülehindavad klorofüll-*a* kontsentratsioone. Seega tuleb Eesti rannikumere jaoks välja töötada korrektsemad kaugseirealgoritmid.

### **Tänuavaldused**

Autor avaldab tänu Laura Siitamile ja Rivo Uiboupinile käesoleva töö juhendamise ning väärtuslike kommentaaride eest.

Töös kasutatud mõõtmisandmete eest soovin tänada Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituuti.

## VIIDATUD ALLIKAD

Arroyo Pedrero, J. 2009. Evaluation of MERIS Case-II Water Processors in the Baltic Sea. URL (Kasutatud märts 2015)  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7013/2/LaTeX1.pdf>

Arst, H., Arst, K.I. 2003. Optical properties and remote sensing of multicomponential water bodies. Springer.

Bukata, P. R., 2005. Satellite monitoring of inland and coastal water quality: retrospection, introspection, future direction. Taylor and Francis Group, 5-60 pp.

Darecki, M., Weeks, A., Sagan, S., Kowalczyk, P., Kaczmarek, S. 2002. Optical characteristics of two contrasting Case 2 waters and their influence on remote sensing algorithms. *Continental Shelf Research*, 23, pp. 237-250.

Doerffer, R., Schiller, H. 2007. The MERIS Case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 28, pp. 517-535.

European Space Agency (ESA). 2012. URL (Kasutatud aprill 2015)  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Envisat/ESA\\_declares\\_end\\_of\\_mission\\_for\\_Envisat](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Envisat/ESA_declares_end_of_mission_for_Envisat)

Eutrophication in the Baltic Sea: An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment in the Baltic Sea region. (2009). / Helsinki Commission. Helsinki : Helsinki Commission.

Harff, J., Björck, S., Hoth, P. 2011. The Baltic Sea Basin. Springer.

Helsinki Commission, 1988. Guidelines for the Baltic Monitoring Programme for the third stage. Part D. Biological determinands. Baltic Sea Environment. Proceedings 27D, 1-161.

Keskkonnaagentuur. 2011. Rannikumere seire. URL (kasutatud märts 2015) [http://www.keskkonnaagentuur.ee/failid/Keskkonnaseire2011\\_rannikumere\\_seire.pdf](http://www.keskkonnaagentuur.ee/failid/Keskkonnaseire2011_rannikumere_seire.pdf)

Kink, H. 2000. Loodusmälestised: Harjumaa – Paldiski, Pakri poolsaar ja saared. TTÜ Geoloogia Instituut.

Kirk, J. T. O., 2011. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. University Press, Cambridge.

Kutser, T., Hiire, M., Metsamaa, L., Vahtmäe, Ele., Paavel, B., Aps, R. 2008. Field measurements of spectral backscattering coefficient of the Baltic Sea and boreal lakes. *Boreal Environment Research*, 14, pp. 305-312.

Leppäranta, M., Myrberg, K. 2009. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Springer.

Levin, I., Darecki, M., Sagan, S., Radomyslskaya, T. 2013. Relationships between inherent optical properties in the Baltic Sea for application to the underwater imaging problem. *Oceanologia*, 55, pp. 11-26.

Lips, I., Lips, U., Liblik, T. 2009. Consequences of coastal upwelling events on physical and chemical patterns in the central Gulf of Finland (Baltic Sea). *Continental Shelf Research*, 29, pp. 1836-1847.

Lips, U., Lips, I., Liblik, T., Elken, J. 2008. Estuarine transport versus vertical movement and mixing of water masses in the Gulf of Finland (Baltic Sea). In US/EU-Baltic Symposium “Ocean Observations , Ecosystem-Based Management & Forecasting” , Tallinn , 27–29 May , 2008. IEEE Conference Proceedings.

- Raag, L., Sipelgas, L., Uiboupin, R. 2014. Analysis of natural background and dredging-induced changes in TSM concentration from MERIS images near commercial harbours in the Estonian coastal sea. *International Journal of Remote Sensing*.
- Roesler, C. S., Barnard, A. H. 2013. Optical proxy for phytoplankton biomass in the absence of photophysiology: Rethinking the absorption line height. *Methods in Oceanography*, 7, pp. 79-94.
- Sathyendranath, S. 2000. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters., Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG.
- Schernewski, G., Schiewer, U. 2002. *Baltic Coastal Ecosystems*. Springer.
- Sipelgas, L., Raudsepp, U., Alari, V., Savinitš, N., Belikova, V., Kaasik, M., Ründva, M. 2007. Paldiski Lõunasadamasse 8 kai rajamise ja sellega kaasnevate süvendustööde keskkonnamõjude hindamise aruanne. TTÜ Meresüsteemide Instituut.
- Soomere, T., Keevallik, S., 2001. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 7, pp. 35-49.
- Strömbeck, N. 2001. Water Quality and Optical Properties of Swedish Lakes and Coastal Waters in Relation to Remote Sensing. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*, 633.
- Suhhova, I., Pavelson, J., Lagemaa, P. 2015. Variability of currents over the southern slope of the Gulf of Finland. *Oceanologia*, 57, pp. 132-143.
- Uiboupin, R., Laanemets, J., Sipelgas, L., Raag, L., Lips, I., Buhhalko, N. 2012. Monitoring the effect of upwelling on the chlorophyll *a* distribution in the Gulf of Finland (Baltic Sea) using remote sensing and in situ data. *Oceanologia*, 54, pp. 395-419.