

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Loodusteaduskond

Meresüsteemide instituut

**OPTILISTE PARAMEETRITE VERTIKAALNE
JAOTUS NING NENDE MÕJUTEGURID LOODE-EESTI
RANNIKUVEES**

Magistritöö

Age Arikas

Juhendaja: Liis Sipelgas, PhD

Tallinn

2017

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: Liis Sipelgas

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	5
ABSTRACT	6
SISSEJUHATUS	7
1. UURIMISPIIRKONNA KIRJELDUS	9
2. MEREVEE OPTILISED OMADUSED	11
2.1. Esmased optilised parameetrid	11
2.2. Tuletatud optilised parameetrid	13
2.3. Satelliitkaugseire	15
2.4. Veetüüpide klassifikatsioon optiliste parameetrite põhjal	16
3. KASUTATUD ANDMED JA MEETOD	18
3.1. Laborianalüüs	19
3.2. Esmased optilised parameetrid	20
3.3. Füüsilised parameetrid	20
3.4. Tuletatud optilised parameetrid	20
3.5. Satelliitandmed	21
4. TULEMUSED	22
4.1. Temperatuuri ja soolsuse horisontaalne jaotus seirepäevadel	22
4.2. Temperatuuri ja soolsuse vertikaalne jaotus seirepäevadel	25

4.3. Termohaliinse struktuuri seos esmaste optiliste parameetrite vertikaalse jaotusega.....	28
4.4. Tuletatud optilised parameetrid ja nende vertikaalne jaotus	33
4.5. Veetüüpide klassifikatsioon optiliste parameetrite põhjal.....	40
5. ARUTELU.....	43
KOKKUVÕTE.....	47
KASUTATUD KIRJANDUS	49
LISAD	54
Lisa 1. Jerlov'i veetüüpide nõrgenemissügavused $Z_k(\lambda)$	54
Lisa 2. Vee pinnakihi temperatuuri ja soolsuse jaotused	55
Lisa 3. Klassifitseeritud veetüüpide nõrgenemissügavused $Z_k(\lambda)$	56
SUMMARY	57

LÜHIKOKKUVÕTE

Käesoleva töö raames on uuritud Loode-Eesti rannikumere optilisi parameetreid. Analüüs on teostatud esmaste optiliste parameetrite (IOP) mõõtmiste, veeproovide analüüsi (klorofüll *a* ja heljum) ning temperatuuri ja soolsuse profiilide põhjal. Töö tulemusena selgus, et veesamba kihistatus reguleerib läbi optiliselt aktiivsete ainete (OAA) jaotuse optiliste parameetrite vertikaalset muutlikkust. Tuletatud optiliste parameetrite (AOP) arvutused näitavad, et intensiivse apvellingu korral võib süvavee pinnalekerke tõttu mõõdetav kaugseire signaal $R(\text{PAR})$ vähendada keskmiselt 72.6–89.3%. Antud asjaolu tuleks arvestada kaugseire algoritmide arendamisel optiliselt keerukamate veekogude seire tarbeks. Jerlov'i klassifikatsioonil põhinev veetüüpide klassifitseerimine aitab määrata uuritavale veemassile omased optiliste parameetrite varieeruvuse piirid, millest viimane peaks võimaldama leida sobivaimat algoritmi OAA-de arvutamiseks.

Võtmesõnad: optika, *in situ*, esmased optilised omadused, tuletatud optilised omadused, veetüüpide klassifikatsioon, kaugseire, rannikumeri

ABSTRACT

Vertical variability of optical properties and their impact factors in the coastal waters of northwestern Estonia

On the basis of inherent optical properties (IOPs) measurements, laboratory analyses of water samples (chlorophyll-*a* and total suspended matter) and vertical profiles of temperature and salinity, the optical properties in the coastal waters of northwestern Estonia have been investigated. The results of this thesis show that the stratification of the water column regulates the variability of the optical parameters through distribution of the optically active substances (OAS). Calculation of apparent optical properties (AOPs) from measured IOPs show that in the upwelling region the signal measured by the remote sensor may decrease in average of 72.6–89.3% as a result of deep water uptake. Results obtained from the research should be considered when developing remote sensing algorithms for optically complex water bodies. The variability limits of the optical characteristics for the examined water masses were determined based on the Jerlov's classification. These results allow to find the most appropriate algorithm for the calculation of the OAS.

Key words: optica, *in situ*, inherent optical properties, apparent optical properties, water classification, remote sensing, coastal sea

SISSEJUHATUS

Veekogude optilise kvaliteedi pidev seire aitab paremini mõista erinevaid looduslikke ja inimtegevusest põhjustatud protsesse (Dickey jt 2006). Vee optiline kvaliteet võib sõltuda mitmetest erinevatest parameetritest. Tähtsamateks on fütoplanktoni, lahustunud orgaanilise aine ning heljumi hulk veesambas, mis omakorda sõltuvad vabade toitainete kogusest, temperatuurist ja aastaajast (Herlevi 2002). Mida suurem optiliselt aktiivsete ainete sisaldus, seda kesisemad on veekogu valgustustingimused (Arst 2003). Valguse kättesaadavus on tähtis fotosünteesivatele organismidele, olles kriitiliseks elupaika limiteerivaks teguriks ning seeläbi mängib rolli bioloogilise mitmekesisuse säilimisel (Bowers jt 2000; Painting jt 2007). Veekvaliteedi halvenemine vetikate massvohamise või heljumi kontsentratsiooni tõusu tõttu võib olla signaaliks inimtegevusest põhjustatud loodusliku seisundi rikkumisega. Erinevad riiklikud ja rahvusvahelised seireprogrammid (näiteks Euroopa Liidu veepoliitika raamdirektiiv ja Euroopa Liidu merestrateegia raamdirektiiv) põhinevad peamiselt punktmõõtmistel, mis on kallid ja töömahukad ega kajasta veekogu seisundit tervikuna. Lisaks on piiriveekogude monitooring tihtipeale raskendatud. Satelliituuringud võimaldavad veekogusid jälgida nii ajaliselt kui ka ruumiliselt oluliselt tihedamalt. Antud meetodi kasutamist raskendab asjaolu, et vee optilised omadused on geograafilises kontekstis väga varieeruvad (Babin jt 2003). Näiteks Läänemeri on võrreldes ookeanivetega optiliselt palju keerukam, tänu millele kosmoseagentuuride poolt pakutavad standardalgoritmid ei võimalda piisavalt täpset kvantitatiivset seiret. Saamaks paremaid tulemusi, oleks vaja luua piirkonnaspetsiifilised algoritmid, mis arvestaks vastavalt veetüübile optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonide varieeruvust (Kutser jt 2008).

Edendamaks Läänemere oludesse sobivamate algoritmide väljatöötamist on käesolevas töös uuritud:

- 1) esmaste ja tuletatud optiliste parameetrite vertikaalseid jaotusi ja nende seoseid optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonidega;
- 2) esmaste ja tuletatud optiliste parameetrite muutlikkust seoses veesamba termohaliinse struktuuriga;
- 3) difuusse nõrgenemiskoeffitsiendi $K_d(\lambda)$ spektraalsete väärtuste alusel uuritava rannikuvee klassifitseerimine Jerlov'i veetüüpide klassi.

1. UURIMISPIIRKONNA KIRJELDUS

Läänemeri on peaaegu suletud veekogu, kus veevahetus Põhjamerega toimub kitsaste ning madalate Taani väinade kaudu. Takistatud veevahetuse tõttu on vee viibeag umbes 24 aastat, mis muudab ta keskkonnaprobleemidele tundlikumaks (Elken 2006; Leppäranta jt 2009). Ühtlasi on meri üsna madal, keskmine sügavus on vaid 54 m ning maksimaalne 459 m (Landsorti süvik). Läänemere üldpindala on 392 978 m² ning ruumala 21 205 m³ (ei hõlma Kattegati). Läänemere suubuvaid jõgesid iseloomustavad kõrged toitainete ja orgaanilise aine kontsentratsioonid. Aastane jõgede sissevool on ligikaudu 440 m³, mõjutades rohkem mere põhja- ja idaosa (Leppäranta jt 2009). Vee kvaliteedi poolest on Läänemeri üks saastatumaid (Lundberg 2014), seejuures vesi on sajandi jooksul muutunud hägusemaks. Läänemere alambasseinidest on kõige drastilisemad muutused aset leidnud mere põhjaosas ja Soome lahes (Fleming-Lehtinen jt 2010).

Uuritavaks alaks on Läänemere kirdeosas asuv Soome laht (Joonis 3), mille veevahetus Läänemerega toimub vabalt ilma künnisteta ja kitsendusteta. Laht muutub idasuunas liikudes madalamaks, keskmiseks sügavuseks on 37 m ning maksimaalne sügavus 123 m (Paldiski sügavik). Rannikupiirkondades on vesi üsna madal, kus tugevam tuul tingib setete resuspensiooni tõttu vee suurema hägususe. Suurim toitaineterikka magevee sissevool tuleb Neeva jõest, lahe idapoolses osas, mis segunedes mereveega liigub üldiselt piki Soome rannikut avamere suunas. Läänemere avaosa soolased veemassid sisenevad Soome lahte eelistatult piki Eesti rannikut (Leppäranta jt 2009).

Vee segunemist uuritavas piirkonnas mõjutab nii tuule energia kui ka temperatuuri ja soolsuse gradientidest tulenevad tiheduse erinevused. Soome lahe vertikaalses termohaliinses struktuuris võib esineda kuni kolm kihti. Lahe sügavamates

piirkondades (>70 m) esineb suvel kolmekihiline ja talvel kahekihiline struktuur. Antud kihte eraldab 10-30 m sügavusel asuv sesoonne termokliin (kiht, kus temperatuur hüppeliselt muutub), mis üldiselt langeb kokku sesoonse halokliiniga (kiht, kust soolsus hüppeliselt muutub) ning 50-80 m sügavusel püsiv halokliin (Alenius jt 2008; Liblik & Lips 2011). Intensiivset vertikaalset segunemist põhjustavad kaldaga paralleelselt puhuvad tuuled, mis põhjustavad rannikul süvavee kerget ehk apvellingut ning pealisvee sukeldumist ehk daunvellingut. Soome lahes esineb maist septembrini keskmiselt 6 apvellingu sündmust, kusjuures intensiivseimaks apvellingu esinemise piirkonnaks on Soome rannikumeri Soome lahe lääneosas (Myrberg jt 2003; Uiboupin & Laanemets 2009). Lahe kitsusest on tingitud paaris mehhanism - apvellingu sündmusega ühel rannikul kaasneb daunvelling vastas rannikul (Laanemets jt 2005, Lips jt 2009). Vee liikumine ja stratifikatsioon mõjutab eelkõige setete ja lahustunud ainete transporti ja jaotumist merekeskkonnas ning seeläbi avaldades mõju vee optilistele omadustele (Kratzer & Tett 2009; Berthon & Zibordi 2010).

2. MEREVEE OPTILISED OMADUSED

2.1. Esmased optilised parameetrid

Valguskiire neeldumist ja hajumist erinevatel lainepikkustel iseloomustatakse neeldumiskoeffitsiendi $a(\lambda)$ ja hajumiskoeffitsiendi $b(\lambda)$ abil, mida ühtlasi nimetatakse esmasteks optilisteks parameetriteks (*Inherent Optical Properties*, IOP). Nende koeffitsientide summa moodustab nõrgenemiskoeffitsiendi $c(\lambda)$. Seega

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

Vees toimuv valguskiire neeldumine ja hajumine on põhjustatud nii puhta vee enda kui ka optiliselt aktiivsete ainete poolt (OAA), milledeks on fütoplankton, värvunud lahustunud orgaaniline aine ehk kollane aine (*Colored Dissolved Organic Matter*, CDOM) ja heljum (*Total Suspended Matter*, TSM). Seega saab nõrgenemiskoeffitsiendi omakorda jagada komponentideks:

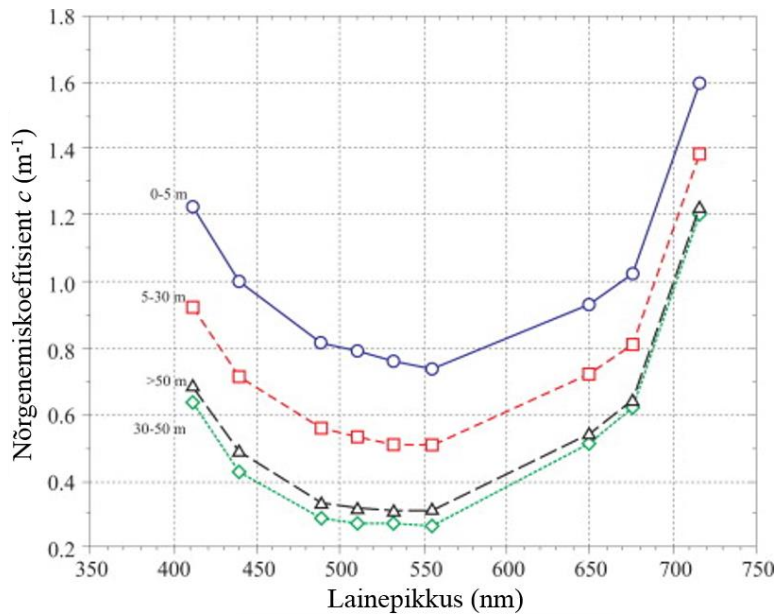
$$c(\lambda) = c_w(\lambda) + c_{CDOM}(\lambda) + c_{ph}(\lambda) + c_{TSM}(\lambda) , \quad (2)$$

kus c_w on puhta vee, c_{CDOM} värvunud lahustunud orgaanilise aine, c_{ph} fütoplanktoni ja c_{TSM} heljumi nõrgenemiskoeffitsiendid. Sarnane seos kehtib neeldumiskoeffitsiendi ja hajumiskoeffitsiendi kohta (Arst 2003; Leppäranta jt 2009).

Nimetatud komponentidel on neile iseloomulikud spektraalkõverate kujud, mis sõltuvad vastavate ainete neeldumis- ja hajutamismomadustest erinevatel lainepikkustel. Puhas vesi neelab valgust peamiselt pikematel lainepikkustel, punases ja infrapunases spektripiirkonnas (Smith & Baker 1981; Pope & Fry 1997). CDOM neelab eriti tugevalt lühemaid lainepikkusi, täpsemalt sinises ja ultravioletses osas, seejuures neeldumisintensiivsus väheneb eksponentsiaalselt pikemate lainepikkuste suunas (Harff jt 2011; Levin jt 2013). Fütoplankton avaldab mõju temas sisalduvate spetsiifiliste pigmentide või nende kombinatsioonide tõttu, mis omavad erinevaid

neeldumismaksimumi asukohti. Klorofüll *a* omab kahte neeldumismaksimumi 440 nm ja 675 nm ümbruses. Pigment *b* neeldumismaksimumid asuvad 460 nm ja 640 nm juures (Harff jt 2011; Roesler & Barnard 2013). Klorofüll *c* ja fükotsüaniin neelavad valgust 620-630 nm piirkonnas (Bryant 1981). Heljum mõjutab peamiselt vee hajutavaid omadusi. 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 µm. Suuremate osakeste puhul on lainepikkuse sõltuvus nõrgem (Leppäranta jt 2009).

Peamine valgust nõrgendav komponent ranniku- ja siseveekogudes võib varieeruda CDOMst (Kostoglidis jt 2005), fütoplanktoni (Dubinsky & Berman 1979) ja heljumini (Mills jt 2002). Läänemerd iseloomustavad suhteliselt suured anorgaanilise ja orgaanilise heljumi ning CDOMi kontsentratsioonid, millest viimane on peamiseks esmaste optiliste parameetrite spektraalseid omadusi mõjutavaks teguriks (Kowalczyk jt 2010). Nimetatud optiliselt aktiivsete ainete mõju peegeldub hästi ka Läänemere nõrgenemiskoeffitsiendi $c(\lambda)$ spektrites (Joonis 1). Kõrgemad $c(\lambda)$ väärtused lainepikkuste 400–500 nm vahemikus on tingitud CDOMi poolt põhjustatud valguse neeldumisest antud spektripiirkonnas. Klorofüllide neeldumismaksimumid on lühematel lainepikkustel varjutatud CDOMi ja pikematel lainepikkustel vee molekulide poolt põhjustatud neeldumise tõttu (Sagan 2008). Sellest tingituna suudab valgus lainepikkustel 520-550 nm tungida Läänemeres kõige sügavamale, antud spektraalvahemik vastab piirkonnale, kus ka inimese silm on valgusele kõige tundlikum (Levin jt 2013).



Joonis 1 Läänemere veele omased valguse nõrgenemisspektrid erinevates sügavusvahemikes; sisaldavad puhtast veest tingitud valguse neeldumist (Sagan 2008).

Esmaste optiliste parameetrite hulka kuuluvad veel edasihajumiskoeffitsient $b_f(\lambda)$, mis kirjeldab valguse hajumist kiirguse levimise suunas, ja tagasihajumiskoeffitsient $b_b(\lambda)$, mis iseloomustab valguse hajumist kiirguse levimisele vastassuunas ehk teisisõnu hajub tagasi ülespoole (Strömbeck 2001). Tagasihajumiskoeffitsient b_b on optilises kaugseires oluline komponent, sest sellest sõltub kiirgusvoog, mida kaugseire sensor mõõdab. Tagasihajumise tõenäosus $B(\lambda)$ kujutab endast tagasihajumiskoeffitsiendi ja hajumiskoeffitsiendi suhet b_b/b , mis näitab kui suur osa kogu hajumiskoeffitsiendist moodustab tagasihajumiskoeffitsient (Roesler & Boss 2003).

2.2. Tuletatud optilised parameetrid

Tuletatud optilised parameetrid (*Apparent Optical Properties*, AOP) sõltuvad lisaks vee optilistele omadustele ka valgustustingimustest veepinna kohal, s.o. pinnale langeva kiirguse nurkjaotusest (Dera 1992). Secchi ketas on üks vanemaid ja põhilisemaid mõõtevahendeid vee läbipaistvuse hindamiseks. Mõõtmistulemuseks on

siin sügavus, millest alates vettelastud valge ketta kontuure enam visuaalselt näha ei ole. Kuna Secchi ketta näit sõltub lisaks pealelangevale kiirgusele ka vaatlejast, siis saadav tulemus on subjektiivne (Preisendorfer 1986). Täpsema tulemuse saamiseks kasutatakse mõõteriistu, mis võimaldavad mõõta kiirguse levimist vees (Kratzer jt 2003).

Üks kasutatavam karakteristik on valguse difuusne nõrgenemiskoeffitsient $K_d(\lambda)$, mis põhineb seosel, et valgus nõrgeneb vees sügavuse kasvades eksponentsiaalselt (Dera 1992). Teadmised antud parameetri ruumilise, spektraalse, vertikaalse ja ajalise muutlikkuse kohta annavad teavet valguse kättesaadavuse kohta, mis on oluline eelkõige fotosünteesivate organismide jaoks (Lee jt 2005; Arthi & Shanmugam 2016) ning ühtlasi on abiks vee läbipaistvuse ja kvaliteeti määramisel (Gallegos 2001). Kirk (1994) alusel sõltub $K_d(\lambda)$ vee neeldumis- ($a(\lambda)$) ja hajumiskoeffitsiendist ($b(\lambda)$):

$$K_d = \mu_0^{-1}[a^2 + (g_1 \times \mu_0 - g_2)a \times b]^{0.5}, \quad (3)$$

kus μ_0 on valguskiire levimisingurga koosinus vahetult veepinna all ning g_1 ja g_2 iseloomustavad valguse levimist vees.

Üldiselt leitakse $K_d(\lambda)$ väärtused kogu fotosünteesiliselt aktiivse piirkonna jaoks $K_d(PAR)$, kaugseires on levinumaks nõrgenemiskoeffitsient lainepikkusel 490 nm ($K_d(490)$), mis peaks olema heas korrelatsioonis Secchi sügavusega (Kratzer & Tett 2009; Kratzer 2003).

$K_d(\lambda)$ omab mitmeid rakendusi veekogude ökoloogilise seisundi määramiseks. Teadaolevade $K_d(\lambda)$ väärtuste põhjal saab leida eufotilise kihi sügavuse $z_{1\%}$ ehk teisisõnu sügavuse, kus on säilinud veel 1% veepinnale langevast kiirgusest (Kirk 1994):

$$z_{1\%} = \frac{\ln 100}{K_d} = \frac{4.6}{K_d}. \quad (4)$$

Teiseks oluliseks tuletatud optiliseks parameetriks on valguse difuusne peegeldumiskoeffitsient $R(\lambda)$. Antud parameeter väljendab veest lahkuva kiirguse signaali, seega olles kaugseire rakenduse seisukohalt eriti oluline. Täpsemalt näitab $R(\lambda)$ alt üles ja ülalt alla suunatud kiiritustiheduste suhet:

$$R(\lambda) = \frac{E_u(\lambda)}{E_d(\lambda)}, \quad (5)$$

kus $E_u(\lambda)$ on alt üles suunatud kiiritustihedus ja $E_d(\lambda)$ ülalt alla suunatud kiiritustihedus (IOCCG 2000).

Gordon et al. (1975) leidsid mudelarvutuste põhjal, et vee difuusse peegeldumiskoeffitsiendi spekter on kirjeldatav spektraalse tagasihajumiskoeffitsiendi $b_b(\lambda)$ ja neeldumiskoeffitsiendi $a(\lambda)$ suhte kaudu:

$$R(\lambda) = C(\mu_0) \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (6)$$

kus C on muutuja, mis sõltub päikese seniitnurgast. Seega mõistmaks kaugseiresignaali tekkimise iseärasusi on oluline teada nii neeldumis- $a(\lambda)$ kui ka tagasihajumiskoeffitsientide $b_b(\lambda)$ varieerumisulatust. Kirk (1984) leidis, et C on lineaarses sõltuvuses murdunud valguskiire levimisnurga koosinusest μ_0 :

$$C(\mu_0) = 0.975 - 0.629\mu_0. \quad (7)$$

Valemitest (6) ja (7) nähtub, et päikese kõrguse suurenemisega peegeldumiskoeffitsient väheneb (Herlevi 2002). Juhul, kui Päike on seniidis, siis $C = 0.346$ (Kirk 1984), Eesti rannikumere ja järvede jaoks perioodil juuni-august vastab $\mu_0 = 0.88$ ehk $C = 0.421$ (Alikas jt. 2015).

2.3. Satelliitkaugseire

Kaugseire on meetod eemal asuvate objektide ja nähtuste kohta informatsiooni saamiseks nendega otsest kontakti omamata. Kaugseire aluseks on tagasihajunud elektromagnetkiirguse mõõtmine, mille spektraalne koostis erineb pealelangeva kiirguse omast. Sensorite mõõtmismetoodika alusel saab kaugseire jagada aktiivseks ja passiivseks. Aktiivse kaugseire puhul mõõdetakse tehisliku kiirgusallika poolt tekitatud signaali peegeldumist objektilt ning passiivse kaugseire infoallikaks on objektilt peegeldunud päikesekiirgus (Bukata jt 1995; Arst 2003; Bukata 2005). Veekogude kvaliteedi seires leiab peamiselt kasutust passiivne kaugseire, kus sensorid

registreerivad nähtava ja lähisinfrapunase laineala 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. Lähisinfrapuna kanaleid kasutatakse atmosfääri korrigeerimiseks. Antud protseduur on vajalik, kuna ligikaudu 90% satelliidi sensorini jõudvast signaalist pärineb atmosfäärist ega sisalda informatsiooni vee omaduste kohta ning seega tuleb eemaldada (IOCCG 2000; Arst 2003).

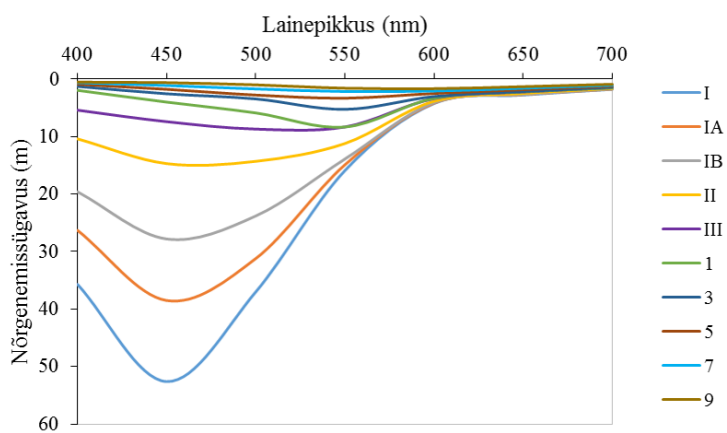
2.4. Veetüüpide klassifikatsioon optiliste parameetrite põhjal

Veetüüpide kategoriseerimine erinevatesse klassidesse aitab mõista uuritava veekogu iseärasusi ning parameetrite omavahelisi seoseid, samuti määratleb ära piirid millistes ulatustes optilised omadused konkreete klassi lõikes varieeruvad. Erinevate parameetrite alusel on loodud mitmeid optilisi klassifikatsioone (Jerlov 1976; Morel & Prieur 1977; Baker & Smith 1982; Kaczmarek & Wozniak 1995).

Kaugseire rakenduste tarbeks on kõige sagedamini kasutatavaks klassifikatsiooniks Morel ja Prieur'i (1977) väljatöötatud klassifikatsioon, kus veed on nende optiliste omaduste hulga ja varieeruvuse suhtes jagatud kahte rühma: Tüüp I (*Case I*) ja Tüüp 2 (*Case II*). Tüüp I alla kuuluvad veekogud, mille optilisi omadusi mõjutavad peamiselt vesi ise (vee molekulid), fütoplankton ning viimase laguproduktid. Seega teiste optiliselt aktiivsete ainete (heljum, CDOM) kontsentratsioonid on korrelatsioonis klorofüll-*a* hulgaga. Antud klassi kuuluvad peamiselt selgeveelised ookeanid, kuid üksikutel juhtudel ka sise- ja rannikuveed (Bukata 2005). Tüüp II esindab veekogusid, mille optilisi omadusi määravad lisaks fütoplanktonile ja vee molekulidele ka veekogusse sissekantud värvunud lahustunud orgaaniline aine ja heljum. Peamiselt hõlmab see ranniku- ja siseveekogusid, kus optiliselt aktiivsed ained varieeruvad üksteisest sõltumatult suures ulatuses. Antud klassifikatsioon ei anna põhjalikku informatsiooni optiliste omaduste muutlikkusest konkreetse veekogu lõikes, mistõttu tuleks rakendada klassifikatsioone, mis vastavad OAA-de lokaalsele mõjule (Mobley jt 2003).

Jerlov (1976) jaotas erinevad veetüübid vastavalt valguse difuusse nõrgenemiskoeffitsiendi $K_d(\lambda)$ spektrite väärtustele viide ookeani tüüpi (I, IA, IB, II, III) ja viide rannavete tüüpi (1, 3, 5, 7, 9). Antud jaotuse puhul näitab veetüübi numbriga kasv vee läbipaistvuse vähenemist. Täpsemalt toimub klassifitseerimine nõrgenemissügavuse $Z_k(\lambda)$ spektrite põhjal (Joonis 2), mis on $K_d(\lambda)$ pöördväärtus:

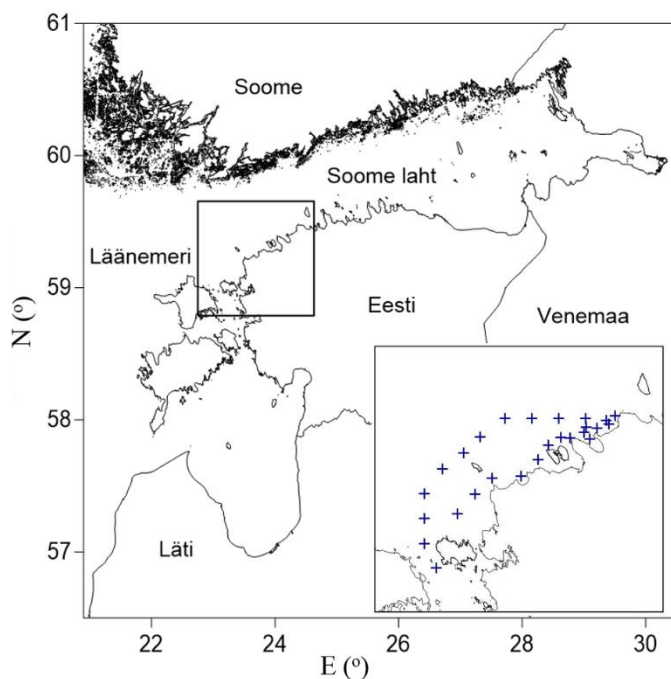
$$Z_k(\lambda) = \frac{1}{K_d(\lambda)}. \quad (8)$$



Joonis 2 Jerlov'i veetüüpide klassifikatsioon nõrgenemissügavuste (Z_k) põhjal. I vastab kõige puhtamale looduslikule veele ja 9 kõige vähem läbipaistvamale rannavete tüübile (Jerlov 1976). Tabel vastavate väärtustega toodud Lisas 1.

3. KASUTATUD ANDMED JA MEETOD

Käesolevas töös on kasutatud üheksa välitööpäeva andmeid (kuus ekspeditsiooni), mis viidi läbi Loode-Eesti rannikul kuupäevadel 20.07.2015, 30.-31.07.2015, 12.08.2015, 25.08.2015, 26.-27.07.2016 ja 03.-04.08.2016. Vee karakteristikute mõõtmine viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudi uurimislavaga SALME. Mõõtmisjaamade asukohad on toodud Joonisel 3.



Joonis 3 Uurimispiirkond ja mõõtmispunktide asukohad Loode-Eesti rannikumeres.

3.1.Laborianalüüs

Veeproovid koguti batomeetri abil vee pindmisest kihist (1 m), 10 m ja 20 m sügavuselt.

Klorofüll *a* kontsentratsiooni määramiseks filtreeriti veeproovid (1 L) hämaras läbi Whatman GF/F klaasfiiberfiltrite (poori suurus 0.7 µm, diameeter 47 mm), seejärel pakiti filtrid fooliumisse ning hoiustati 20°C külmas kuni ekstraheerimiseni. Klorofüllid pigmendid ekstraheeriti filtritelt 96% etanooliga (10 ml) ning saadud ekstrakti analüüsiti Thermo Helios γ abil spektrofotomeetriliselt, täpsemalt mõõdeti neeldumine lainepikkuste 665 nm ja 750 nm juures. Klorofüll *a* kontsentratsioon arvutati Lorenzen (1967) valemi põhjal:

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

kus Chl *a* on klorofüll *a* kontsentratsioon (mg m⁻³), *e* on etanooli hulk (ml), *A* on neeldumine antud lainepikkusel, *V* on filtreeritud vee ruumala (L), *l* on küveti pikkus (cm) ning 83 on 96%-lise etanooli neeldumiskoeffitsient.

Koguheljumi kontsentratsiooni (mg L⁻¹) määramiseks töödeldi kasutatavaid Millipore membraanfiltreid (poori suurus 0,45 µm, diameeter 47 mm) destilleeritud veega, kuivatati ahjus 100°C juures 2h ning kaaluti. Seejärel filtreeriti läbisegatud veeproov (750 ml) läbi eelnevalt töödeldud Millipore membraanfiltrit. Peale seirereisi filtrid kuivatati sama niiskussisalduseni (100°C juures 2h) ning kaaluti uuesti. Filtri kaalu tõus näitab heljumi kontsentratsiooni antud veeproovis. Koguheljum arvutati järgnevalt:

$$TSM = \frac{1000 * (A - B)}{V},$$

kus TSM on koguheljum (mg L⁻¹), *A* on filtri lõppkaal (mg), *B* on filtri algkaal (mg) ning *V* on filtreeritud proovi ruumala (ml).

3.2. Esmased optilised parameetrid

Vee esmaste optiliste parameetrite (IOP) vertikaalseid profiile mõõdeti kasutades spektrofotomeetrit ac-spectra (AC-S), mis mõõdab valguskiire neeldumist (a) ja nõrgenemist (c) kokku 86 lainepikkusel vahemikus 400 kuni 730 nm ~4 nm spektraalse lahutusega. Mõõtmistulemustest arvutati vee hajumiskoeffitsient (b) vastavalt valemile:

$$b(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda).$$

AC-S andmete korrektsioon teostati kasutades Compass 2.0 (*Comprehensive Optical Processing & Acquisition Software System*) tarkvara. Töötluks kasutati temperatuuri, soolsuse ning hajumise korrektsioone. Temperatuuri ja soolsuse korrektsioonid tehti vastavalt CTD profiilile. Hajumise puhul arvestati alusjoone korrektsiooniga (*Baseline Correction*) 715 nm lainepikkuses.

3.3. Füüsilised parameetrid

Sidumaks AC-S mõõtmiste profiile konkreetse sügavuse ja vastava ajahetke temperatuuri ja soolsusega, kasutati CTD sondi mõõtmisandmeid. CTD sondi poolt otsesteks mõõdetavateks parameetriteks on rõhk, temperatuur ja elektrijuhtivus. Vee elektrijuhtivuse kaudu arvutatakse automaatselt soolsus ning rõhu väärtustest sügavus. CTD sondi kasutati üheaegselt koos spektrofotomeetri AC-S ja batomeetriga. Tulenevalt AC-S instrumendi kaabli pikkusest, mõõdeti veesamba profiile kuni 25 m sügavuseni.

3.4. Tuletatud optilised parameetrid

Tuletatud optilised parameetrid $K_d(\lambda)$ ja $R(\lambda)$ arvutati mõõdetud esmaste optiliste parameetrite põhjal. Antud parameetrid arvutati lainepikkuste vahemikus 400–700 nm, mis kujutab endast fotosünteesiliselt aktiivset spektripiirkonda (PAR, *photosynthetically active radiation*).

Difuusne nõrgenemiskoeffitsient $K_d(\lambda)$ arvutati valemi (3) põhjal, kus valguskiire levimisenurga koosinus vahetult veepinna all on $\mu_0 = 0.88$ (Alikas et al. 2015) ning konstandid $g_1 = 0.43$ ja $g_2 = 0.19$ (Kirk 1994).

Peegeldumiskoeffitsient $R(\lambda)$ on arvutatid valemi (6) järgi. Antud töös on arvestatud, et tagasihajumise tõenäosus (tagasihajumiskoeffitsiendi ja hajumiskoeffitsiendi suhe b_b/b) on lainepikkusest sõltumatu ja konstantne suurus. Vastavalt Herlevi (2002) tööle, võeti antud suuruseks 0.015. Seega käesolevas töös $b_b(\lambda) = 0.015 * b(\lambda)$. Päikese seniitnurgast sõltuv muutuja $C(\mu_0)$ jaoks kasutati valemit (7), kus $\mu_0 = 0.88$ (Alikas jt 2015) ehk $C = 0.421$.

Vee suhtelist läbipaistvust mõõdeti Secchi ketta abil. Mõõtmistulemuseks on sügavus, kus inimsilm ei eralda enam vettelastud valge ketta kontuure. Secchi sügavus leiti 0.5m täpsusega.

Tuletatud optiliste parameetrite ja optiliselt aktiivsete ainete (Chl *a* ja TSM) vaheliste seoste leidmiseks kasutati lineaarset regressioonianalüüsi, mille tulemusena leiti determinatsioonikordaja R^2 . Antud kordaja näitab, kui suure osa leitud seosest kirjeldab ära seletatud varieerumine. Statistiliselt oluliseks loeti korrelatsioonid, mille korral olulisuse tõenäosus $p < 0.05$.

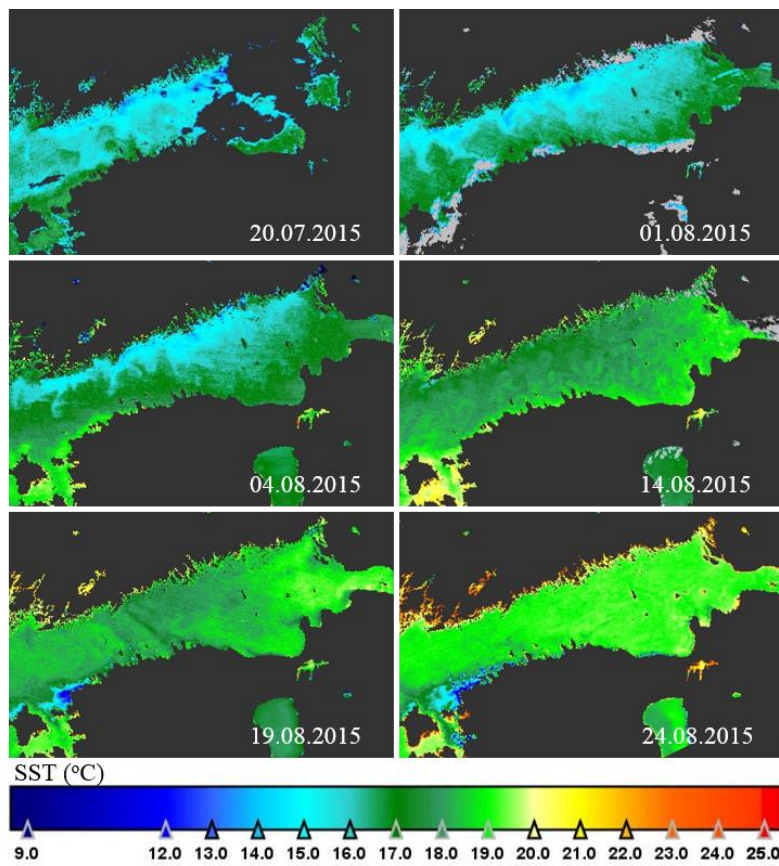
3.5.Satelliitandmed

Kaugseire andmeid kasutati merepinna temperatuuri muutlikkuse jälgimiseks. Selleks kasutati MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) sensori Level-2 produkte, mille puhul on teostatud atmosfäärikorreksioon ning standardse algoritmi alusel arvutatud veepinna temperatuur (*Sea Surface Temperature - SST*). SST produktid valiti välja OceanColor Web kodulehel olevast andmebaasist (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl>), kus tingimuseks oli, et pildid oleksid vähese pilvisusega. Edasi töödeldi pilte tarkvaraga BEAM (*Basic ERS & ENVISAT (A)ATSR and MERIS toolbox*), mille käigus eraldati sobiv piirkond ning rakendati kvaliteedi-, maa- ja pilvemask.

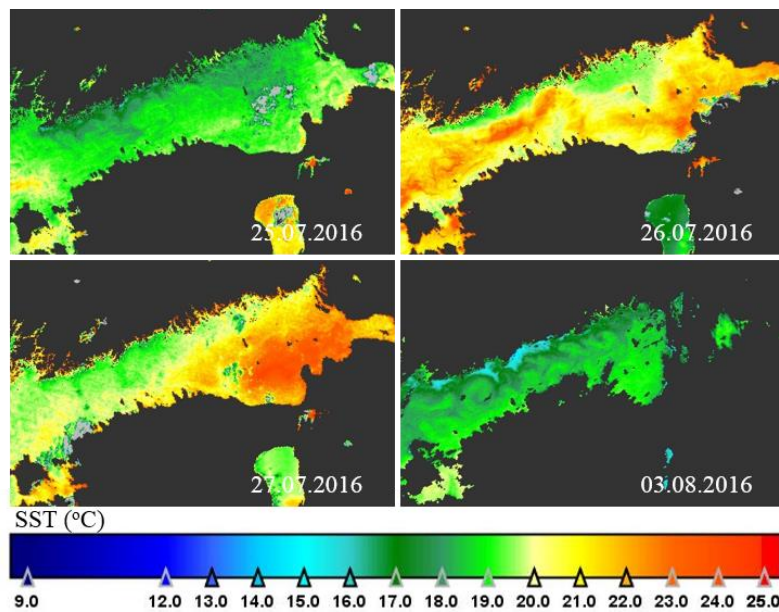
4. TULEMUSED

4.1. Temperatuuri ja soolsuse horisontaalne jaotus seirepäevadel

Kasutades kaugseire andmeid on Joonistel 4 ja 5 toodud vee pinnatemperatuuri (SST) kaardid vastavalt aastate 2015 ja 2016 kohta, mis kirjeldavad Soome lahe temperatuuri ajalis-ruumilist muutlikkust nii seirepäevadel kui ka nende vahepealsel perioodil. 2016 aasta pinnatemperatuuri väärtused olid kõrgemad, ulatudes kohati kuni 25 °C-ni. Üldiselt esinesid Soome lahe lõunarannikul võrreldes põhjarannikuga mõnevõrra kõrgemad temperatuurid. 2015 aasta augusti teisel poolel esines Loode-Eesti rannikumeres apvelling, kus temperatuuri erinevused sügavamatest kihtidest pärit külma vee ja seda ümbritseva vee vahel ulatus ligikaudu 9 °C-ni (Joonis 4). 03.08.2016 pinnatemperatuuri kaardilt (Joonis 5) on samuti täheldatav nõrk apvellingu piirkond Soome lahe rannikumeres, kuid mis võrreldes 2015. aasta omaga oli oluliselt väiksema intensiivsusega.

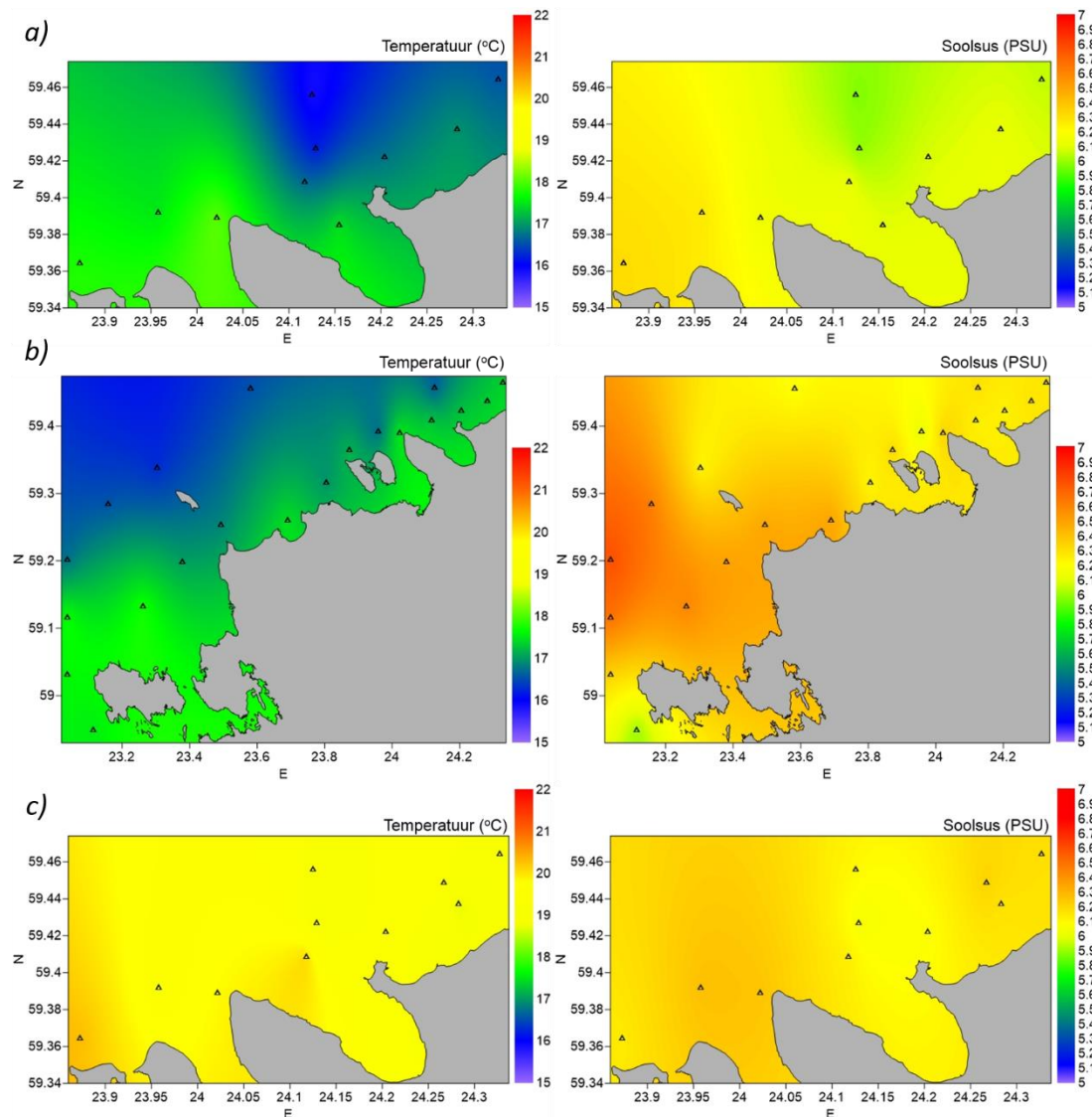


Joonis 4 2015 aasta seireperioodi vee pinnatemperatuuri (SST) kaardid.

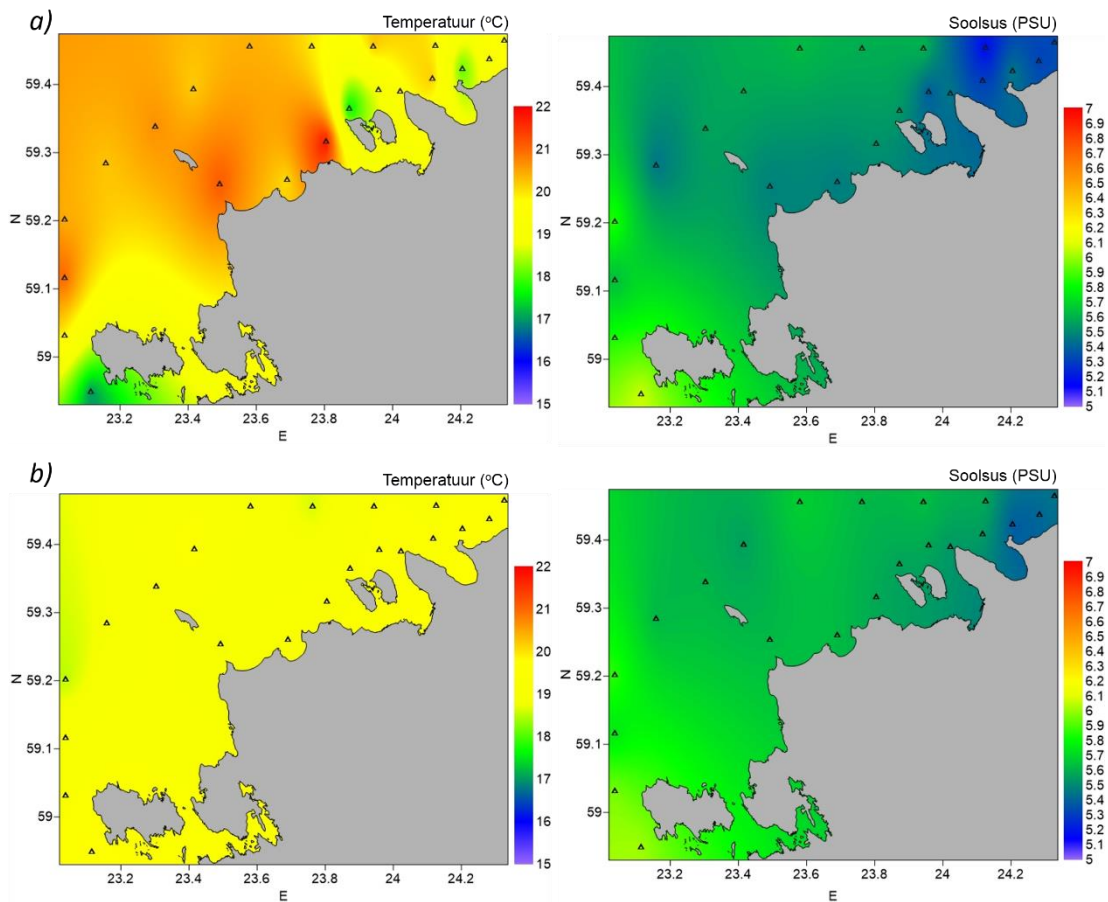


Joonis 5 2016 aasta seireperioodi vee pinnatemperatuuri (SST) kaardid.

Kontaktmõõtmiste põhjal arvestatavaid horisontaalseid temperatuuri ja soolsusi erinevusi kogu mõõtmispiirkonna ulatuses ei olnud. Seevastu seirepäevade lõikes oli mõningane erinevus täheldatav (Joonis 6 ja 7). Lisas 2 on toodud seirepäevade keskmised, minimaalsed ja maksimaalsed temperatuuri ja soolsuse väärtused. 2015 aasta seirepäevadel olid pinnakihi temperatuuri väärtused vahemikus 15.9-20.3 °C, soolsus varieerus 5.4-6.8 PSU. 2016 aasta temperatuuri väärtused olid kõrgemad ning soolsuse väärtused madalamad, varieerudes 17.0-21.8 °C ja 5.1-6.1 PSU.



Joonis 6 Temperatuuri ja soolsuse horisontaalne jaotus kuupäevadel a) 20.07.2015 b) 30.-31.07.2015 c) 12.08.2015. Kolmnurgad tähistavad mõõtmisjaamade asukohti. Mõõtmistandmete interpoleerimiseks (kriging meetodil) kasutati kaarditarkvara Surfer.

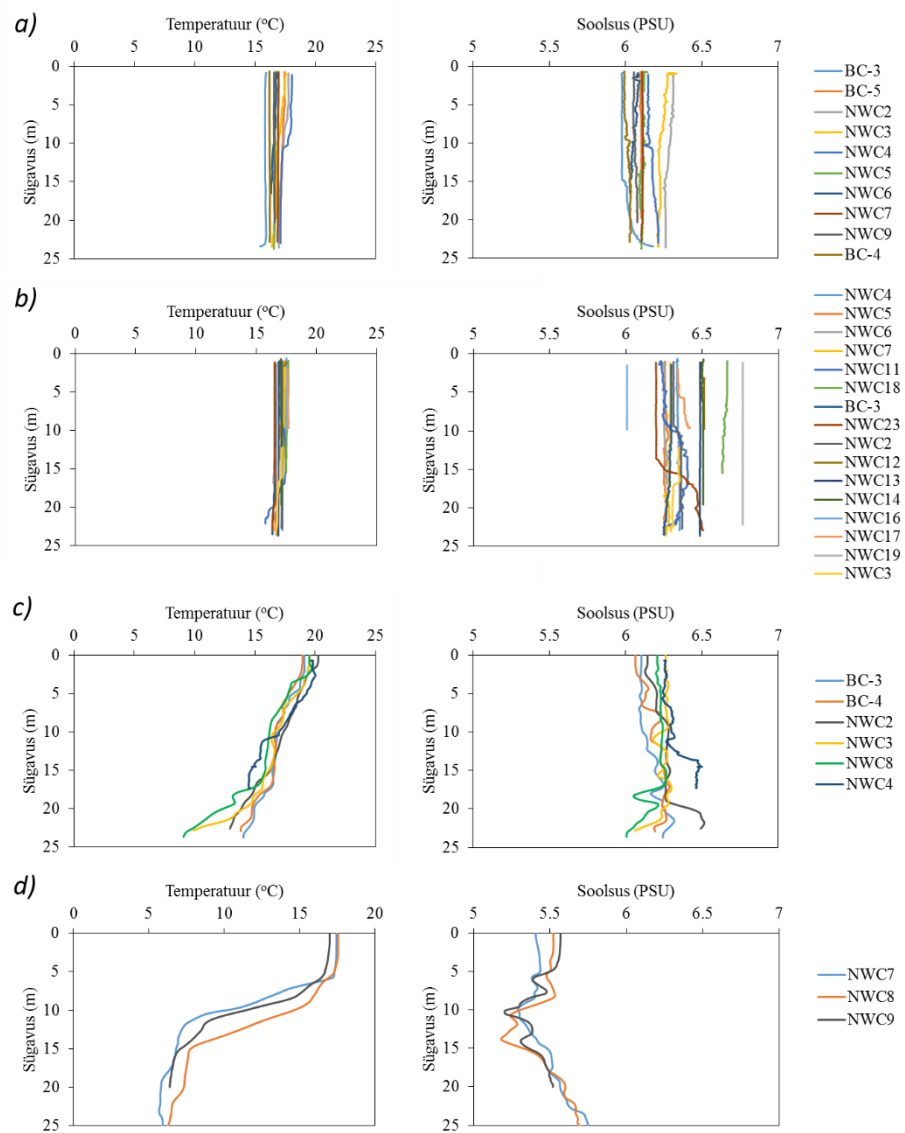


Joonis 7 Temperatuuri ja soolsuse horisontaalne jaotus kuupäevadel a) 26.-27.07.2016 b) 03.-04.08.2016. Kolmnurgad tähistavad mõõtmisjaamade asukohti. Mõõtmistandmete interpoleerimiseks (kriging meetodil) kasutati kaarditarkvara Surfer.

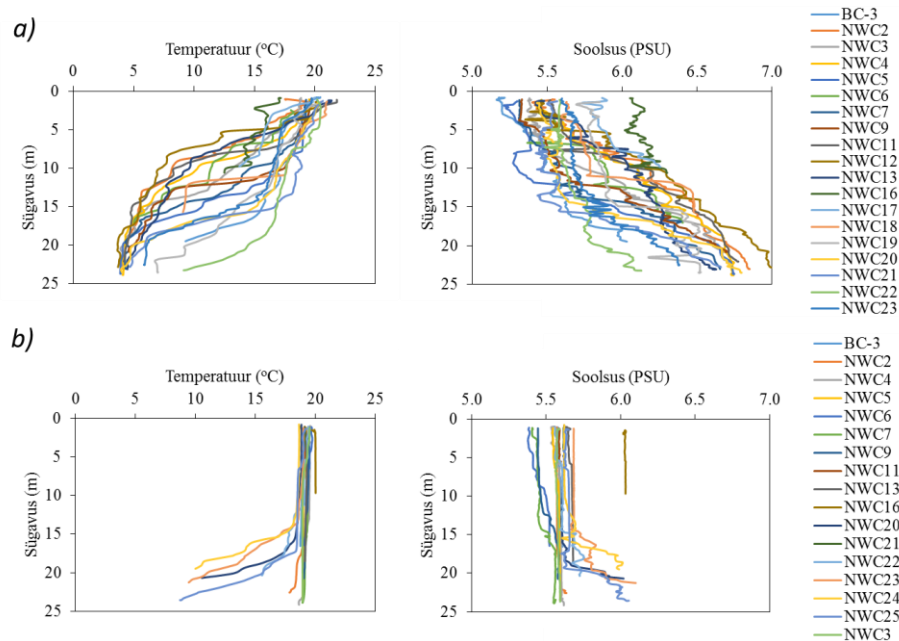
4.2. Temperatuuri ja soolsuse vertikaalne jaotus seirepäevadel

Mõõdetud temperatuuri ja soolsuse profiilid Loode-Eesti rannikumeres 2015 ja 2016 aastal on toodud Joonistel 8–9. Temperatuuri ja soolsuse vertikaalsed jaotused varieerusid seirepäevade lõikes üsna suures ulatuses. Kuupäevadel 20.07.2015 ja 30.-31.07.2015 oli mõõtmispiirkond kuni 25 m sügavuseni ühtlaselt läbisegunenud. Uurides taustaks tuule andmeid, selgus, et enne mõlemat seirekuupäeva valdasid läänekaare tuuled. Tulenevalt sellest olid ilmselt aset leidnud daunvellingu sündmused, mis põhjustasid veesamba läbisegunemist kuni 25 m sügavuseni. 20.07.2015 SST kaardi pealt (Joonis 4) on samuti märgata Loode-Eesti rannikumeres

olevat daunvellingu ala, kus pinnavee temperatuurid olid mõnevõrra kõrgemad. 12.08.2015 vertikaalsed profiilid näitasid temperatuuri ühtlast vähenemist sügavusega, seejuures soolsus näitas vähest muutlikkust. 25.08.2015 oli uuritav ala temperatuuri järgi vertikaalselt stratifitseeritud. Ülemise läbisegunenud kihi keskmine temperatuur oli 17.7 °C. Temperatuuri hüppekiht paiknes 6 ja 14 m vahel. Termokliini aluse veekihi temperatuur oli ligikaudu 6.5 °C. Antud veekihis toimus soolsuse ühltane suurenemine, 14 m sügavusel oli soolsus ligikaudu 5.3 PSU ning 28 m sügavusel 5.8 PSU. 26.-27.07.2016 vertikaalsed profiilid näitasid temperatuuri ühtlast vähenemist ja soolsuse ühtlast suurenemist sügavusega. 03.-04.08.2016 mõõtmisperioodil esines nii termokliini kui ka kuni 25 m sügavuseni läbisegunenud veekihi olemasolu. Veesamba läbisegunemist võis taaskord põhjustada daunvellingu sündmus. 03.08.2016 SST kaardi pealt (Joonis 5) on selgelt eristatav apvellingu sündmus Soome rannikumeres. Teadaolevalt kehtib lahe kitsusest tingituna paaris mehhanism, millest võib järeldada, et apvellingu sündmusega Soome rannikumeres kaasnes daunvelling Eesti rannikul. Antud järeldus on kooskõlas ka taustaks uuritud tuuleandmetega, mille põhjal selgus, et vastaval seireperioodil olid valdavalt läänekaare tuuled. Termokliin registreeriti mõõtejaamades, mis asusid võrreldes teistega rohkem avamere suunas. Termokliin oli tuvastatav alates 14 m kuni 25 m sügavuseni, kus temperatuur vähenes ligikaudu 7.5 °C. Soolsuse profiilid näitasid temperatuuriga sarnast mustrit. Mõõdistustel, kus esines temperatuuri hüppekiht mõõdeti ka suuremad soolsuse vertikaalsed gradiendid.



Joonis 8 Temperatuuri ja soolsuse vertikaalprofiilid a) 20.07.2015 b) 30.-31.07.2015 c) 12.08.2015 ja d) 25.08.2015 mõõtejaamades.



Joonis 9 Temperatuuri ja soolsuse vertikaalprofiilid a) 26.-27.07.2016 b) 03.-04.08.2016 mõõtejaamades.

4.3. Termohaliinse struktuuri seos esmaste optiliste parameetrite vertikaalse jaotusega

Mõõdistusperioodi vältel esines ülemises 25 m veekihis kolme erinevat termohaliinset struktuuri:

- a) läbisegunenud veesammas;
- b) nõrgalt stratifitseeritud veesammas;
- c) tugevalt stratifitseeritud veesammas (eristus ülemine segunenud veekiht, termokliin ja termokliini alune veekiht).

Esmaste optiliste parameetrite (IOP) vertikaalsed jaotused näitavad termohaliinse struktuuriga sarnast muutlikkust (Joonised 10 – 12). Seejuures oluline on märkida, et veesamba kihistatus reguleerib läbi optiliselt aktiivsete ainete (OAA) jaotuse IOP-de muutlikkust. Veeproovidest analüüsitud OAA-de (TSM ja Chl *a*) muutlikkus (%) vastavalt erinevate sügavuste ja termohaliinsete struktuuride lõikes on toodud Tabelis 1.

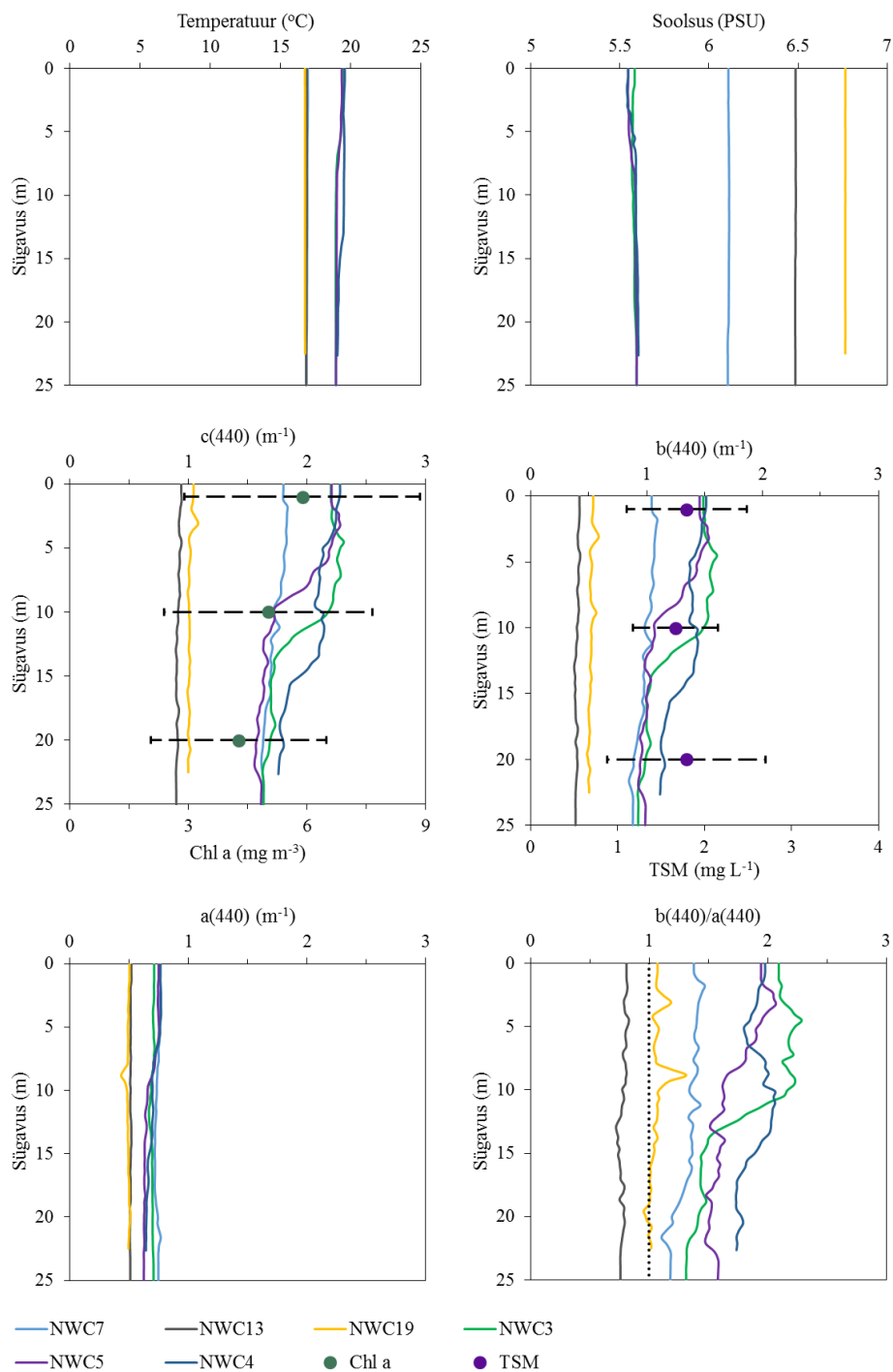
Olukorras, kus vesi oli kuni 25 m läbisegunenud, nõrgenemiskoeffitsientide c väärtused sügavusega oluliselt ei muutunud (Joonis 10). Koeffitsientide väärtused varieerusid vertikaalis vähem kui 1.0 ühiku võrra. Samuti hajumis- (b) ja neeldumiskoeffitsiendi (a) suhe jäi vertikaalis peaaegu muutumatuks. Üldiselt domineeris kogu veekihi ulatuses hajumine, erandiks oli mõõtejaam NWC13, kus neeldumine oli kogu nõrgenemisprotsessis ülekaalus.

Nõrgalt stratifitseeritud veesambas on märgata optiliste parameetrite väärtuste vähenemist sügavusega (Joonis 11). Nii nõrgenemiskoeffitsientide c kui ka hajumiskoeffitsientide b väärtused vähenevad 25 m ulatuses rohkem kui 1.5 ühiku võrra. Seejuures neeldumiskoeffitsientide a väärtused näitavad vähest muutlikkust. Hajumise intensiivsus vähenes sügavusega sedavõrd, et neeldumine muutus teatud sügavusel domineerivamaks ehk teisisõnu $b(\lambda)/a(\lambda)$ suhe oli väiksem kui 1 (v.a NWC22). Erandlik oli jaam NWC2, kus neeldumine oli 6-17.5 m sügavusel ülekaalus, peale mida hakkas domineerima taaskord hajumine.

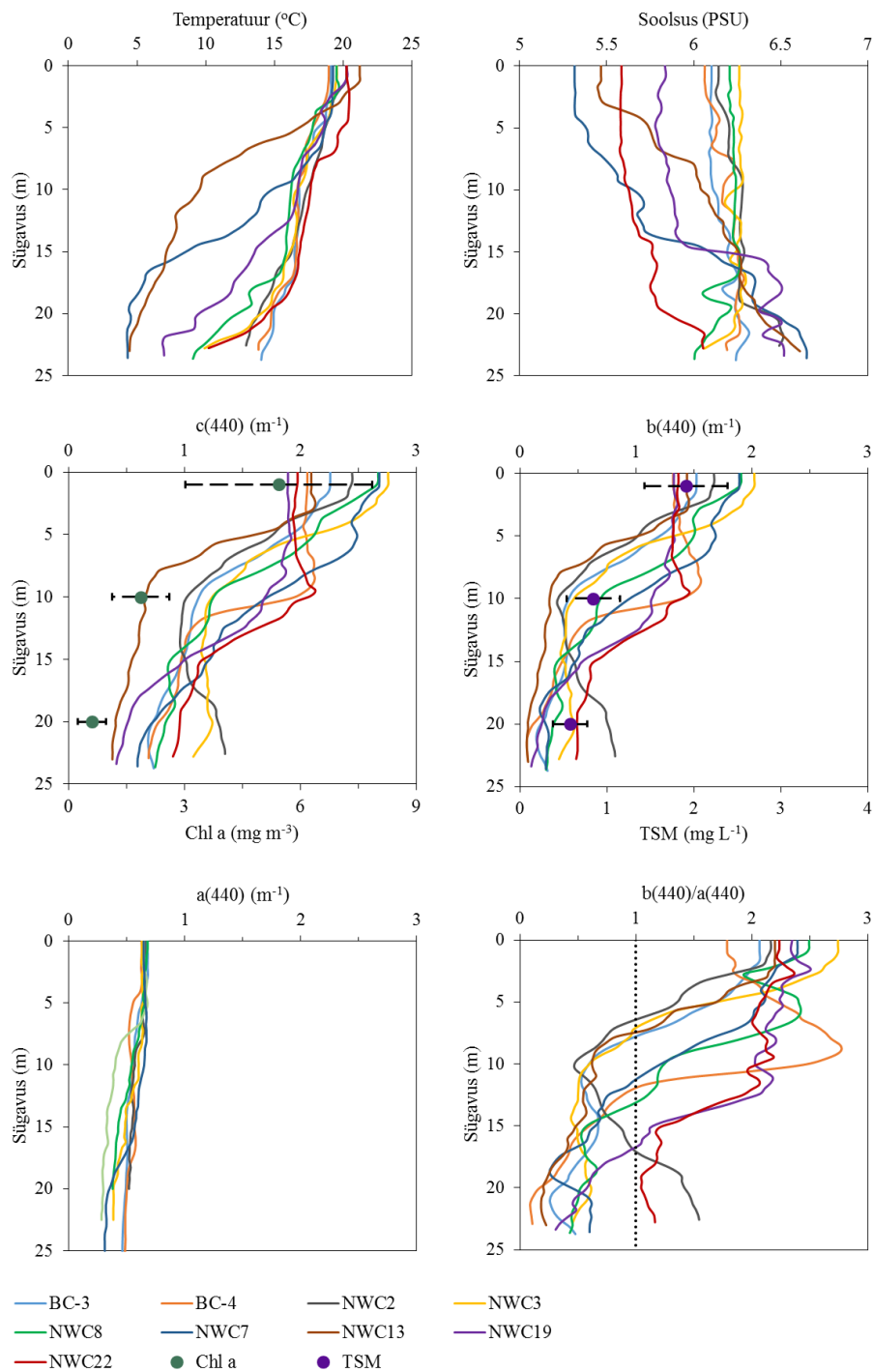
Tugeva stratifikatsiooni esinemisel on temperatuuri, nõrgenemiskoeffitsiendi c ja hajumiskoeffitsiendi b vertikaalsed profiilid väga sarnased. Termokliini esinemisel nii nõrgenemine kui ka hajumine vähenes järsult. Sarnaselt eelnevate neeldumiskoeffitsientide $a(440)$ profiilidega, neeldumise vertikaalses jaotuses olulisi erinevusi ei ole täheldada. Nõrgenemiskoeffitsient $c(440)$ muutus termokliini vahelises kihis üsna suures ulatuses, keskmiselt 0.7-1.7 m^{-1} . Ühtlasi muutus neeldumine termokliinis alati domineerivamaks ($b(\lambda)/a(\lambda) < 1$). Termokliini aluses veekihi olulisi muutusi enam ei toimunud, seejuures kogu nõrgenemisprotsessis jäi valdavaks neeldumine.

Tabel 1 Heljumi (TSM) ja klorofüll a (Chl a) muutlikkus (%) erinevate sügavuste ja termohaliinsete struktuuride lõikes.

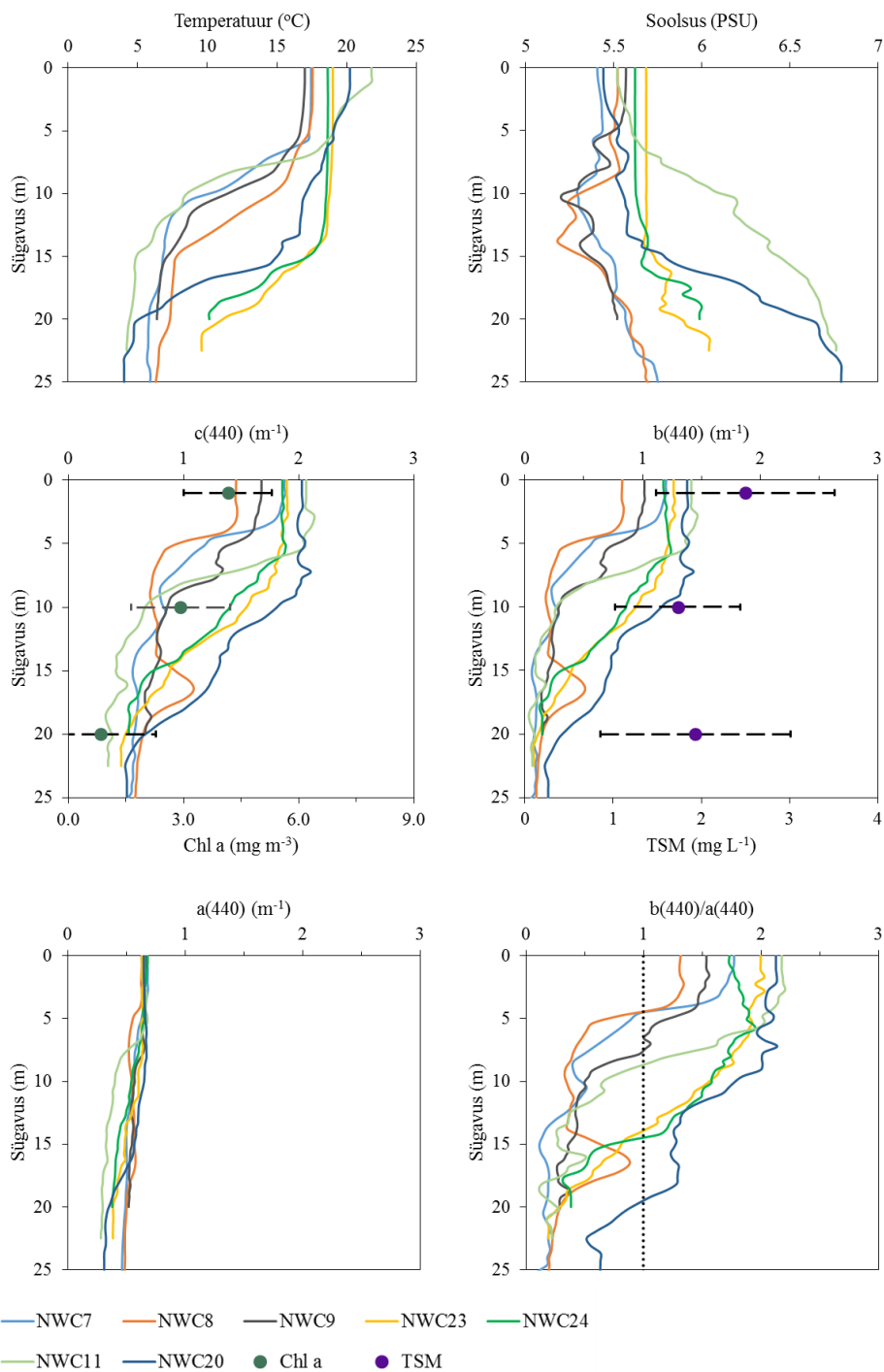
	1 & 10 m erinevus (%)		1 & 20 m erinevus (%)	
	TSM	Chl a	TSM	Chl a
Segunenud	7.1	14.5	0.1	27.3
Vahepealne	55.8	65.6	69.8	88.8
Stratifitseeritud	30.7	29.7	22.7	79.7



Joonis 10 Temperatuuri, soolsuse, $c(440)$, $b(440)$, $a(440)$ ja $b(440)/a(440)$ vertikaalsed profiilid olukorras, kus veesammas oli kuni 25 m sügavuseni läbisegunenud. Lisaks toodud keskmised Chl a ja TSM kontsentratsioonid koos standardhälvetega. Punktiirjoon $b(440)/a(440)$ graafikul tähistab piiri, millest alates domineerib kas valguse neeldumine ($b/a < 1$) või hajumine ($b/a > 1$).



Joonis 11 Temperatuuri, soolsuse, $c(440)$, $b(440)$, $a(440)$ ja $b(440)/a(440)$ vertikaalsed profiilid olukorras, kus veesammas oli nõrgalt stratifitseeritud. Lisaks toodud keskmised Chl a ja TSM kontsentratsioonid koos standardhälvetega. Punktirjoon $b(440)/a(440)$ graafikul tähistab piiri, millest alates domineerib kas valguse neeldumine ($b/a < 1$) või hajumine ($b/a > 1$).

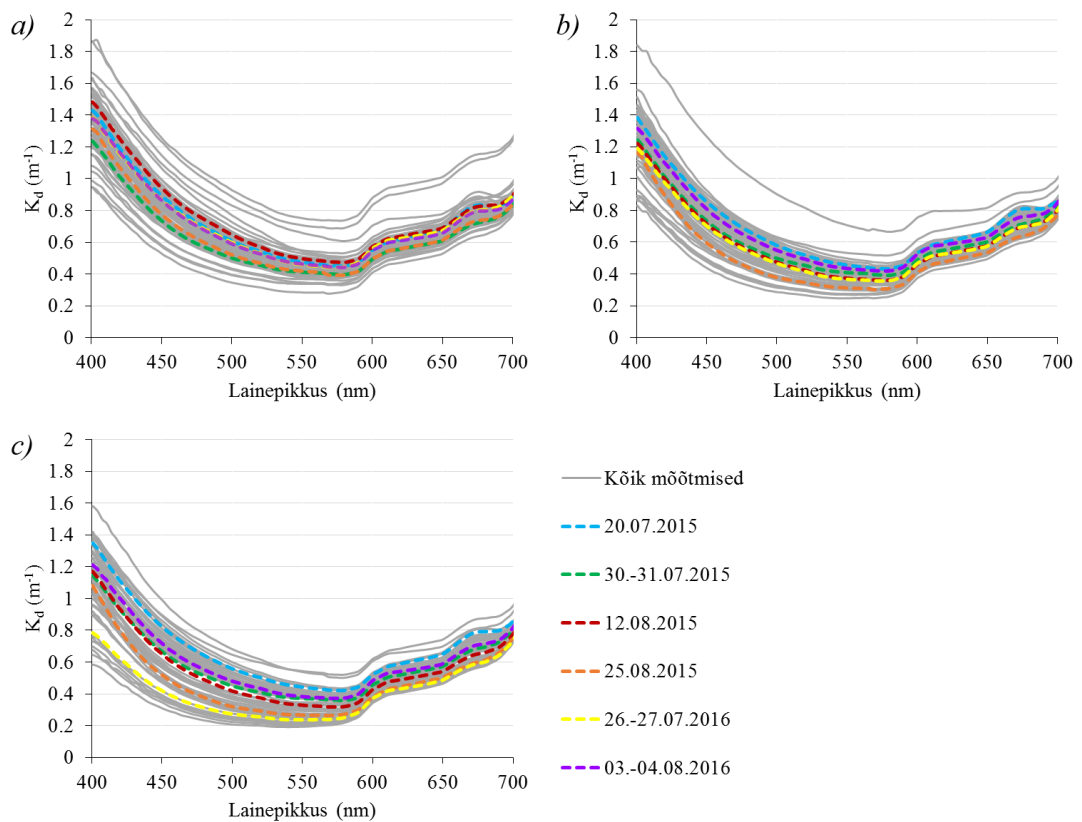


Joonis 12 Temperatuuri, soolsuse, $c(440)$, $b(440)$, $a(440)$ ja $b(440)/a(440)$ vertikaalsed profiilid olukorras, kus veesammas oli vertikaalselt tugevalt stratifitseeritud. Punktirjoon $b(440)/a(440)$ graafikul tähistab piiri, millest alates domineerib kas valguse neeldumine ($b/a < 1$) või hajumine ($b/a > 1$).

4.4. Tuletatud optilised parameetrid ja nende vertikaalne jaotus

Tuletatud optilised parameetrid $K_d(\lambda)$ ja $R(\lambda)$ pinnakihis, 10 m ja 20 m sügavusel arvutati mõõdetud neeldumis- ($a(\lambda)$) ja hajumiskoefitsiendi ($b(\lambda)$) väärtustest. Antud parameetreid on võrreldud Chl *a* ja TSM andmetega, mis kogutud samadelt sügavustelt. Tabelis 2 on toodud tervikpilt koondandmetest seirepäevade lõikes.

Difuusse nõrgenemiskoefitsiendi K_d PAR (400–700 nm) piirkonna spektrid on toodud Joonisel 13. Mida kõrgemad $K_d(\lambda)$ väärtused, seda sogasema veega on tegu. Jooniselt 13 on näha, et $K_d(\lambda)$ varieerus uurimisalal suures ulatuses, seda nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt. Taoline muutlikkus näitab, et vaadeldavas uurimispiirkonnas on OAA-de kontsentratsioonid nii ajas kui ruumis erinevad. Lisaks võrreldes seirepäevade keskmisi spektreid, on märgata, et spektrite varieeruvus sügavusega kasvab. Seejuures on varieeruvus lühematel lainepikkustel (400-550 nm) suurem. Teadaolevalt on antud spektripiirkonnas peamisteks optilisi parameetreid mõjutavateks aineteks Chl *a* ja CDOM, millest viimase kohta laboriandmed kahjuks puuduvad. Tabelist 2 on näha, et Chl *a* sisaldus kahaneb sügavusega, kõige suurema Chl *a* kahanemisega (89.1%) langesid $K_d(PAR)$ väärtused 26.7%. Seejuures kõige suuremale $K_d(PAR)$ kahanemisele (40.8%) olid vastavad Chl *a* ja TSM väärtuste muutused 80.1% ja 61.4%. Kõige väiksema $K_d(PAR)$ kahanemise korral (6.8%) oli ka Chl *a* ja TSM muutlikkus sügavusega väiksem, vastavad kontsentratsioonid alanesid pinnakihist 20 m sügavuseni 31.7% ja 42.1%. Võrreldes $K_d(\lambda)$ spektraalkõverate kujusid, siis on näha, et need on kõigil kolmel sügavusel sarnased.



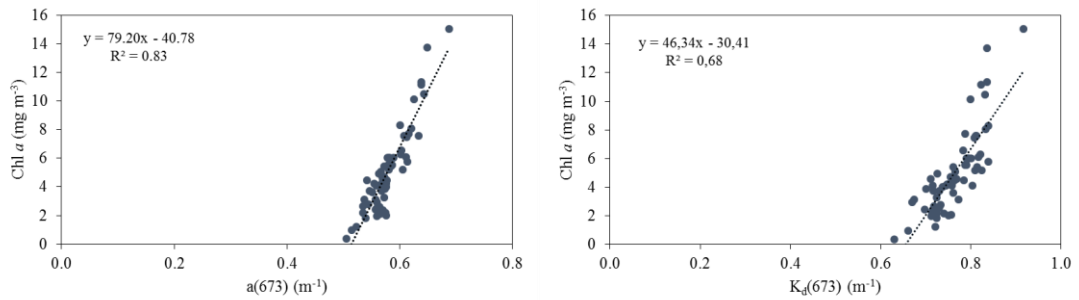
Joonis 13 $K_d(\lambda)$ varieeruvus kõikide seirepäevade jooksul a) pinnakihis b) 10 m sügavusel c) 20 m sügavusel. Pidevjoon tähistab kõikide seirepäevade K_d spektreid ning katkendjoon vastavate seirepäevade keskmisi spektreid.

Mitmese lineaarse regressiooni rakendamisel arvatud $K_d(\text{PAR})$ ja mõõdetud OAA-dele (Chl a ja TSM), selgus, et antud OAA-d koos kirjeldavad 45% kogu PAR spektripiirkonna varieeruvusest:

$$K_d(\text{PAR}) = 0.013(\pm 0.004)\text{Chl}a + 0.017(\pm 0.016)\text{TSM} + 0.58(\pm 0.035)$$

Antud juhul $R^2=0.45$ ja $p<0.05$, kusjuures mõlemad OOA-de kordajad on 0-st erinevad 95% usaldatavuse juures. Rakendades lineaarset regressiooni eraldi Chl a ja TSM jaoks, siis selgus, et Chl a kirjeldab 42% $K_d(\text{PAR})$ muutlikkusest ja TSM 15% $K_d(\text{PAR})$ muutlikkusest. Tulenevalt sellest, sai uuritud, millisel lainepikkusel on $K_d(\lambda)$ ja OAA-de seos suurim. Täpsemalt leiti korrelatsioon kõigi lainepikkuste ja OOA-de kontsentratsioonide vahel. Analüüsist selgus, et korrelatsioon $K_d(\lambda)$ ja Chl a vahel on suurim lainepikkuse 673 nm juures, antud spektripiirkonnas asus ka Chl a

neeldumismaksimum (Joonis 14). Determinatsioonikordaja (R^2) oli $a(673)$ jaoks parem kui $K_d(673)$ korral, vastavalt 0.83 ja 0.68. Selle põhjuseks on ilmselt asjaolu, et $K_d(\lambda)$ sõltub lisaks optiliselt aktiivsetele ainetele ka valguskiire levimisnurgast.

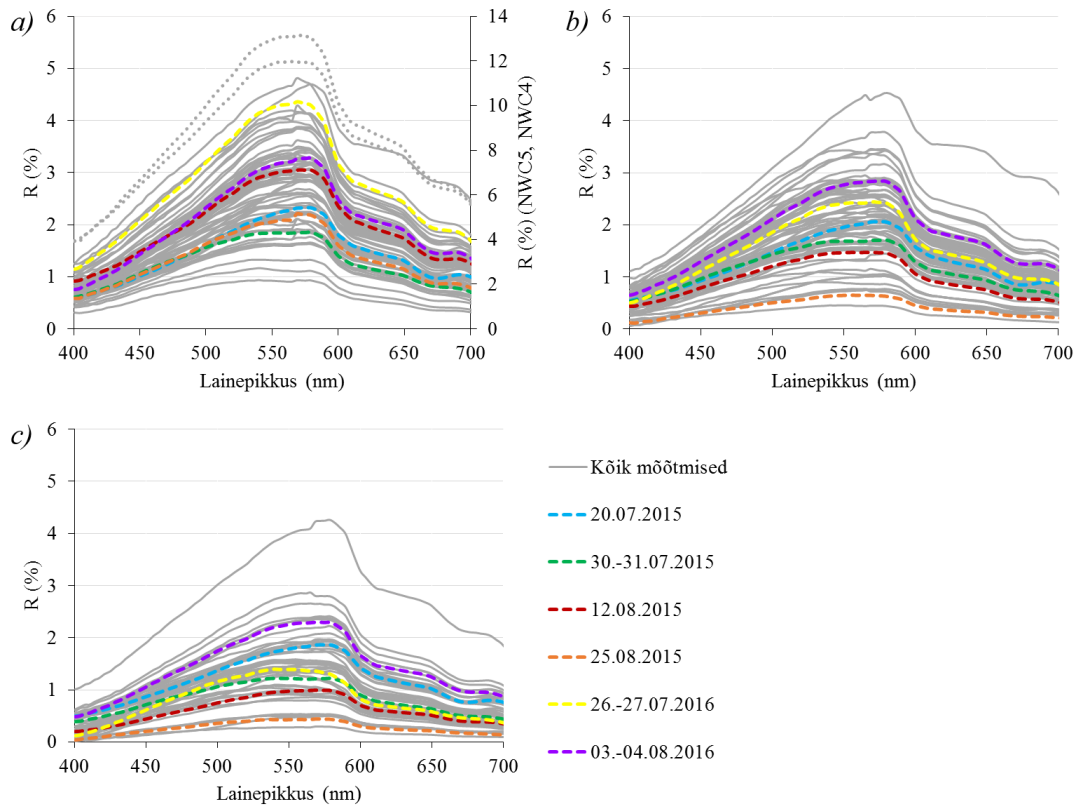


Joonis 14 Korrelatsioon neeldumiskoeffitsiendi $a(673)$ ja Chl a vahel (vasakul) ning $K_d(673)$ ja Chl a vahel (paremal).

Sarnaselt difuussele nõrgenemiskoeffitsiendile $K_d(\lambda)$, arvutati peegeldumiskoeffitsiendi $R(\lambda)$ spektrid $a(\lambda)$ ja $b(\lambda)$ mõõtmistulemustest kolmel erineval sügavusel: pinnakihis, 10 m ja 20 m sügavusel (Joonis 15). Spektraalsed väärtused muutusid pinnakihis 400 nm juures vahemikus 0.31–3.94 ühikut, 550 nm juures 0.92–12.98 ühikut ja 700 nm juures 0.31–5.52 ühikut. Seevastu 20 m sügavusel vastavalt 0.01–1.01, 0.28–3.99 ja 0.09–1.79 ühikut. Spektraalkõverate kujust on näha, et uuritav rannikuveesi peegeldab tugevasti spektri rohelises osas, täpsemalt 550–580 nm juures. Mõlemal pool maksimumi toimub järsk peegeldumise vähenemine nii, et väärtus lainepikkusel 500 nm osas ületab vastava koeffitsiendi väärtust 650 nm juures. Samuti on märgata miinimumi 670 nm piirkonnas, mis vastab klorofüllil neeldumisele antud spektriosas. Seejuures 20 m sügavusel asuvad spektrid on pikematel lainepikkustel oluliselt laugema kujuga, mis tuleneb asjaolust, et antud sügavuselt olid Chl a kontsentratsioonid ka väiksemad.

Uurides seirepäevade keskmiste $R(\text{PAR})$ väärtuste muutusi erinevate sügavuste lõikes, tuli ilmsiks analoogne seos $K_d(\text{PAR})$ -ga. Nimelt oli varieeruvus seda suurem, mida suuremad olid muutused OAA-de sisalduses. Olukorras, kus $R(\text{PAR})$ väärtused oli pinnakihist kuni 20 m sügavuseni kahanenud 72.6%, olid Chl a ja TSM kontsentratsioonid alanenud vastavalt 80.1% ja 61.2%. Seevastu väiksema vertikaalse

muutlikkuse korral (18.5%), olid nii Chl *a* kui ka TSM sisaldused sügavusega vähenenud vastavalt 31.7% ja 42.1%.



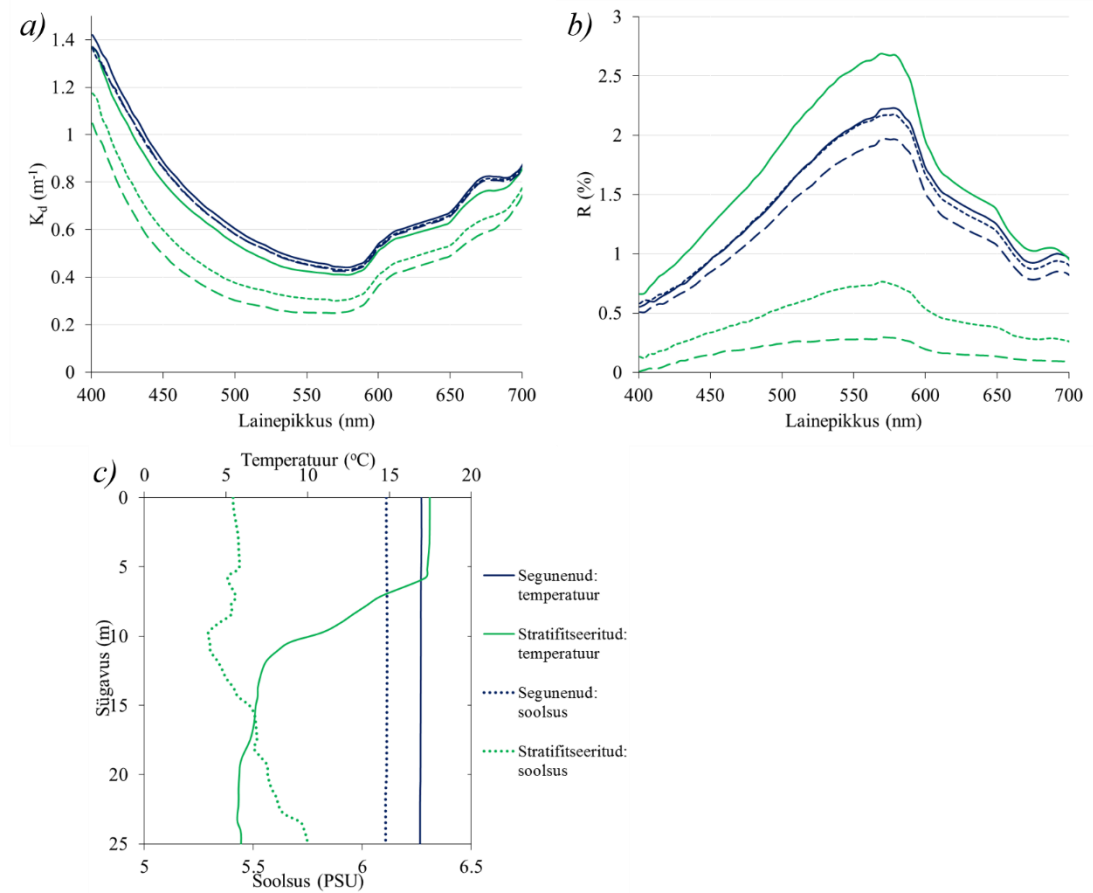
Joonis 15 $R(\lambda)$ varieeruvus kõikide seirepäevade jooksul a) pinnakihis b) 10 m sügavusel c) 20 m sügavusel. Pidevjoon tähistab kõikide seirepäevade R spektreid ning katkendjoon vastavate seirepäevade keskmisi spektreid. Punktiirjoonega tähistatud pinnakihi spektrid vastavad sekundaarse y-teljestiku väärtustele.

Uurides $R(\lambda)$ korrelatsioone OAA-ga (Chl *a* ja TSM), olid tulemused üle kogu vaadeldava spektripiirkonna nõrgad. Näiteks võrreldes Chl *a* ja peegeldumiskoeffitsiente samal lainepikkusel, kus leiti olevat Chl *a* neeldumismaksimum (673 nm), saadi tulemuseks, et korrelatsioon ei ole statistiliselt oluline ($p > 0.05$). Põhjuseks on ilmselt asjaolu, et uuritava rannikuvee puhul on tegemist optiliselt keeruka veekoguga, kus nii Chl *a* kui ka TSM kontsentratsioonide leidmiseks peegeldumiskoeffitsientide väärtustest tuleb kasutada mitmel lainepikkusel põhinevaid seoseid. Antud seoste leidmine ei olnud käesoleva töö eesmärgiks.

Tabel 2 Keskmised klorofüllü (Chl *a*), heljumi (TSM), K_d (PAR) ja R (PAR) väärtused seirepäevade ja sügavuste lõikes.

	Chl <i>a</i> (mg m ⁻³)			TSM (mg L ⁻¹)			K_d (PAR) (m ⁻¹)			R (PAR) (%)		
	1 m	10 m	20 m	1 m	10 m	20 m	1 m	10 m	20 m	1m	10 m	20 m
20.07.2015	9.92	8.42	6.78	2.28	1.49	1.32	0.73	0.70	0.68	1.46	1.30	1.19
30.-31.07.2015	3.17	3.25	2.15	1.61	1.30	0.96	0.63	0.62	0.58	1.26	1.16	0.82
12.08.2015	6.97	2.19	0.76	1.87	0.76	0.76	0.75	0.60	0.55	1.99	0.96	0.62
25.08.2015	2.18	-	-	2.31	-	-	0.65	0.53	0.47	1.37	0.40	0.27
26.-27.07.2016	3.51	2.07	0.70	1.97	1.07	0.76	0.71	0.59	0.42	2.96	1.51	0.81
03.-04.08.2016	5.11	4.46	2.47	2.68	2.17	1.65	0.71	0.67	0.61	2.06	1.78	1.45

Samuti vaadeldi temperatuuri ja soolsuse profiili seoseid tuletatud optiliste parameetritega erinevatelt sügavustelt. Joonisel 16 on toodud $K_d(\lambda)$ ja $R(\lambda)$ PAR piirkonna spektrid, mis arvutatud 1, 10 ja 20 m sügavustel mõõdetud $a(\lambda)$ ja $b(\lambda)$ väärtustest kahe erineva termohaliinse struktuuri korral. Antud analüüsi puhul on arvestatud asjaoluga, et sarnaselt IOP-dele, on AOP-de muutlikkuse otseseks mõjutajaks muutused OAA-de kontsentratsioonides (Chl *a* ja TSM), millest viimaste vertikaalset jaotust mõjutavad veesamba tiheduse erinevused. Veesamba tugeva kihistuse tingimustes peaksid ka OAA-de vertikaalne liikuvus olema pärsitud, mistõttu peaks see olema kajastatud ka AOP-de vertikaalses jaotuses. Võrreldes Joonisel 16 toodud temperatuuri ja soolsuse profiile $K_d(\lambda)$ ja $R(\lambda)$ spektritega, on näha, et suurem AOP-de vertikaalne varieeruvus esineb kihistunud veesamba korral. Tabelis 3 on toodud AOP-de nii PAR piirkonna keskmised, kui ka antud parameetritele olulisematel lainepikkustel olevad väärtused. Ülemise segunenud kihi ja termokliini aluse veekihi erinevused olid $K_d(\text{PAR})$ ja $R(\text{PAR})$ puhul vastavalt 31.0% ja 89.3%. Olukorras, kus veesammas oli läbisegunenud, muutusid AOP-de väärtused vähe: $K_d(\text{PAR})$ 3.1% ja $R(\text{PAR})$ 11.9%. Seda põhjendab asjaolu, et antud tingimustes oli OAA-de jaotus uuritava veesamba ulatuses ühtlasem.



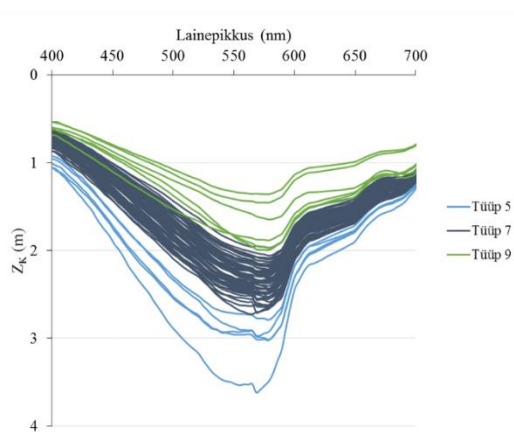
Joonis 16 a) $K_d(\lambda)$ ja b) $R(\lambda)$ PAR piirkonna spektrid erinevate sügavuste ja termohaliinsete struktuuride lõikes; c) temperatuuri ja soolsuse profiilid segunenud ja stratifitseeritud veesambas.

Tabel 3 OAA-de ning $K_d(\lambda)$ ja $R(\lambda)$ erinevused (%) vastavate sügavuste ja termohaliinsete struktuuride lõikes.

	1 & 10 m erinevus (%)		1 & 20 m erinevus (%)	
	Segunenud	Stratifitseeritud	Segunenud	Stratifitseeritud
TSM	-5.9	-33.3	21.6	-46.7
Chl <i>a</i>	10.2	56.5	22.1	100.0
$K_d(\text{PAR})$	2.8	20.6	3.1	31.0
$K_d(490)$	3.8	30.7	3.8	44.1
$K_d(673)$	1.4	15.2	2.1	22.9
$R(\text{PAR})$	1.6	72.6	11.9	89.3
$R(565)$	0.7	71.9	11.3	89.5
$R(673)$	5.4	72.7	15.3	89.9

4.5. Veetüüpide klassifikatsioon optiliste parameetrite põhjal

Käesoleva magistritöö üheks eesmärgiks oli uurida millistesse Jerlov'i veetüüpide klassi Loode-Eesti rannikuvesi kategoriseerub. Nimetatud klassifikatsioon toimub nõrgenemissügavuse $Z_k(\lambda)$ spektrite alusel, mis iseloomustavad kõikide OAA-de koosmõju valguse nõrgenemisel vees. 2015-2016 aasta suviste mõõtmiste põhjal tehtud arvutuste tulemusena selgus, et uuritav rannikuvesi klassifitseerus Jerlov'i rannikuvee tüüpide 5, 7 ja 9 vahele (Joonis 17). Lisas 3 on toodud vastavate veetüüpide keskmised nõrgenemissügavuste spektrite väärtused. Analüüsist selgus, et suurem osa mõõtmistest kuulus tüüp 7 alla (84%), tüüp 9 ja 5 osakaalud olid vastavalt 9% ja 7%. Tüüp 9 vastab Jerlov'i klassifikatsioonis kõige vähem läbipaistvamale rannikuvee tüübile ning tüüp 5 on antud kolmest klassist kõige selgeveelisem. Optiliste karakteristikute varieeruvus leitud kolme veetüübi vahel oli üsna suur. Tabelis 4 on toodud nende minimaalsed ja maksimaalsed väärtused. Kõige madalamad Chl *a* ja TSM-i kontsentratsioonid esinesid veetüüp 5-s ja kõige kõrgemad tüüp 9-s. Samuti olid nii Secchi, eufotilise kihi sügavuse ($Z_{1\%}$) ja peegeldumiskoeffitsiendi ($R(\text{PAR})$) väärtused vastavate veetüüpidega hästi kooskõlas. Tulemuste põhjal on näha, et uuritava rannikuvee tüüpilisemateks Chl *a* ja TSM vahemikeks on vastavalt 1.20-13.73 mg m⁻³ ja 0.80-4.53 mg L⁻¹.

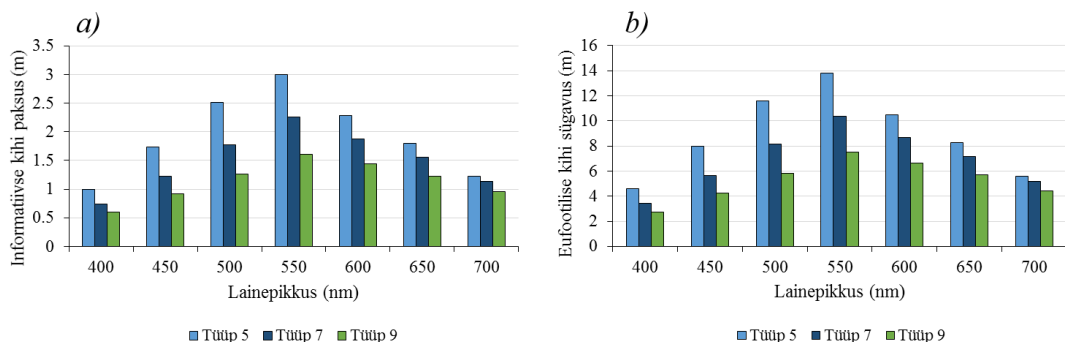


Joonis 17 Jerlov'i klassifikatsiooni tulemusena saadud nõrgenemisspektrid ($Z_k(\lambda)$) vastavalt leitud veetüübile.

Tabel 4 Leitud Jerlov veetüüpide karakteristikute minimaalsed ja maksimaalsed väärtused.

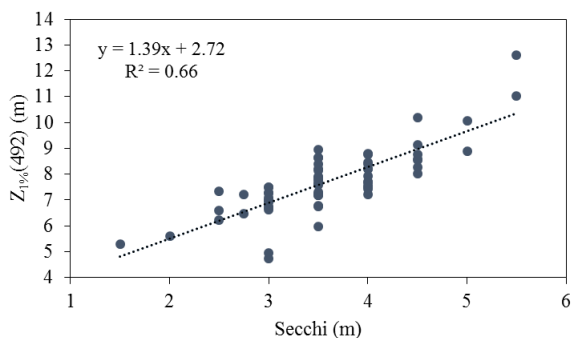
	$K_d(\text{PAR})$ (m^{-1})	$R(\text{PAR})$ (%)	$Z_{1\%}(\text{PAR})$ (m)	Secchi (m)	Chl <i>a</i> (mg m^{-3})	TSM (mg L^{-1})
Jerlov 5	0.49 – 0.57	0.63 – 1.62	8.94 – 10.71	4.50 – 5.50	0.36 – 3.86	0.80 – 1.73
Jerlov 7	0.60 – 0.79	1.10 – 3.03	6.35 – 8.39	2.50 – 5.00	1.20 – 13.73	0.80 – 4.53
Jerlov 9	0.78 – 1.06	1.14 – 8.84	4.62 – 6.34	1.50 – 3.50	2.41 – 15.06	1.73 – 6.70

Teadaolevalt pinnakihi paksus, millest optiline kaugseire on võimeline infot ammutama sõltub vee läbipaistvusest. Gordon ja McCluney (1975) näitasid teoreetiliselt, et ligikaudu 90% veest lahkuvast elektromagnetkiirgusest on lähtunud veesambast sügavusega, millega on defineeritud nõrgenemissügavus Z_k . Kaugseire rakenduste seisukohalt nimetatakse antud veekihti ka informatiivseks kihiks. Seega optiliste sensorite poolt mõõdetud informatsioon veekihi leiduvate OAA-de ja nende hulga kohta pärineb 90% veesambast sügavusega Z_k . Kasutades eelnevalt Jerlov'i klassifikatsiooniks arvutatud nõrgenemissügavuste $Z_k(\lambda)$ spektreid, on hinnatud informatiivse kihi paksust leitud kolme veetüübi ja PAR piirkonna seitsme lainepikkuse jaoks. Vastavad sügavused on esitatud Joonisel 18 osas (a). Tulemusena on näha, et informatiivse kihi paksus sõltub oluliselt nähtava valguse lainepikkusest. Uuritava rannikumere jaoks on kõige informatiivsem spektripiirkond lainepikkuste 500-600 nm vahemikus ehk teisisõnu nende lainepikkustega kiiri jõuab ka kõige enam veest tagasi atmosfääri. Seejuures erinevate veetüüpide lõikes võivad antud spektripiirkonnale vastavad väärtused erineda ligikaudu kahekordselt (tüüp 5 ja tüüp 9). Arvestades, et Loode-Eesti rannikuvesi klassifitseerus suuremas osas Jerlov'i veetüüp 7 alla, võib teha järelduse, et keskmiselt varieerub informatiivse pinnakihi sügavus sõltuvalt lainepikkusest 0.74–2.26 m.



Joonis 18 a) Informatiivse kihi paksus b) eufotilise kihi sügavus erinevate veetüüpide ja valguse lainepikkuste lõikes.

Võrdluseks on Joonisel 18 osas (b) toodud eufotilise kihi alumise piiri sügavus $Z_{1\%}$ ehk teisisõnu sügavus, kus on säilinud veel 1% veepinnale langevast kiirgusest. Antud sügavused määrati vastavalt valemile (4), seega selliselt arvutatud $Z_{1\%}$ sõltub vee optilistest omadustest, mis omakorda olenevad OAA-de kontsentratsioonist. Vastavalt veetüüp 7, kui antud uurimispiirkonnale kõige sagedasemalt esinenud klassi keskmistele väärtustele, varieerub $Z_{1\%}$ sõltuvalt lainepikkusest 3.41-10.38 m. Lisaks uuriti, millisel spektraalsel $Z_{1\%}$ väärtusel on seos Secchi näiduga suurim. Leiti korrelatsioon kõigi PAR piirkonna lainepikkuste ja mõõdetud Secchi sügavuse vahel. Analüüsist selgus, et korrelatsioon on suurim lainepikkuse 492 nm juures, võrreldavate suuruste omavaheline determinatsioonikoefitsient oli $R^2=0.66$ (Joonis 19). Antud lainepikkust kasutatakse ka standardsetes kaugseire algoritmides Secchi sügavuse hindamiseks.



Joonis 19 Korrelatsioon eufotilise kihi sügavuse lainepikkusel 492 nm ja Secchi näidu vahel.

5. ARUTELU

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida Loode-Eesti rannikuvee optilisi omadusi, täpsemalt nende vertikaalseid jaotusi seoses optiliselt aktiivsete ainetega (OAA: Chl *a* ja TSM) ning veesamba termohaliinse struktuuriga. Töö tulemusena selgus, et veesamba kihistatus reguleerib läbi OAA-de optiliste parameetrite muutlikkust. Segunenud veesamba korral oli OAA-de muutlikkus väike, mis kajastus hästi ka IOP-de vertikaalses jaotuses. Nimelt oli antud olukorras IOP-de vertikaalsed profiilid peaaegu ühtlased kogu segunenud veesamba ulatuses. Stratifikatsiooni olemasolul, kui veesamba ülemise ja alumise veekihi segunemine oli takistatud, oli ka OAA-de kontsentratsioonide muutlikkus sügavusega oluliselt kontrastsem. Tulenevalt sellest oli IOP-de varieeruvus võrreldes segunenud kihiga oluliselt suurem. Seega võib järeldada, et IOP-de vertikaalne muutlikkus annab teavet OAA-de varieeruvuse kohta veesambas.

Lisaks näitas IOP-de analüüs, et Loode-Eesti rannikumere pinnakihis domineerib peamiselt valguse hajumine, vaid üksikutel juhtudel oli neeldumine kogu nõrgenemises peamiseks teguriks. Seejuures tähelepanu väärib asjaolu, et sõltuvalt OAA-de vertikaalsest jaotusest erinevate termohaliinsete struktuuride korral, võis täheldada $b(440)/a(440)$ suhte väärtustes olulist varieerumist. Segunenud veesambas oli antud suhe tulenevalt OAA-de ühtlasemast jaotusest stabiilsem kui stratifikatsiooni esinemisel. Kusjuures veesamba kihistunud olekus muutus neeldumine sügavusega peaaegu alati domineerivamaks. Võrreldes saadud tulemusi Berthon ja Zibordi (2010) tööga, selgus, et Läänemere optilised omadused varieeruvad oluliselt sõltuvalt piirkondlikest iseärasustest. Vastupidiselt käesoleva töö tulemustele, leiti, et

Läänemere põhjaosas on neeldumine kogu nõrgenemises dominantsem ning seda kogu ülemise 25 m veesamba ulatuses. Antud asjaolu põhjuseks olid jõgedega veekogusse sisse toodud kõrged CDOMi kontsentratsioonid, vastav OAA oli ühtlasi peamine valguse nõrgenemist kujundav komponent. Seejuures Läänemere avaosas mõõdetud väärtused olid Loode-Eesti rannikumerele mõnevõrra sarnasemad. 25 m veesamba pinnakihi domineeris hajumine, mille intensiivsus sügavusega vähenes ning valdavaks sai neeldumine. Antud piirkonnas mõõdeti CDOMi osakaal kogu neeldumisse võrreldes Läänemere põhjaosaga rohkem kui 35% võrra väiksemaks.

Üks põhjusi, miks optiliste parameetrite vertikaalseid jaotusi Loode-Eesti rannikumeres võrreldi, oli eesmärk hinnata, milliseid muutusi võiks apvellingu sündmusega pinnale kerkiv vesi AOP-des kaasa tuua. Teadaolevalt on antud uurimispiirkond tuntud apvellingute sündmuste poolest (Uiboupin & Laanemets 2009). Stratifitseeritud veesambas pinnale tõusnud veemass erineb algsest veemassist nii temperatuuri, toitainete kui ka OAA-de poolest, millest viimase tõttu toimuvad muutused ka pinnakihi optilistes omadustes. Näiteks Uiboupin jt (2012) töös näidati, et apvellingu korral langevad madala klorofüllisaldusega alad kokku külma apvellingu veega kaetud piirkondadega, seejuures kõige madalamad kontsentratsioonid esinesid just apvellingu tsentris. Eelnev tõestab, et süvaveekerkega jõuab pinnakihti teistsuguste optiliste omadustega veemass. Käesolevas töös kasutatud mõõtmisandmete põhjal selgus, et olenevalt apvellingu intensiivsusest, võib vee peegeldumiskoeffitsientide $R(\text{PAR})$ väärtused kogu nähtava valguse spektripiirkonnas väheneda keskmiselt 72.6-89.3%, vastavalt, kas veemass on pärit 10 m või 20 m sügavuselt (Tabel 3). Antud teadmine on eelkõige oluline kaugseire rakenduste seisukohalt. Samalaadse suure $R(\lambda)$ kontrasti puhul on optilise sensori mõõdetav signaal võrreldes ümbritseva piirkonnaga oluliselt madalam, mille tõttu ei pruugi kaugseire algoritmid enam korrektselt toimida. Selle tulemusena võidakse OAA-de kontsentratsioone kas üle- või alahinnata. Muutused difuusse nõrgenemiskoeffitsiendi $K_d(\text{PAR})$ väärtustes oleksid hinnanguliselt 20.6-31.0%. Täpsemalt toimub antud ulatuses $K_d(\text{PAR})$ väärtuse vähenemine, mis tähendab, et apvellingu veega peaksid vee

valgustustingimused muutuma paremaks, mis omakorda omab mõju veealuste organismide elutegevusele.

Lisaks uuriti, millised lainepikkused kirjeldavad optiliste karakteristikute vahelisi seoseid kõige paremini. Chl *a* andis suurima korrelatsiooni punases spektripiirkonnas (673 nm), kus asus Chl *a* neeldumismaksimum. See kajastus hästi nii K_d kui ka R spektraalkõverate kujus. Seejuures, kui $K_d(673)$ ja Chl *a* vaheline korrelatsioon oli üsna hea, siis $R(673)$ ja Chl *a* vaheline korrelatsioon osutus väga väikeseks. Põhjuseks on ilmselt asjaolu, et Chl *a* kontsentratsiooni leidmiseks optiliselt keerukamates vetes, tuleb kasutada mitmel lainepikkusel põhinevaid seiseid ehk algoritme (Ligi jt 2017). TSM korrelatsioon oli nii $K_d(\lambda)$ kui ka $R(\lambda)$ -ga üle kogu uuritava spektripiirkonna (400-700 nm) nõrk. Siin võib põhjuseks olla asjaolu, et TSM-i hajutavad omadused ei pääse uuritavas spektripiirkonnas mõjule ehk teisisõnu teised OAA-d võivad TSM-i mõju varjutada. Üldiselt kasutatakse sellisel juhul 700 nm piirkonnast pikemaid lainepikkusi (Sipelgas jt 2004). Põhjusel, et käesolevas töös kasutati ainult PAR piirkonda, siis ei hakatud TSM-i mõju edasi analüüsima. Samuti uuriti $K_d(\lambda)$ seost mõõdetud Secchi ketta näiduga. Täpsemalt arutati $K_d(\lambda)$ põhjal eufotilise kihi sügavus $Z_{1\%}$ ning leiti kõige tugevam seos antud spektraalse väärtuse ja Secchi sügavuse vahel. Antud juhul korreleerus kõige paremini lainepikkus 492 nm. Saadud tulemus on väga heas kooskõlas teiste autorite poolt leituga. Nimelt kasutatakse antud spektripiirkonda nii standardsetes kui ka kohaspetsiifilistes kaugseire algoritmides Secchi sügavuse hindamiseks (Alikas jt. 2017; Kratzer jt. 2003; Kratzer jt. 2008).

Varasemad uuringud Läänemere erinevates regioonides on näidanud, et Z_k omab ruumiliselt märkimisväärset muutlikkust. Arst jt (1990) teostatud uuringus on leitud, et Läänemere avaosa kategoriseerub Z_k väärtuste alusel Jerlov'i veetüüpide II ja 3 vahele ning Liivi laht veetüüpide 7 ja 9 vahele. Seejuures Soome lahe lõunaosas, Kunda lahes, osutusid Z_k väärtused väiksemaks, kui kõige sogsamale Jerlov'i veetübile omased (tüüp 9). Käesoleva töö mõõtmisandmetest arvatud nõrgenemissügavuste Z_k spektrite põhjal selgus, et Loode-Eesti rannikuvesi kuulub peamiselt Jerlov'i veetüüp 7 alla (84%). Ühtlasi sai ära määratud piirid, millistes vahemikes optilised karakteristikud erinevate veetüüpide puhul varieeruvad (Tabel 4).

Kuna antud karakteristikuid jaotusid veetüübiti erinevalt, võib teha järelduse, et Jerlov'i klassifikatsioon suudab kirjeldada uuritava piirkonna OAA-de ja optiliste parameetrite muutlikkust. Seetõttu on seda sobilik kasutada nii kaugseire rakenduste kui ka veealuse valgusvälja hindamise seisukohalt. Algselt klassifitseeritud veemass võimaldab määrata uuritavale veemassile omased optiliste parameetrite varieeruvuse piirid, mis seeläbi aitab leida sobivaimat algoritmi OAA-de arvutamiseks.

Lähtuvalt töö tulemustest saab anda soovitusi edaspidiseks uurimiseks:

- 1) leitud klassifitseeritud veetüüpidele sobivate algoritmide leidmine (nii OAA-de kui ka erinevate optiliste parameetrite leidmiseks);
- 2) arvutatud optiliste parameetrite võrdlemine kaugseire andmetega.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö raames on uuritud Loode-Eesti rannikumere esmaseid ja tuletatud optilisi parameetreid. Töö tulemusena selgus, et veesamba kihistatus reguleerib läbi optiliselt aktiivsete ainete (OAA) jaotuse optiliste parameetrite muutlikkust. Segunenud veesamba korral oli OAA-de muutlikkus väike, antud olukorras olid optiliste parameetrite vertikaalsed profiilid peaaegu ühtlased kogu segunenud veesamba ulatuses. Stratifikatsiooni olemasolul olid OAA-de kontsentratsioonide muutlikkus sügavusega kontrastsem ning optiliste parameetrite varieeruvus võrreldes segunenud kihiga oluliselt suurem. Seejuures sõltuvalt OAA-de vertikaalsest jaotusest erinevate termohaliinsete struktuuride korral, võis täheldada $b(440)/a(440)$ suhte väärtustes olulist varieerumist. Segunenud veesambas oli antud suhe tulenevalt OAA-de ühtlasemast jaotusest stabiilsem kui stratifikatsiooni esinemisel. Kusjuures veesamba kihistunud olekus muutus neeldumine sügavusega peaaegu alati domineerivamaks.

Tuletatud optilised parameetrid difuusne nõrgenemiskoeffitsient $K_d(\lambda)$ ja peegeldumiskoeffitsient $R(\lambda)$ arvutati mõõdetud neeldumis- ($a(\lambda)$) ja hajumiskoeffitsiendi ($b(\lambda)$) väärtustest kolmel erineval sügavusel: pinnakihis, 10 m ja 20 m sügavusel. Antud parameetrite spektraalseid väärtusi võrreldi samadelt sügavustelt kogutud veeproovide (Chl a ja TSM) andmetega. Kõige suurem $K_d(\lambda)$ (40.8%) ja $R(\lambda)$ (72.6%) PAR piirkonna kahanemine leidis aset, kui vastavad Chl a ja TSM väärtuste muutused olid 80.1% ja 61.4%. Lineaarse regressiooni rakendamisel, selgus, et Chl a kirjeldab 42% $K_d(\text{PAR})$ muutlikkusest ja TSM 15% vastavast muutlikkusest. Kusjuures kõige tugevam Chl a ja $K_d(\lambda)$ seos oli lainepikkusel 673 nm ($R^2=0.68$). Seevastu TSM ja $K_d(\lambda)$ omavaheline seos lainepikkuste 400–700 nm vahemikus oli nõrk. Uurides nii $R(\text{PAR})$ keskmiste kui ka $R(\lambda)$ korrelatsioone OAA-

ga, olid tulemused üle kogu vaadeldava spektripiirkonna nõrgad. Viimane kinnitab asjaolu, et uuritava rannikuvee puhul on tegemist optiliselt keeruka veekoguga, kus nii Chl *a* kui ka TSM kontsentratsioonide leidmiseks peegeldumiskoeffitsientide väärtustest tuleb kasutada mitmel lainepikkusel põhinevaid seoseid.

Käesolevas töös teostatud arvutused näitavad, et apvellingu piirkondades mõõdetav kaugseire signaal võib oluliselt väheneda tänu teistsuguste optiliste omadustega süvavee kerkele pinnakihti. Tulenevalt apvellingu intensiivsusest, võib vee peegeldumiskoeffitsientide $R(\text{PAR})$ väärtused kogu nähtava valguse spektripiirkonnas väheneda keskmiselt 72.6–89.3%. Antud asjaolu tuleks arvestada kaugseire algoritmide arendamisel optiliselt keerukamate veekogude seire tarbeks.

Veemasside klassifitseerimine optiliselt keerukates veekogudes võimaldab määrata uuritavale veemassile omased optiliste parameetrite varieeruvuse piirid, mis seeläbi aitab leida sobivaimat algoritmi OAA-de arvutamiseks. Käesolevas töös kasutati Jerlov'i klassifikatsioonil põhinevat veetüüpide klassifitseerimist, kus Loode-Eesti rannikuveesi kategoriseeriti arvutatud nõrgenemissügavuste Z_k spektrite alusel erinevatesse rannikuvee tüüpide klassi. Analüüsi tulemusena selgus, et 84% kuulub veetüüp 7, 9% veetüüp 9 ja 7% veetüüp 5 alla. Uuritava rannikuvee tüüpilisemateks Chl *a* ja TSM vahemikeks olid vastavalt 1.20–13.73 mg m⁻³ ja 0.80–4.53 mg L⁻¹ ning $R(\text{PAR})$ ja $K_d(\text{PAR})$ vahemikeks vastavalt 1.10–3.03 % ja 0.60–0.79 m⁻¹.

Tänuavaldused

Autor avaldab tänu Liis Sipelgale käesoleva töö juhendamise ja väärtuslike kommentaaride eest. Ühtlasi soovin tänada Rivo Uiboupi ja Urmas Raudseppa asjakohaste nõuannete eest. Lisaks tänan Tallinna Tehnikaülikooli meresüsteemide instituudi töötajaid, kes olid seirereisidel mõõtmiste teostamisel abiks.

KASUTATUD KIRJANDUS

Alenius, P., Myrberg, K., Nekrasov, A. 1998. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review. *Boreal Environment Research*, 3, 97–125.

Alikas, K., Kratzer, S., Reinart, A., Kauer, T., Paavel, B. 2015. Robust remote sensing algorithms to derive diffuse attenuation coefficient for optically-complex waters. *Limnology and Oceanography Methods*, 13, 402-415.

Arst, H., Pozdnyakov, D., Rosenstein, A. 1990. Optiline kaugseire okeanoloogias. Tallinn : Valgus, (vene keeles).

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

Arthi, S., Shanmugam, P. 2016. Estimation of the spectral diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance in inland and coastal waters from hyperspectral remote sensing data: Validation with experimental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 49, 117-125.

Babin, M., Stramski, D., Ferrari, G. M., Claustre, H., Bricaud, A., Obolensky, G., Hoepffner, N. 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3211.

Baker, K. S., Smith, R. C. 1982. Bio-optical classification and model of natural waters. *Limnology and Oceanography*, 27, 500-509.

Berthon, J.-F., Zibordi, G. 2010. Optically black waters in the northern Baltic Sea. *Geophysical Research Letters*, 37.

Bowers, D. G., Harker, G. E. L., Smith, P. S. D., Tett, P. 2000. Optical properties of a region of freshwater influence (the Clyde Sea). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 50, 717-726.

- Bryant, D. A. 1981. The photoregulated expression of multiple phycocyanin species: general mechanism for control of phycocyanin synthesis in chromatically adapting cyanobacteria. *European Journal of Biochemistry*, 119, 425-429.
- Bukata, R.P., Jerome, J.H., Kondratyev, K.Y., Pozdnyakov, D.V. 1995. Optical Properties on Remote Sensing of Inland & Coastal Waters. CRC Press.
- Bukata, P. R. 2005. Satellite monitoring of inland and coastal water quality: retrospection, introspection, future direction. Taylor and Francis Group, 5-60.
- Dera, J. 1992. Marine physics. Elsevier.
- Dickey, T., Lewis, M., Chang, G. 2006. Optical oceanography: recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations. *Reviews of Geophysics*, 44(1).
- Dubinsky, Z., Berman, T. 1979. Seasonal changes in the spectral composition of downwelling irradiance in Lake Kinneret (Israel). *Limnology and Oceanography*, 24, 652-663.
- Elken, J. 2006. Läänemere veekonveier: kas „korsten“ paikneb Soome lahe suudmes? *Publicationes Geophysicales Universitatis Tartuensis*, 50, 74–84.
- Fleming-Lehtinen, V., Kauppila, P., Kaartokallio, H. 2010. How far are we from clear water? HELCOM eutrophication assessment. Water transparency.
- Gallegos, C.L. 2001. Calculating optical water quality targets to restore and protect submersed aquatic vegetation: overcoming problems in partitioning the diffuse attenuation coefficient for photosynthetically active region. *Estuaries*, 24, 381-397.
- Gordon, H. R., McCluney, W. R. 1975. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied Optics*, 14, 413-416.
- Harff, J., Björck, S., Hoth, P. 2011. The Baltic Sea Basin. Springer.
- Herlevi, A. 2002. A study of scattering, backscattering and a hyperspectral reflectance model for boreal waters. *Geophysica*. 38, 113-132.
- IOCCG. 2000. Remote sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Sathyendranath, S. (Ed.). Reports of the International OceanColour Coordinating Group, nr. 3 IOCCG.
- Jerlov, N. G. 1976. Marine Optics. Elsevier.

- Kaczmarek, S., Wozniak, B. 1995. The application of the optical classification of the waters in the Baltic Sea (Case 2 waters). *Oceanologia*, 37, 85-297.
- Kirk, J. T. O. 1981. Estimation of the scattering coefficient of natural waters using underwater irradiance measurements. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 32, 533-539.
- Kirk, J. T. O. 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge, University Press.
- Kostoglidis, A., Pattriaratchi, C. B., Hamilton, D. B. 2005. CDOM and its contribution to the underwater light climate of a shallow, microtidal estuary in south-western Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63, 469-477.
- Kovalczuk, P., Zablocka, M., Sagan, S., Kulinski, K. 2010. Fluorescence measured in situ as a proxy of CDOM absorption and DOC concentration in the Baltic Sea. *Oceanology*, 52, 431-471.
- Kratzer, S., Brockmann, C., Moore, G. 2008. Using MERIS full resolution data to monitor coastal waters – A case study from Himmerfjärden, a fjord-like bay in the north-western Baltic Sea. *Remote Sensing Environment*, 112, 2284-2300.
- Kratzer, S., Hakansson, B., Sahlin, C. 2003. Assessing Secchi and photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data. *Remote sensing for the environment*. 32, 577-585.
- Kratzer, S., Tett, P. 2009. Using bio-optics to investigate the extent of coastal waters: a Swedish case study. *Hydrobiologia*, 629, 69-186.
- Kutser, T., Hiire, M., Metsamaa, L., Vahtmäe, E., Paavel, B., Aps, R. 2008. Field measurements of spectral backscattering coefficient of the Baltic Sea and boreal lakes. *Boreal Environment Research*, 14, 305-312.
- Laanemets J., Pavelson J., Lips U., Kononen K. 2005. Downwelling related mesoscale motions at the entrance of the Gulf of Finland: observations and diagnosis. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 34, 15-36.
- 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, 11-26.

- Liblik, T., Lips, U. 2011. Characteristics and variability of the vertical thermohaline structure in the Gulf of Finland in summer. *Boreal Environment Research*, 16, 73-83.
- Ligi, M., Kutser, T., Kallio, K., Attila, J., Koponen, S., Paavel, B., Soomets, T., Reinart, A. 2017. Testing the performance of empirical remote sensing algorithms in the Baltic Sea waters with modelled and in situ reflectance data. *Oceanologia*, 59, 57–68.
- 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, 1836-1847.
- Lorenzen, C. J. 1967. Determination of chlorophyll and pheopigments; spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*. 12, 343-346.
- Lundberg, C. 2014. Water Quality of the Baltic Sea. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 4, 251-269.
- Mills, D. K., Rutgers van der Loerf, M., Laane, R. W. P. M., Rees, J. M. 2002. Continuous measurements of suspended matter. *Sea Technology*, 43, 5.
- Mobley, D. C., Stramski, D., Bissett, P. W., Boss, E. 2003. Is the Case 1, Case 2 Classification Still Useful? *Oceanography*, 17, 60-68.
- Morel, A., Prieur, L. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 22, 709-722.
- Myrberg, K., Andrejev, O. 2003. Main upwelling regions in the Baltic Sea: a statistical analysis based on three-dimensional modeling. *Boreal Environment Research*, 8, 97–112.
- Painting, S. J., Devlin, M. J., Malcolm, S. J., Mills, C., Mills, D. K., Parker, E. R., Terr, P., Wither, A., Burt., J., Jones, R., Winpenny, K. 2007. Assessing the impact of nutrient enrichment in estuaries: susceptibility to eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*.
- Pope, R. M., Fry, E. S. 1997. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. 2. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 37, 8710-8723.
- Preisendorfer, R. W. 1986. Secchi disk science; Visual optics of natural waters. *Limnology and Oceanography*, 31, 906-926.

- 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, 79-94.
- Roesler, C. S., Boss, E. 2003. Spectral beam attenuation coefficient retrieved from ocean color inversion. *Geophysical Research Letters*, 30, 1468.
- Sagan, S. 2008. The inherent water optical properties of Baltic waters. Diss. Monogr., 21, Inst. Oceanol. PAS, Spot, 244.
- Sipelgas, L., Arst, H., Raudsepp, U., Kõuts, T., Lindorfs, A. 2004. Optical properties of coastal waters of northwestern Estonia: in situ measurements. *Boreal Environment Research*, 9, 447-457.
- Smith, R. C., Baker, K. S. 1981. Optical properties of the clearest of natural waters. *Applied Optics*, 20, 177-184.
- 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.
- Uiboupin, R., Laanemets, J. 2009. Upwelling characteristics derived from satellite sea surface temperature data in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Boreal Environment Research*, 14, 297-304.
- Uiboupin, R., Laanemets, J., Sipelgas, L., Raag, L., Lips, I., Buhhalko, N. 2012. Monitoring the effect of upwelling on the distribution in the Gulf of Finland (Baltic Sea) using remote sensing and in situ data. *Oceanologia*, 54, 395-419.
- Wozniak, M., Craig, S. E., Kratzer, S., Wojtasiewicz, B., Darecki, M., Jones, C. T. 2017. A novel statistical approach for ocean colour estimation of inherent optical properties and cyanobacteria abundance in optically complex waters. *Remote Sensing*, 9, 343.

LISAD

Lisa 1. Jerlov'i veetüüpide nõrgenemissügavused $Z_k(\lambda)$

Tabel koostatud Jerlov (1976) andmete põhjal.

Veetüüp:	Lainepikkus (nm)						
	400	450	500	550	600	650	700
Puhtad ookeaniveed:							
I	35.7	52.6	37	15.9	4.25	2.78	1.79
IA	26.3	38.5	31.2	14.9	4.17	2.7	1.75
IB	19.6	27.8	23.8	13.9	4.08	2.67	1.72
II	10.4	14.7	14.3	11.2	3.85	2.5	1.64
III	5.4	7.41	8.7	8.33	3.39	2.25	1.52
Rannikuveed:							
1	1.96	4	5.88	8.33	3.33	2.22	1.54
3	1.28	2.56	3.45	5.26	3.03	2.17	1.41
5	0.91	1.78	2.78	3.33	2.5	1.85	1.25
7	0.62	1.12	1.72	2.17	2.08	1.59	1.09
9	0.53	0.62	1.01	1.59	1.67	1.32	0.91

Lisa 2. Vee pinnakihi temperatuuri ja soolsuse jaotused

	Temperatuur (°C)			Soolsus (PSU)			<i>N</i>
	Min	Max	Keskmine	Min	Max	Keskmine	
20.07.2015	15.9	18.1	17.0	6.0	6.3	6.1	10
30.-31.07.2015	16.3	17.7	17.1	6.0	6.8	6.4	20
12.08.2015	18.7	20.3	19.5	6.1	6.3	6.2	10
25.08.2015	17.0	18.7	17.7	5.4	5.6	5.5	4
26.-27.07.2016	17.0	21.8	19.8	5.1	6.1	5.5	21
03.-04.08.2016	18.5	19.8	19.2	5.4	6.0	5.6	21

Lisa 3. Klassifitseeritud veetüüpide nõrgenemissügavused $Z_k(\lambda)$

Käesolevas töös leitud Jerlov'i veetüüpide keskmised nõrgenemissügavuste spektrite väärtused koos standardhälvetega (lisaks toodud mõõdetud Secchi sügavus).

	Secchi (m)	Lainepikkus (nm)						
		400	450	500	550	600	650	700
Tüüp 5	5.1 (0.5)	1.00 (0.06)	1.73 (0.13)	2.52 (0.23)	3.00 (0.31)	2.28 (0.11)	1.80 (0.07)	1.22 (0.02)
Tüüp 7	3.6 (0.6)	0.74 (0.06)	1.22 (0.11)	1.77 (0.16)	2.26 (0.17)	1.88 (0.10)	1.56 (0.07)	1.13 (0.03)
Tüüp 9	2.8 (0.8)	0.60 (0.06)	0.92 (0.11)	1.27 (0.17)	1.61 (0.23)	1.44 (0.23)	1.23 (0.17)	0.96 (0.14)

SUMMARY

The purpose of current study was to examine the inherent and apparent optical properties in the northwestern coast of Estonia. Results revealed that the stratification of the water column regulates the variability of the optical parameters through distribution of the optically active substances (OAS). In the situation of mixed water column the OAS variability was small, in such situation vertical profiles of optical parameters did not change significantly through the entire mixed water column. In the stratified water column the concentrations of OAS changed rapidly and the vertical variability of the optical parameters were significantly higher compared to the mixed layer. According to vertical distribution of the OAS in the different thermohaline structures, the ratio of $b(440)/a(440)$ varied also. In the mixed water column the ratio was more stable than in the situation when stratification occurred. With increase of depth the absorption $a(\lambda)$ in the stratified water column became dominant in attenuation $c(\lambda)$.

Apparent optical properties diffuse attenuation coefficient $K_d(\lambda)$ and reflectance $R(\lambda)$ were calculated from the measured absorption coefficient $a(\lambda)$ and scattering coefficient $b(\lambda)$. The measurements were taken from three different depths: from surface layer, 10 m and 20 m. Spectral values of those parameters were compared with the water samples (Chl *a* and TSM) collected from the same depths. The largest decrease of $K_d(\lambda)$ (40.8%) and $R(\lambda)$ (72.6%) in PAR region occurred when Chl *a* and TSM concentrations decreased 80.1% and 61.4% respectively. The analysis of linear regression revealed that Chl *a* describes 42% of the $K_d(\text{PAR})$ distribution and TSM 15% of the $K_d(\text{PAR})$ distribution. According to the statistical analysis of spectral values of $K_d(\lambda)$ and concentration of Chl *a*, the best results achieved with the wavelength 673 nm ($R^2=0.68$). However, the correlation between TSM ja $K_d(\lambda)$ in the wavelength

range of 400–700 nm was weak. In addition the correlations between OAS and the mean values of $R(\text{PAR})$ and $R(\lambda)$ were weak over the observed spectral region. These results confirm the fact that the research area is optically complex water body, where the estimation of the Chl a and TSM concentrations needs to be based on at different wavelength ratios of reflectance $R(\lambda)$ data.

According to calculations of AOPs reveals that in the upwelling region the signal measured by the remote sensor is substantially weaker. According to the intensity of upwelling the reflectance values $R(\text{PAR})$ may decrease in average of 72.6–89.3%. Results obtained here should be considered when developing remote sensing algorithms for optically complex water bodies.

Initial water classification determines the variability limits of the optical characteristics for the examined water masses which allows to find the most appropriate algorithm for the calculation of the OAS. In this research Jerlov's classification of water types was used. Based on the spectral distribution of the calculated attenuation depth $Z_k(\lambda)$ the northwestern coastal water of Estonia was categorized into multiple coastal water type's class. The results showed that 84% belongs to water type 7, 9% to water type 9 and 7% to water type 5. For the water type 7 the respective Chl a and TSM ranges were 1.20–13.73 mg m⁻³ and 0.80–4.53 mg L⁻¹ and for $R(\text{PAR})$ and $K_d(\text{PAR})$ the ranges were respectively 1.10–3.03 % and 0.60–0.79 m⁻¹.