

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Hendrik Ristkok

**Valguse difuusse nõrgenemisteguri
hindamisvõimalused Läänemeres satelliidiandmete
abil**

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Füüsika, keemia ja materjaliteadus

Juhendajad:

Tuuli Soomets, PhD

Kaire Toming, PhD

Tartu 2024

Valguse difuusse nõrgenemisteguri hindamisvõimalused Läänemeres satelliidiandmete abil

Lühikokkuvõte. Läänemeri mõjutab suurel määral Läänemere-äärsete riikide loodust ja elanikkonda. Kuna Läänemere veevahetus on aeglane ja valgala tihedalt asustatud, on oluline uurida selles toimuvaid muutusi. Valguse difuusne nõrgenemistegur on kaugseirega mõõdetav suurus, mida saab kasutada mitmete veekogu omaduste kirjeldamiseks. Käesolevas töös rakendatakse Sentinel-3 missiooni satelliitide pardal asuvate OLCI sensori andmetele juba olemasolevaid algoritme, misjärel võrreldakse saadud tulemusi *in situ* tulemustega, et valideerida algoritmi paikapidavust. Kaheksast kasutatud algoritmist oli täpseim *Case-2 Regional CoastColour* algoritm R^2 väärtusega 0,64.

CERCS kood: T181 Kaugseire

Märksõnad: difuusne nõrgenemistegur, K_d , Sentinel-3, OLCI, kaugseire, Läänemeri, Case 2 veetüüp

Measuring the Diffuse Attenuation Coefficient in the Baltic Sea Using Remote Sensing Method

Abstract. The nature and inhabitants of the countries surrounding the Baltic Sea are greatly affected by the sea. As a semi-enclosed and densely populated body of water, it is essential to monitor the changes taking place within the Baltic Sea. The diffuse attenuation coefficient is a physical parameter that can be measured by remote sensing and used for describing the optical properties of a body of water. In this thesis, algorithms are applied to the measurements of OLCI sensors onboard of the Sentinel-3 mission satellites to compare them to results provided by *in situ* measurements from the Baltic Sea to assess each algorithm. As a result, the most accurate of the eight algorithms is the *Case-2 Regional CoastColour* algorithm with a R^2 value of 0.64.

CERCS code: T181 Remote sensing

Keywords: diffuse attenuation coefficient, K_d , Sentinel-3, OLCI, remote sensing, Baltic Sea, Case 2 Waters

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Kirjanduse ülevaade.....	5
1.1. Veealune valgusväli.....	5
1.2. Peamised veealuse valgusvälja iseloomustavad parameetrid	6
1.3. Kaugseire	6
1.4. K_d hindamine kaugseirega.....	8
2. Materjal ja meetodid	10
2.1. Läänemeri, rannikumere kirjeldus	10
2.2. <i>In situ</i> andmed.....	10
2.3. Kaugseire andmed.....	11
3. Tulemused ja arutelu	17
Kokkuvõte.....	21
Tänuavaldused	22
Kirjanduse loetelu	23
Lisad.....	25
Lisa 1. Satelliidil paikneva OLCI sensori mõõdetavad sagedusvahemikud.	25
Lihtlitsents	26

Sissejuhatus

Eesti Vabariigi territoriaalvete suuruseks on ligi 24000 km² suurune ala Läänemeres ning umbes 780 km pikkune rannajoon (MTÜ Eesti Entsüklopeedia, 2011). Läänemeres toimuv mõjutab otseselt Läänemere-äärsete riikide keskkonda, mistõttu on see keskkonnauuringute tähtis uurimisobjekt. Kuna tegemist on pool-kinnise merega, kuhu suubub arvukalt jõgesid ning mille ääres on arvukas inimasustus – Läänemere valgalal elab umbes 80 miljonit inimest (Baltic Marine Environment Protection Commission, 2021), siis on Läänemeri kliimamuutuste ja reostuse suhtes tundlik veekogu. Muutuste avastamiseks ja jälgimiseks Läänemeres, või mistahes muus suures veekogus, ainuüksi koht mõõtmistest ei piisa ning selleks on tarvis kasutada kaugseire meetodit. Erinevalt koht mõõtmistest on võimalik kaugseire abil monitoorida suuri maa-alasid ja järjepidevalt erinevatel ajahetkedel.

Kaugseire abil tuvastatud valguse difuusse nõrgenemisteguri (K_d) abil on võimalik kirjeldada veesisest valgusvälja, millega saab kirjeldada veekogu läbipaistvust, selles sisalduvat fütoplanktoni biomassi kogust või hoopis veekogu fotosünteesi võimaldavat sügavuspiiri. K_d väärtus võib samuti viidata veekvaliteedile, esmastootjate hulgale- või reostustasemele. Sellest tulenevalt on K_d väärtusega võimalik anda lisainfot või täita infolünki koht mõõtmistes. Enimkasutatud on kaugseirega hinnata K_d vaid ühel lainepikkusel – 490 nm ($K_d(490)$).

Käesoleva töö eesmärgiks on katsetada olemasolevate kaugseire $K_d(490)$ algoritme. Selleks kasutatakse Sentinel-3 satelliitide Level 1 ja Level 2 andmeid. Töös arvutatakse $K_d(490)$ väärtused kasutades Sentinel-3 standardprodukte, aga ka *Case-2 Regional CoastColour* (C2RCC) protsessori produkte, ning Mueller (2000) ja Alikase jt. (2015) välja töötatud algoritme ning neid võrreldakse Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudi *in situ* mõõtmiste kaudu arvutatud $K_d(490)$ väärtusega. Algoritmide rakendamisel kasutatakse *in situ* mõõtepunktide asukohale vastava satelliidipildi nii piksli üksikväärtust kui teda ümbritsevate pikslite (3x3 pikslit) keskmist väärtust. Töö tulemusena võrreldakse nelja erineva algoritmi kaudu arvutatud kaheksat produkti *in situ* tulemustega. Seejuures tuuakse välja kõikide produktide korrelatsioon ning selgitatakse välja täpsemaid tulemusi andev algoritm.

Võimalikult täpse algoritmi välja selgitamine tagab tulemuste võimalikult kõrge kvaliteedi, mis võimaldab tulemusi õigesti tõlgendada ja teha tulemuste põhjal õigeid järeldusi Läänemere optiliste omaduste või nende muutuste kohta.

1. Kirjanduse ülevaade

1.1. Veealune valgusväli

Merepinnani jõudnud päikese kiirgusest peegeldub üks osa koheselt tagasi atmosfääri ilma vette tungimata, aga ülejäänud osa murdub vette. Mida sügavamale vette päikese kiirgus tungib, seda enam kiirguse kiiritustihedus (E_d) väheneb. Kiiritustihedus väheneb sügavuse kasvades eelkõige valguse hajumise ja neeldumise tõttu. Kiirguse neeldumist vees mõjutavad puhta vee molekulid ja optiliselt aktiivsed ained. Hajumisse panustavad peamiselt optiliselt aktiivsed ained, sest puhas vesi ise on nõrk hajutaja (Arst, 2011).

Neeldumisteguriks a nimetatakse neeldunud valgusvoo ja veekihi paksuse suhet, mis koosneb kollase aine, fütoplanktoni, triptoni ja puhta vee neeldumisteguritest. Hajumisteguriks b nimetatakse hajunud valgusvoo ja veekihi paksuse suhet, mis koosneb puhta vee, fütoplanktoni ja triptoni hajumisteguritest, mida eraldi ei määratleta.

Nõrgenemisteguriks c nimetatakse vett iseloomustavate neeldumisteguri a ja hajumisteguri b summat (Arst, 2011). Nõrgenemistegur kirjeldab vees leviva valguse kiiritustiheduse vähenemist ühe pikkusühiku kohta.

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

Kuna neeldumist ja hajumist põhjustavad optiliselt aktiivsed ained, mis omakorda koosnevad mineraalsest ja orgaanilisest osadest, siis veekogud võivad üksteisest optiliste omaduste poolest suuresti erineda. Ookeane saab iseloomustada kui ühekomponendilist optilist süsteemi – lisaks veemolekulidele on optiliselt aktiivseks aineks fütoplankton. Rannikuvetes ja siseveekogudes lisandub fütoplanktonile veel kollane lahustunud orgaaniline aine (*Coloured Dissolved Organic Matter*, CDOM) ja heljum, mis koosneb liivast, tolmust, surnud organismidest jm. Seetõttu on rannikuveed ja siseveekogud optiliselt keerulisemad süsteemid kui avamered. Lisaks keerukusele on rannikuvete ja siseveekogude optilised omadused võrreldes ookeanidega kiiremad muutuma (Arst, 2011).

1.2. Peamised veealuse valgusvälja iseloomustavad parameetrid

Kiiritustiheduseks E nimetatakse pinnaihikule langevat valgusvoogu. Eristatakse eraldi allasuunatud (E_d , *downwelling*) ja ülessuunatud (E_u , *upwelling*) kiiritustihedust.

Kaugseires kasutatakse sageli kaugseire peegeldustegurit, R_{rs} , mis väljendab merepinnalt peegeldunud kirkuse ja merepinnale langenud kiiritustiheduste suhet. Parameeter on seda suurem, mida suurem on hõljumi kontsentratsioon vees. Lisaks mõjutab seda suurust kollase aine hulk.

Difuusne nõrgenemistegur K_d näitab kui palju valgusvoog väheneb eksponentsiaalselt ühikulises veekihis. See on veealuse valgusvälja üks kesksemaid parameetreid, mis kirjeldab vee suhtelist läbipaistvust ja vees toimuvaid biokeemilisi protsesse, see parameeter sõltub ka päikese kõrgusest ning on arvutatav spektraalselt erinevatel sügavustel veesambas (Kirk, 1994):

$$K_d(z, \lambda) = \frac{1}{z_2 - z_1} \cdot \ln \frac{E_d(z_1)}{E_d(z_2)} \quad (2)$$

kus $E_d(z)$ tähistab kiiritustihedust sügavusel z ja λ lainepikkust.

Eufotilise kihi paksuseks z_{eu} nimetatakse veesamba sügavuspiiri, kus valguse kiiritustihedus on suurem kui 1% vette sisenenud kiiritustihedusest (Kirk, 1994)

$$z_{eu} \approx \frac{4,6}{K_d} \quad (3)$$

Secchi ketta sügavuseks z_{SD} nimetatakse sügavuspiiri, mil 30-sentimeetrise läbimõõduga valge ketas kaotab nähtavuse. Secchi ketta sügavus on tuletatav ka läbi $K_d(490)$ kuid koefitsiendid A ja B võivad veekoguti erineda:

$$z_{SD} = A \cdot [K_d(490)]^B \quad (4)$$

1.3. Kaugseire

Piirkondlikud ja globaalse mastaabiga keskkonnauuringud vajavad andmete kogumiseks kaugseire meetodi kasutamist. Kaugseire on eriti suureks abiks just mereuuringute teostamiseks, sest mereuuringud hõlmavad enamasti suurt mereala ja muutumist ajas, milleks kontaktmõõtmiseid teostada on kulukas ja ebaotstarbekas. Nimelt saab kontaktmõõtmisega

täpsema tulemuse, mis kehtib väga kitsas ruumipunktis ühel kindlal ajahetkel (Kutser, 2011). Kaugseirega on võimalik mõõta suuri maa-alasid ja erinevatel aegadel, mis aitab pikaajalisi protsesse suhteliselt hõlpsalt vaadelda. Lisaks pakub kaugseire ligipääsu raskestipääsetavatesse kohtadesse – näiteks madalikele, isoleeritud järvedele ja rannikualale või mõõtmistele keset ookeani.

Kaugseiret saab jagada seirevahendi mõõtmiskõrguste järgi kolmeks. Madalal, kuni 600 meetri kõrgusel, saab kaugseiret teostada laeva pardal või lennuki madallennul. Keskmisel, kuni 20 kilomeetri kõrgusel, saab kaugseiret teostada lennukitega ning viimaks veelgi kõrgemal satelliitidega.

Antud töös on kasutatud passiivse kaugseire andmeid satelliitidelt. Passiivne kaugseire tähendab, et seirevahend mõõdab päikesekiirgust, mitte enda kiiratud tagasipeegeldunud kiirgust. Mõõdetav kiirgus levib Päikeselt läbi Maa atmosfääri merepinnani. Merepinnal murdub kiirgus vette ning lõpuks peegeldub vee sees tagasi merepinnani, murdub atmosfääri ning edasi satelliidil paiknevasse spektromeetrisse. Kaugseire erineb meremõõtmistest mitmeti – näiteks mõõdab kaugseire spektromeeter päikesekiirguse vees hajunud osa, atmosfääris hajunud osa, atmosfääris hajunud valguse peegeldust merepinnalt ja otseste veepinna peegeldumiste osa. Veesise valgusvälja kohta sisaldab infot ainult vees hajunud valgus ning ülejäänud kiirguskomponente nagu näiteks atmosfääris hajunud ja merepinnalt peegeldunud komponente käsitletakse mürana. Vees hajunud osa moodustab kogu mõõdetud kiirgusest väga väikse osa, 80-100% satelliidi spektromeetri mõõdetud kiirgusest on pärit atmosfäärist mitte veesisest valgusväljast. See probleem tekib keskmistel ja kõrgetel seirelendudel (k.a. satelliitidel), mille korral panustavad spektromeetri näitu ka atmosfäärist pärit hajunud kiirguskomponendid. Veemõõtmiste ja madallennu mõõtmistel atmosfäärimõjutusi ei teki.

Satelliidi mõõtetulemuse töödeldakse: kalibreeritakse mõõdetud kiirgus, viiakse vastavusse geograafiliste koordinaatidega ja eemaldatakse atmosfääri mõju (atmosfäärikorreksioon).

Käesolevas töös kasutatakse Euroopa Kosmoseagentuuri (*European Space Agency*, ESA) ja *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) satelliite Sentinel-3 missioonilt. Hetkel on missiooni raames 815 kilomeetri kõrgusele orbiidile saadetud kaks satelliiti – Sentinel-3A ja Sentinel-3B, mis mõõdavad merepinna topograafiat, mere ja maismaa temperatuuri, ookeanide ja maismaa pinna värvust, et toetada ilmaennustusi ja keskkonnaseiret. Satelliitide pardal on *Ocean and Land Colour Instrument* (OLCI) sensor,

millel on 5 kaamerat ja mõõteala laiuslega 1270 kilomeetrit. OLCI sensor mõõdab samaaegselt 21 erinevat sagedusvahemikku, mis asuvad 400 - 1020 nm vahemikus (Lisa 1). Sensor pakub tooteid kahe erineva lahutusvõimega – maksimaalse lahutusvõimega 300 m maapinnal või vähendatud lahutusvõimega 1200 m maapinnal. Sentinel-3 missioon algas 2016. aastal ning viimane missioonil osalev satelliit saadetakse orbiidile 2028. aastal. Satelliidimõõtmised on avalikult kõigile kättesaadavad peaaegu reaalajas. Läänemere laiuskraadidel toimuvad ülelendud iga päev. Ekvaatori lähistel laiuskraadidel suudavad praegused kaks satelliiti teha ülelende keskmiselt ülepäeviti (Euroopa Kosmoseagentuur, 2024).

1.4. K_d hindamine kaugseirega

K_d hindamiseks kaugseire abil on tarvis kaugseire andmeid, algoritmi, millega arvutatakse andmetest K_d ning *in situ* nõrgenemistegurit, millega kaugseire K_d võrrelda. Seda tehakse valideerimaks kasutatud algoritmi usaldusväärsust. Alikas jt. (2015) kasutasid optiliselt keeruka Läänemere rannikuvetes $K_d(490)$ väärtuse määramiseks kaugseire peegeldumiskoeffitsiente lainepikkustel 490 nm, 560 nm ja 709 nm. Lainepikkuste 490 nm ja 709 nm kaudu arvutatud $K_d(490)$ kirjeldasid paremini rannikuvete ja selgemate järvede nõrgenemistegureid ning suuremate lainepikkuste, 560 nm ja 709 nm kaudu arvutatud $K_d(490)$ kirjeldasid hästi just hägusaid järve vesi. Universaalsema algoritmi loomiseks kombineeriti algoritm, mis tagaks sujuva ülemineku ühelt algoritmilt teisele.

Lee jt. (2005) arvutasid $K_d(490)$ kasutades Ameerika Riikliku Aeronautika- ja Kosmosevalitsuse (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA) *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) ja *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) satelliitide andmeid, mille spektraalsed kanalid erinevad mõnevõrra ESA Sentinel-3 omadest. Rohkem kui pooled nende kasutatud empiirilise algoritmi $K_d(490)$ väärtustest olid veamääraga vähemalt 25%. Kui nad rakendasid semianalüütilist algoritmi, mis arvutas $K_d(490)$ väärtused läbi veesisese valgusvälja parameetrite ehk *inherent optical parameter* (IOP) kaudu, jäid 90% arvutatud nõrgenemisteguritest 25%-lise veamäär sisse. IOP-d on näiteks vee neeldumistegur ja hajumistegur. Satelliidiandmetest tuletati neeldumis- ja hajumistegurid, mille kaudu nõrgenemisteguri arvutamisel saavutati palju täpsemad tulemused. Selline algoritm ei nõua veetüüpide eristamist ning sobib nii ookeanide kui ka optiliselt keeruliste veekogude kirjeldamiseks.

Lisaks veekogu optiliste omaduste kirjeldamisele, kasutatakse K_d ka erinevates ökoloogilistes mudelites, näiteks fütoplanktoni primaarproduktiooni hindamise mudelites. Näiteks, Soomets jt. (2020a) kasutas kaugseirega hinnatud K_d Baltikumi järvedes primaarproduktiooni hindamiseks. Töös kasutati sarnaselt käesoleva tööga samuti Sentinel-3 OLCI andmeid ning rakendati Alikas jt. (2015) $K_d(490)$ algoritmi. See tähendab, et difuusse nõrgenemisteguriga on võimalik teostada seiret üleilmse süsinikuringe üle. Soomets jt. (2019) on kasutanud K_d produkte primaarproduktiooni hindamiseks kaugseirega ka alpijärvedes. Selles töös kasutati *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) 2002-2012 andmeid. .

2. Materjal ja meetodid

2.1. Läänemeri, rannikumere kirjeldus

Läänemeri on maailma suurim sisemaa riimveemeri ja seda on väga hästi uuritud. Eutrofeerumine on Läänemeres olnud ilmne juba aastakümneid, mis on tingitud lämmastiku ja fosfori varasematest suurtest ja endiselt ülemäärastest koormustest (HELCOM, 2018). Suur valgala, kus on palju inimtegevust, ja suhteliselt väike veekogu, mille veevahetus Atlandi ookeaniga on kitsa ja madala Skagerraki kaudu piiratud, muudab Läänemere toitainetega rikastumise ja eutrofeerumise suhtes väga tundlikuks (Andersen jt., 2017). Samuti on Läänemeri kurikuulus oma tsüanobakterite õitsemise poolest juba aastakümneid. Eesti mereala katab ligikaudu 10% Läänemere piirkonnast. See hõlmab osa Soome lahest, Liivi lahest ja Läänemere põhjaosa osa. Need alad kuuluvad ka Läänemere kõige eutrofeerunumate osade hulka (Andersen et al. 2017). Eesti alade veed on oligo- ja mesohaliinne (2,5–7 ppt) ja väiksemad Secchi ketta sügavused jäävad alla poole meetri (Pärnu laht 0,4 m) (Soomets jt., 2022).

Läänemeri on Case 2 tüüpi veekogu, mis tähendab, et Läänemerele on omane optiliselt keerukas veesisene valgusväli. Case 1 tüüpi veekogudel mõjutab veesisest valgusvälja peamiselt puhas vesi ja fütoplankton, mis on omane just avameredele ja ookeanidele, kuid Case 2 tüüpi veekogus on valguse hajumist ja neeldumist mõjutavateks teguriteks ka heljum ning CDOM (Morel ja Prieur, 1977). Läänemeres ja Eesti rannikuvetes mõjutab heljumi ja CDOM-i koguseid rannikud ja merre suubuvad jõed, mis kannavad endaga kaasa tolmu, setteid, orgaanilisi aineid. Seda tasub meeles pidada $K_d(490)$ arvutamiseks algoritmi valimisel, sest olenevalt algoritmist võib heljumi ja CDOM-iga arvestamine osutada määrava tähtsusega asjaoluks.

2.2. *In situ* andmed

Käesolevas töös on kasutatud *in situ* andmeid, mis pärinevad Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudis läbi viidud erinevatest teadusprojektidest. Mõõtmiste käigus uuriti veesisest valgusvälja erinevates Eesti rannikuvetes. Mõõdeti Secchi sügavusi ja valguse kiiritustihedust erinevatel lainepikkustel ja sügavustel $E_d(\lambda, z)$. *In situ* andmeid koguti aastatel 2018-2021 märtsi lõpust septembri lõpuni. Mõõtmisel lasti spektromeeter TriOS Ramses vette ning võeti kiiritustiheduse näidud erinevatel sügavustel. Uurimuses kasutati nähtavat sagedusvahemikku

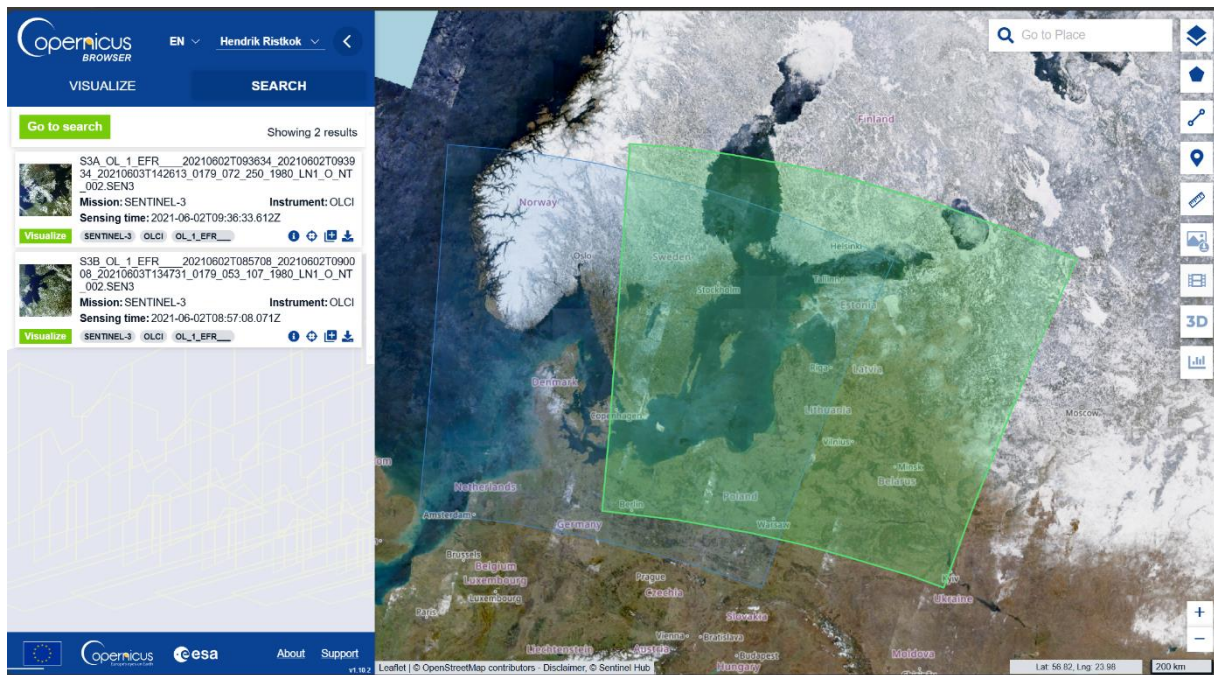
alates 400 nm kuni 700 nm sügavustel 0,5 m kuni 2 m. Igal sügavusel tehti kuni 7 kordusmõõtmist. Lisaks allasuunatud kiiritustihedusele, sügavusele ja lainepikkusele salvestati ka mõõtepunkti asukoht, mõõdu võtmise kuupäev ja kellaaeg, mis võimaldab andmeid võrrelda satelliidipiltidelt saadud andmetega. Kokku teostati mõõtmisi 127 mõõtepunktis, millest 37 mõõtepunkti aastal 2018, 35 mõõtepunkti aastal 2019, 51 mõõtepunkti aastal 2020 ja 4 mõõtepunkti aastal 2021. *In situ* andmed on mõõdetud vee all, mis tähendab, et mõõtmiste tulemusi ei seganud atmosfäär ega merepinnalt peegeldunud valgus. Seetõttu käsitletakse *in situ* andmeid lähteandmetena, mida hakatakse võrdlema teiste meetodite tulemustega.

Mõõteandmeid oli tarvis korrastada, et alustada nende töötlemist. *In situ* andmete töötlemisel kasutati kiiritustihedusi lainepikkusel 490 nm. Esmalt võeti ühe mõõtepunkti kiiritustihedused 0,5 m sügavusel. Kuna kordusmõõtmisi oli tehtud iga sügavuse kohta 7 (kusjuures kordusmõõtmiste $R^2 \geq 0,98$), seetõttu arvutati kordusmõõtmiste keskmine $K_d(490)$ sügavusel 0,5 m. Edasi arvutati samamoodi sügavuste 1,0 m, 1,5 m ja 2,0 m kohta. Tulemiks oli neljal sügavusel mõõdetud $E_d(490)$ näidud. Järgnevalt arvutati $K_d(490)$ valemi (2) järgi kasutades nelja sügavuse $E_d(490)$. Eelnevat protsessi korrati kõikide mõõtepunktidega, mille tulemusena tekkis *in situ* andmestik 127 mõõtepunkti ja igapähele arvutatud vastava mõõtepunkti $K_d(490)$ väärtusega.

2.3. Kaugseire andmed

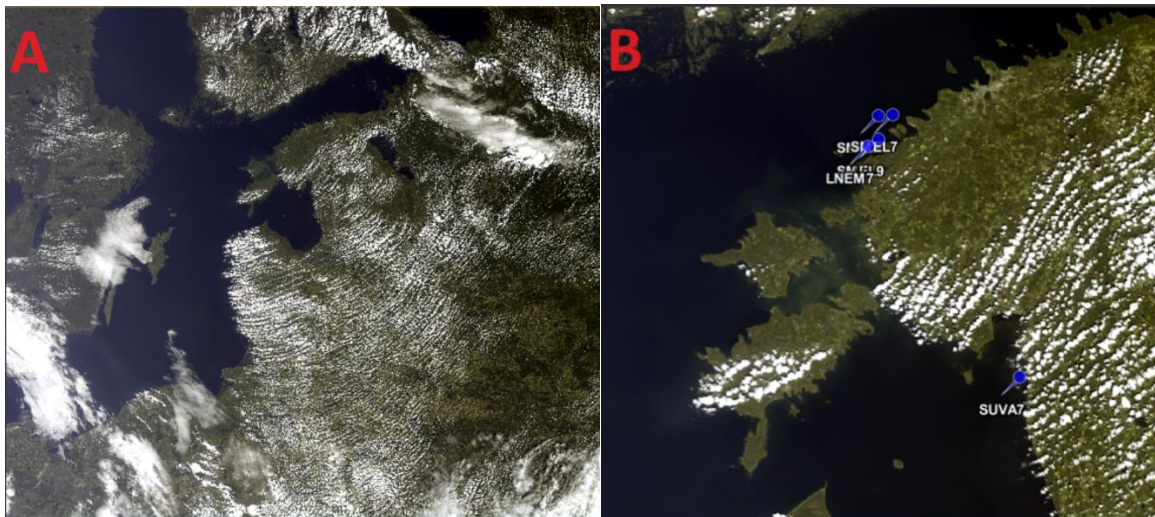
2.3.1. Satelliidiandmete kogumine ja töötlus

Kaugseire Sentinel-3 OLCI Level 1 andmed saadi Euroopa Komisjoni ja Euroopa Kosmoseagentuuri Copernicuse kaugseireprogrammi *Copernicus Data Space Ecosystem* andmebaasist (Euroopa Komisjon, Euroopa Kosmoseagentuur, 2024) Level 1 andmed on läbinud radiomeetrilise ja spektromeetrilise kalibratsiooni, lisaks on teostatud geokorrektioonid ja esmane pikslite kvaliteedi klassifitseerimine. OLCI Level 2 produktid laaditi alla rahvusvahelise organisatsiooni EUMETSAT-i *Earth Observation Portal* andmebaasist (EUMETSAT, 2024). Level 2 andmed on läbinud atmosfäärikorrektiooni ja hõlmavad endas erinevaid standardseid vee- ja atmosfääriprodukte. Andmebaasidele ligipääsuks tuleb end kasutajaks registreerida. Mainitud andmebaasidest valiti välja satelliidipildid, mis vastaksid *in situ* mõõtepunktide asukohale ja kuupäevale (Joonis 1). Vajalikud kuupäevad ja asukohad määratud, laaditi alla maksimaalse lahutusvõimega satelliidipildid. Allalaadimine kestis mitmeid tunde, sest ühe satelliidipildi failisuurus võis küündida kuni ühe gigabaidini.



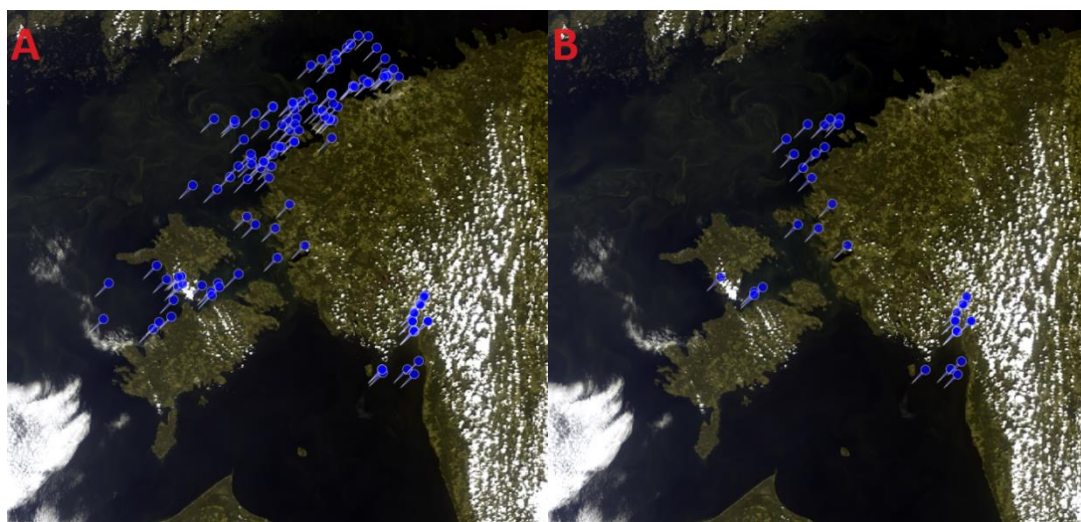
Joonis 1. Näide andmebaasist allalaaditud Sentinel-3 OLCI satelliidipildi suurusest. Pildil on kuvatud kahe satelliidipildi piirjooned, mis vastasid kasutaja asukoha ja kuupäeva päringutingimustele.

Failid eraldati tihendatud kaustadest ja avati *Sentinel Application Platform* (SNAP) andmetöötlusprogrammis, mis on mõeldud eelkõige Sentinel missioonide satelliidiantmete töötlemiseks. Programm on alla laaditav ESA kodulehelt (Euroopa Kosmoseagentuur, 2023). Pärast allalaadimist tehti *in situ* mõõtepunktide tekstifail ühel kuupäeval tehtud mõõtmispunktide asukohtade ja nimedega. Alla laaditi nii OLCI Level 1 kui ka Level 2 pildid. SNAP programmis avati ennist eraldatud satelliidipildi Level 1 fail, millest visualiseeriti nähtava valguse pilt (*RGB image*). Originaalsuuruses pildid kujutasid peaaegu kogu Läänemere piirkonda, mistõttu tasus enne edasist töötlust aja kokkuvõiu huvides säilitada ainult kasutatud mõõtepunktide lähipiirkonda. Kõik pildid lõigati fookuseerituna mõõtepunktide asukohta. Arvuti ressursi säästmiseks saanuks fookuseerida veel täpsemalt, näiteks kuvada ainult Pärnu lahe piirkonda kui kõnealuse kuupäeva *in situ* mõõtepunkte mujal ei leidu. Sellegipoolest otsustati piltide lõikamisel säilitada teatud standardne piirkond, et pildidel oleks näha kergesti tuvastatavaid tunnusjooni, näiteks Hiiumaa ja Saaremaa (Joonis 2). Mõned pildid lõigati suurema maa-alana, sest nendel päevadel oli kogu piirkond kaetud paksu pilvkattega ning maapealsed orientiirid puudusid täielikult, mistõttu valiti kindluse mõttes suurem ala.



Joonis 2. a) Sentinel-3 OLCI RGB pilt 02.06.2021 originaalsuuruses; b) lõikamise järel alles jäänud standardne piirkond, millele kanti pildi kuupäevale vastavad *in situ* mõõtepunktid.

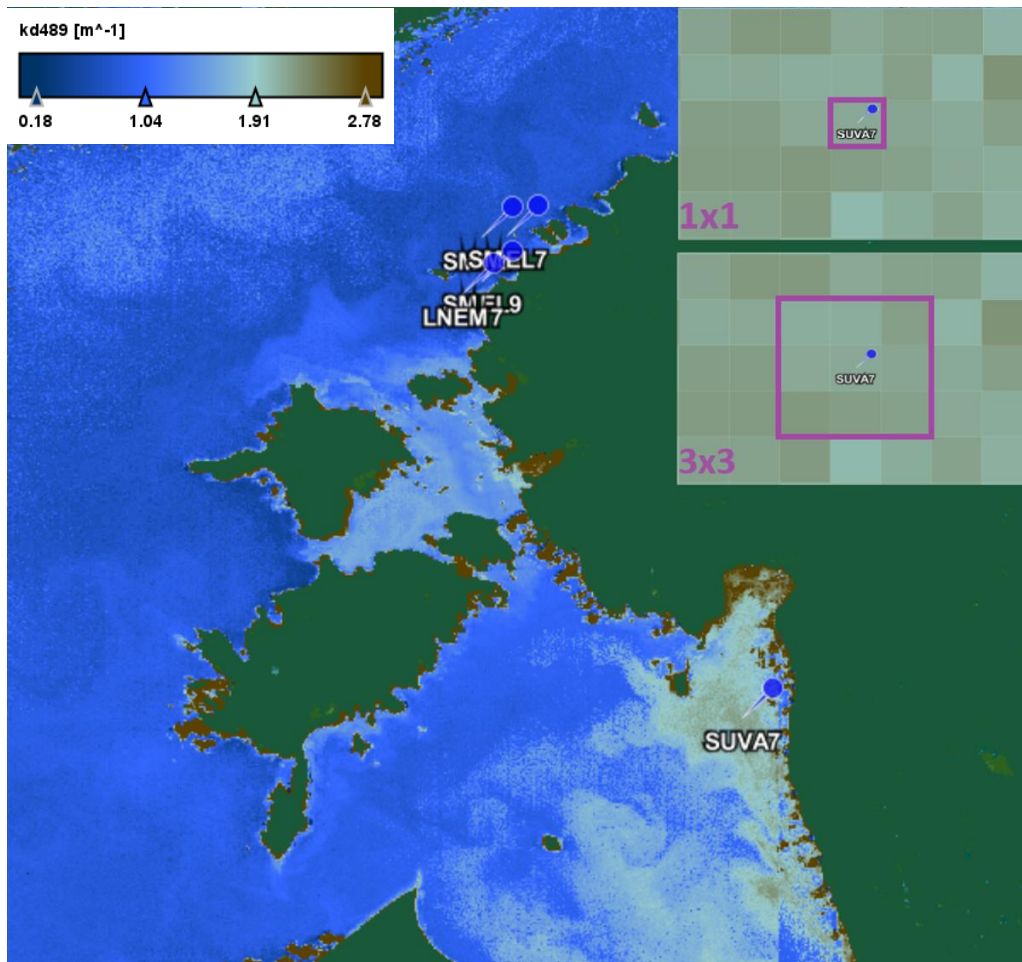
Seejärel imporditi vastava kuupäeva mõõtmispunktide tekstifail kaardikihina (Joonis 2b), et tuvastada võimalikud pilved mõõtepunktide kohal. Kui leiti, et satelliidipildil on *in situ* mõõtepunkti kohal pilv, siis pilti edasi ei töödeldud, sest pilvise piksliga ei saa satelliidipildi töötlemise tulemusel saadud $K_d(490)$ väärtust tõeseks pidada. Käidi läbi kõikide kuupäevade pildid ja *in situ* mõõtepunktid, mille tulemusena langes kaks kolmandikku mõõtepunktidest töötlemisest välja (Joonis 3a,b).



Joonis 3. a) Kõik 127 *in situ* mõõtepunkti; b) 36 pilvevaba punkti, mida kasutati edasises töös.

Järgmisena rakendati lõigatud piltidele *Case-2 Regional CoastColour* (C2RCC) atmosfäärikorrektsioon. C2RCC protsessor annab produktidena välja erinevaid atmosfääri ja

vee produkte, s.h. ka $K_d(490)$ produkti (produkt kd_489), aga ka atmosfääri suhtes korrigeeritud kaugseire peegeldusteguri $R_{rs}(\lambda)$. Kui C2RCC pildile sai kuvatud kõik vastava kuupäeva *in situ* mõõtepunktid, siis väljastati tekstifailina $K_d(490)$ väärtus 1x1 piksli asukohas ja ka mõõtepunkti 3x3 naaberpikslite keskmiste väärtusena (Joonis 4). Kasutati vaid väärtusi millel polnud pilvega soetud (pilv, pilve vari, pilve naaber) kvaliteedimärgiseid.



Joonis 4. Näide C2RCC töötusega saadud $K_d(490)$ produktist kuupäeval 02.06.21. Pildile on lisatud *in situ* mõõtepunktid ja suurendus SUVA7 punkti 1x1 pikslist ning 3x3 piirnevatest pikslitest.

Järgmisena avati SNAP-is OLCI Level 2 satelliidipildid, kuvati vastavate kuupäevade *in situ* mõõtepunktid ning eraldati samuti $K_d(490)$ väärtused (produkt KD490_M07) nii 1x1 piksli kui ka 3x3 pikslite mediaanväärtusena. Lisaks $K_d(490)$ väärtustele väljastati OLCI sagedusvahemikel mõõdetud $R_{rs}(\lambda)$. Kõikide mõõtepunktide kohta väljastatud $K_d(490)$, $K_d(490)$ vead ja $R_{rs}(\lambda)$ väärtused kanti Exceli tabelarvutusprogrammi edasiseks töötlemiseks. Sellega oli saadud neli erinevat $K_d(490)$ produkti: kaks C2RCC protsessoriga saadud $K_d(490)$

(edaspidi C2RCC 1x1 ja C2RCC 3x3) ja kaks Level 2 $K_d(490)$ standardprodukti (edaspidi KD490_M07 1x1 ja KD490_M07 3x3). C2RCC ja KD490_M07 produktidele anti kaasa ka veahinnangud, töös kasutati neid väärtuseid, mille veamäär oli väiksem kui 20%.

2.3.2. Rakendatud algoritmid

Lisaks eelnevalt mainitud produktidele arvatati lisaks kahe erineva algoritmi järgi veel $K_d(490)$ produkte. Esiteks kasutati Mueller (2000) algoritmi:

$$K_d(490) = 0,016 + 0,15645 \left(1,03 \cdot \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right)^{-1,5401} \quad (5)$$

kus R_{rs} on merepinnalt peegeldunud ja merepinnale langenud kiiritustiheduste suhe vastavatel lainepikkustel (Mueller, 2000). Kuigi valemis (5) on kasutatud R_{rs} lainepikkustel 490 nm ja 555 nm siis antud töös kasutati vastavalt lainepikkusi 490 nm ja 560 nm, sest OLCI sensoril puudub kanal lainepikkusel 555 nm. Mueller (2000) algoritmiga $K_d(490)$ arvutamiseks kasutati C2RCC $R_{rs}(\lambda)$ 1x1 ja 3x3 pikslite väärtusi, sellega saadi juurde kaks produkti: Mueller 1x1 ja Mueller 3x3.

Neljandaks kasutatati Alikas jt. (2015) loodud meetodit:

$$K_d(490) = \left[(1 - W) \cdot K_d(490)_{\frac{490}{709}} \right] + \left[W \cdot K_d(490)_{\frac{560}{709}} \right] \quad (6)$$

kus W tähistab nõrgenemisteguri osakaalu kujul:

$$W = 5,098 - 2,2,099 \left(\frac{R(560)}{R(709)} \right) \text{ kui } \left(\frac{R(560)}{R(709)} \right) = [1,519 ; 1,796] \quad (7)$$

$$K_d(490)_{\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}}} = 0,016 + A \cdot \left(\frac{R_{\lambda 1}}{R_{\lambda 2}} \right)^B, \quad (8)$$

kus $R_{\lambda 1}$ ja $R_{\lambda 2}$ tähistavad OLCI vahemike $R_{rs}(490)$, $R_{rs}(560)$ või $R_{rs}(709)$ väärtuseid ning ja B on lineaarse regressioonianalüüsi empiirilised koefitsiendid.

Alikas jt. (2015) algoritmi rakendati *Excel Macro-Enabled* programmiga, mille sisendiks olid C2RCC $R_{rs}(\lambda)$ kolmel lainepikkusel: $R_{rs}(490)$, $R_{rs}(560)$, $R_{rs}(709)$ ning väljundiks $K_d(490)$ väärtus. Kasutati jällegi nii 1x1 kui 3x3 pikslite väärtusi ja saadi veelgi kaks produkti: Alikas 1x1 ja Alikas 3x3.

Tulemusena tekkis andmebaas, kus oli nelja erineva algoritmiga arvatud $K_d(490)$ väärtused nii 1x1 kui 3x3 pikslite kaudu ehk kokku saadi 8 erinevat produkti. Kõigepealt võeti iga algoritmi 1x1 pikslite kaudu arvatud nõrgenemistegurid ja neid võrreldi vastavate *in situ* nõrgenemisteguritega. Algoritmide vastavust *in situ* tulemustele võrreldi determinatsioonikordaja R^2 abil, mis näitab kui tugev seos on algoritmil *in situ* andmetega. Seda arvutatakse valemi

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

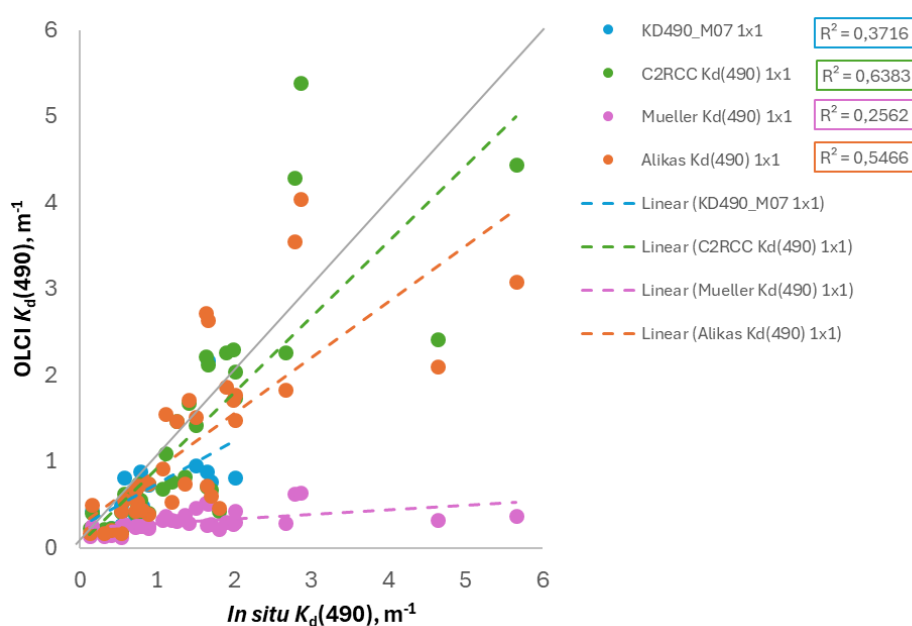
kus \hat{y} on teoreetiline väärtus, y_i on mõõdetud väärtus, \bar{y} on mõõdetud keskmise nõrgenemisteguri väärtus ja n on arvutamisel kasutatud mõõtepunktide arv. Samuti kasutati nõrgenemistegurite võrdlustulemuste hindamiseks statistikut p -väärtus, mis näitab kui tõenäoliselt saadi võrdlustulemused juhuslikult ilma, et algoritmi ja *in situ* tulemuste vahel oleks seos. Kuni p -väärtuse 0,05-ni kehtib olulisusnivoo, mis annab alust arvata, et korrelatsioon kaugseire ja *in situ* tulemuste vahel pole juhuslik. Veamäära kirjeldati keskmise absoluutse vea (*Mean Average Percentage Error* (MAPE) statistikuga:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (10)$$

kus n tähistab võrdluses kasutatud mõõtepunktide arvu, \hat{y} tähistab mõõtepunkti teoreetilist väärtust ja y_i tähistab arvatud väärtust. MAPE näitab keskmist veamäära ehk mida väiksem on tema väärtus, seda tõepärasemad on tema väärtused.

3. Tulemused ja arutelu

Kaugseire tulemuse võrreldakse merel mõõdetud nõrgenemisteguriga, et kontrollida satelliidiandmetele rakendatud algoritmide paikapidavust. Kui algoritmi rakendamisel saadud $K_d(490)$ väärtus on võrreldes meremõõtmise väärtustega rahuldava vastavusega, siis võib kaugseire meetodit mere monitoorimiseks sobilikuks pidada. Kaugseire meetoditel arvatud $K_d(490)$ väärtused kanti ühele graafikule koos *in situ* $K_d(490)$ väärtustega, et võrrelda kaugseire tulemuste vastavust kohtmõõtmiste tulemustega. Algoritmide 1x1 piksli meetodite tulemused on visualiseeritud joonisel 5 ja statistikumid on näidatud tabelis 1.



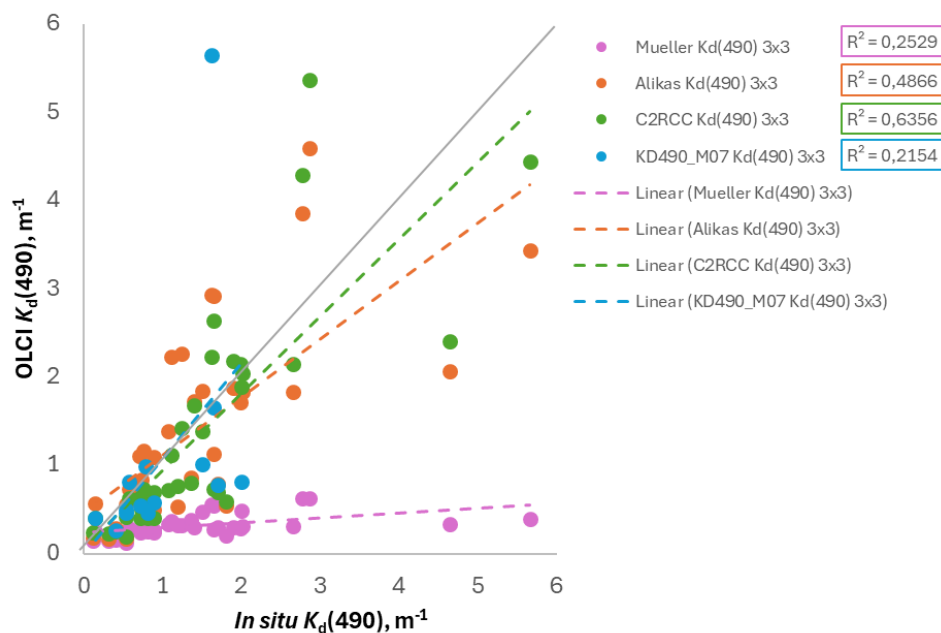
Joonis 5. Erinevate meetodite kaudu arvatud $K_d(490)$ võrdlemine *in situ* tulemustega. Kasutatud on satelliidiandmete 1x1 piksli väärtuseid.

Tabel 1. Erinevate 1x1 piksli $K_d(490)$ produktide determinatsioonikordaja (R^2), protsentuaalne keskmine absoluutne viga (MAPE), statistiline olulisus (p-väärtus) ja andmeanalüüsis kasutatud juhtumite arv (n).

PRODUKT	R^2	MAPE (%)	P-VÄÄRTUS	n
C2RCC 1X1	0,64	37,58	5,20E-09	36
ALIKAS 1X1	0,55	40,72	2,60E-07	36
KD490_M07 1X1	0,37	46,07	1,58E-02	15
MUELLER 1X1	0,26	71,57	1,64E-03	36

Nii joonis 5 kui tabel 1 viitavad sellele, et parim vastavus *in situ* andmetega on C2RCC 1x1 meetodil, mille $R^2 = 0,638$ on 1x1 piksli meetoditest kõrgeim. Samuti on MAPE ja p -väärtus teiste meetodite omadest usaldusväärsem (vastavalt 37,58% ja $5,20E-09$). Meetodite võrdlemisel oli C2RCC 1x1, Alikas 1x1 ja Mueller 1x1 valimiks 36 mõõtepunkti ning KD490_M07 1x1 valimiks oli 15 punkti. KD490_M07 1x1 meetodil oli teistest väiksem valim, sest Level 2 töötuse käigus polnud usaldusväärse $K_d(490)$ arvutamiseks piisavalt andmeid või oli arvutatud $K_d(490)$ väärtuste veamäär üle 20 protsenti, mistõttu jäeti mõõtepunkt võrdlemisest välja.

3x3 piksli keskmiste väärtustega $K_d(490)$ produktide võrdlus *in situ* väärtusega on näidatud joonisel 6 ja vastavad statistikumid on toodud tabelis 2. Ka 3x3 piksli tulemuste seas on täpsemaks algoritmiks C2RCC, mille $R^2 = 0,636$, MAPE = 37,8% ja p -väärtus = $5,91E-09$.



Joonis 6. Erinevate meetodite kaudu arvutatud $K_d(490)$ võrdlemine *in situ* tulemustega. Kasutatud on satelliidiandmete 3x3 pikslite mediaanväärtust.

Tabel 2. Erinevate 3x3 piksli $K_d(490)$ produktide determinatsioonikordaja (R^2), protsentuaalne keskmine absoluutne viga (MAPE), statistiline olulisus (p -väärtus) ja andmeanalüüsis kasutatud juhtumite arv (n).

PRODUKT	R^2	MAPE (%)	p -VÄÄRTUS	n
C2RCC 3X3	0,64	37,80	5,91E-09	36
ALIKAS 3X3	0,49	47,20	2,27E-06	36
KD490_M07 3X3	0,22	56,52	9,46E-02	14
MUELLER 3X3	0,25	71,33	2,27E-06	36

Kõik tulemused näitavad, et kõigi 8 produkti seast andis kõige täpsemad tulemusi C2RCC 1x1, mis annab kaugseire mõistes väga häid tulemusi võrreldes *in situ* nõrgenemisteguritega. Paremusest järgmine on C2RCC 3x3, mis on sisuliselt sama täpne. Ka Alikase algoritmiga arvatud 1x1 ja 3x3 $K_d(490)$ väärtused andsid *in situ* väärtustega võrreldes häid tulemusi. C2RCC ja Alikase algoritmide sobivus kaugseire meetodil $K_d(490)$ väärtuse arvutamiseks oli ootuspärane. Ebatäpsemad tulemusi andsid Muelleri ja KD490_M07 algoritmid, mille R^2 väärtused jäid vahemikku 0,22-0,37, mistõttu ei peeta neid piisavalt täpseks. Tulemustest selgus, et eranditult kõikide algoritmide korral andsid täpsemad tulemusi nende 1x1 meetodid, kuid Muelleri ja C2RCC algoritmide 1x1 ning 3x3 meetodite väärtused erinesid üksteisest minimaalselt. Alikase ja KD490_M07 algoritmide puhul erinesid 1x1 ja 3x3 meetodite väärtused üksteisest märgatavalt. Järeldustena välistatakse Muelleri ja KD490_M07 algoritmide sobilikkus antud mõõtepunktides $K_d(490)$ arvutamiseks.

Ka Soomets jt. (2019; 2020b) on leidnud, et parimaid $K_d(490)$ tulemusi annab C2RCC protsessor. Näiteks, leidis Soomets jt. (2020b), et parimaid tulemusi hindamaks Secchi ketta sügavust selgetes, mõõdukalt hägustes ja hägustes vetes annab C2RCC $K_d(490)$ produkt, R^2 varieerus 0.48-0.80 olenevalt optilisest veetüübist, mis langeb kokku hästi käesoleva töö tulemustega.

Lee jt. (2005) järeldasid, et Mueller (2000) algoritm töötab üsna hästi vetes, kus $K_d(490)$ väärtus jääb alla $0,2 \text{ m}^{-1}$ ehk pigem Case-1 veekogude seireks. Veekogudes, kus $K_d(490) > 0,2 \text{ m}^{-1}$ alahindab algoritm $K_d(490)$ väärtuseid märkimisväärsel määral. Käesoleva töö *in situ* $K_d(490)$ väärtused varieerusid $0,09\text{-}5,66 \text{ m}^{-1}$ (keskmine oli 1.07 m^{-1} , mediaan 0.75 m^{-1}), mistõttu algoritm alahindas ka tulemusi Läänemeres (Joonis 5-6).

Alikas jt. (2015) algoritmi välja töötamise aluseks olid Pärnu lahe *in situ* andmetele ($R^2 = 0,92$) ning on mõeldud, vastupidiselt Mulleri algoritmile, rannikuvetele ja järvedele, kus $K_d(490) < 2,0 \text{ m}^{-1}$. Käesoleva töö tulemustest (Joonis 5-6) on näha, et Alikas jt. (2015) algoritm annab väärtustel $K_d(490) < 2,0 \text{ m}^{-1}$ väga täpseid tulemusi, kuid väärtustel $> 2 \text{ m}^{-1}$ on tulemused suurema veaga. Seda võib põhjustada asjaolu, et algoritmi arvutuskäik suurematel $K_d(490)$ väärtustel erineb arvutuskäigust, mis kehtib $K_d(490) < 2,0 \text{ m}^{-1}$ jaoks (valemid 6-8).

Soomets jt. (2020a) leidis, et kaugseire 300-m lahutusvõime on sobilik ainult üle ruutkilomeetrise pindalaga järvede seireks. Ka rannikualadel võib vee koostis sõltuvalt asukohast rohkelt varieeruda, mistõttu tasuks ka rannikuvesi uurida kõrgema lahutusvõimega sensoriga. Ka käesoleva töö tulemustest selgus, et 3x3 pikslite mediaanväärtuse kasutamine andis ebatäpsemaid tulemusi kui täpselt 1x1 piksli väärtused. See võib tuleneda sellest, et *in situ* $K_d(490)$ väärtus on arvatud ühe kindla asukohapunkti järgi, kuid 3x3 piksli väärtuse kaudu arvatud $K_d(490)$ väärtus arvutati 0.8 km² suuruse ala keskmise R_{rs} põhjal.

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli katsetada olemasolevate kaugseire $K_d(490)$ algoritmide täpsust Läänemeres. Täpsuse määramiseks rakendati algoritme Sentinel-3 OLCI satelliidipiltidele, mille tulemusi võrreldi Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudi 2018-2021 *in situ* andmetest arvutatud $K_d(490)$ väärtustega. Kuigi mõõtepunkte oli 127, siis pilvevabu vastuseid oli satelliidiandmetest vaid 36-l korral.

Töö tulemusena selgitati välja *in situ* andmetega võrreldes kõige täpsemini $K_d(490)$ arvatav algoritm, milleks oli C2RCC 1x1 ($R^2 = 0,638$). Väga sarnase tulemuse andis algoritm C2RCC 3x3 ($R^2 = 0,636$). Ka Alikas jt. (2015) algoritm andis häid tulemusi ($R^2 = 0,55$ ja $R^2 = 0,49$, vastavalt 1x1 ja 3x3 pikslitele). Ülejäänud algoritmid ei andnud võrdluses rahuldavaid tulemusi ($R^2 < 0,3$). Iga algoritmi puhul kehtis tõdemus, et algoritmi 1x1 produkt andis paremaid tulemusi kui algoritmi 3x3 produkt. C2RCC, Alikas jt (2015) ja Mueller (2000) puhul olid algoritmi 1x1 ja 3x3 produkti täpsused võrdlemisi sarnased, kuid standartprodukt KD490_M07 algoritmi korral erinesid produktid üksteisest suuresti – peaaegu kahekordselt. Tartu Ülikooli Eesti mereinstituudi kogutud *in situ* andmeid võis lugeda täpseteks, sest nendest *in situ* $K_d(490)$ väärtuseid arvutades oli kordusmõõtmiste punktidest funktsiooni moodustamise determinatsioonikordajaväärtus sageli 0,98 või suurem. Lisaks polnud *in situ* mõõtmistel segavaks asjaoluks atmosfäär. Töö põhjal võib öelda, et kaugseire abil Eesti rannikumere difuusset nõrgenemistegurit saab edukalt määrata nii C2RCC ja ka Alikas jt. (2015) algoritmidega (nii 1x1 kui 3x3 meetodikaga). Mueller (2000) ja standardprodukti algoritmid selleks piisavalt täpseid tulemusi ei anna.

Tänuavaldused

Töö autor soovib tänada juhendajat Tuuli Soometsa huvitava teema pakkumise ja järjekindla juhendamise ja oskuse eest keerulisi nüansse arusaadavalt selgitada.

Töö poleks saanud valmida ilma autori ülemuse Erkita ja ilmselt poleks valminud ilma Anette motivatsioonisõnadeta.

Kirjanduse loetelu

Alikas, K., , Kratzer, S., Reinart, A., Kauer, T. & Paavel, B. (2015). Robust remote sensing algorithms to derive the diffuse attenuation coefficient for lakes and coastal waters. *Limnol. Oceanogr.Methods*, 13, 402-415.

Andersen, J.H.; Carstensen, J.; Conley, D.J.; Dromph, K.; Fleming-Lehtinen, V.; Gustafsson, B.G.; Josefson, A.B.; Norkko, A.; Villnäs, A.; Murray, C. (2017). Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. *Biol. Rev.*, 92, 135–149.

Baltic Marine Environment Protection Commission. (2021). *Background information on the Baltic Sea catchment area for the Seventh Baltic Sea Pollution load compilation (PLC-7)*. Helsinki: Helsinki Commission - HELCOM.

EUMETSAT. (22. jaanuar 2024. a.). *Data Store*. Allikas: Data Services: <https://data.eumetsat.int/search?query=>

Euroopa Komisjon, Euroopa Kosmoseagentuur. (22. jaanuar 2024. a.). Allikas: Copernicus Data Space Ecosystem: <https://dataspace.copernicus.eu/>

Euroopa Kosmoseagentuur. (9. detsember 2023. a.). *Download: SNAP*. Allikas: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

Euroopa Kosmoseagentuur. (2024). *SentiWiki / Sentinel-3 / OLCI coverage*. Allikas: Copernicuse veebileht: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-mission>

HELCOM (2018). State of the Baltic Sea—Second HELCOM holistic assessment 2011–2016. *Baltic Sea Envir. Proc.*; 155, 4–7.

Kirk, J. T. (1994). *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge University Press.

Lee, Z.-P., Darecki, M., Carder, K. L., Davis, C. O., Stramski, D., & Rhea, W. J. (2005). Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods. *J. Geophys. Res.*, . 110, C02017.

Morel, A., & Louis, P. (1977). Analysis of variation in ocean colour. *Limnol. Oceanogr.*, 22, 709-722.

MTÜ Eesti Entsüklopeedia. (2011). Allikas: Eesti Entsüklopeedia: http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_piir

Mueller, J. L. (2000). SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, $K(490)$, using water-leaving radiances at 490 and 555 nm. rmt: *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, part 3 (24-27)*. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center.

Soomets, T., Kutser, T., Wüest, A., & Bouffard, D. (2019). Spatial and temporal changes of primary production in a deep peri-alpine lake. *Inland Waters*, *9*, 49-60.

Soomets, T., Uudeberg, K., Kangro, K., Jakovels, D., Brauns, A., Toming, K., Kutser, T. (2020a). Spatio-Temporal Variability of Phytoplankton Primary Production in Baltic Lakes Using Sentinel-3 OLCI Data. *Rem. Sen.*, *12*, 2415.

Soomets, T., Uudeberg, K., Jakovels, D., Brauns, A., Zagars, M., Kutser, T. (2020b). Validation and Comparison of Water Quality Products in Baltic Lakes Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI Data *Sensors*, *20*, 742.

Soomets, T., Toming, K., Jefimova, J., Jaanus, A., Põllumäe, A., & Kutser Tiit. (2022). Deriving Nutrient Concentrations from Sentinel-3 OLCI Data in North-Eastern Baltic Sea. *Rem. Sen.*, *14*, 1487.

Lisad

Lisa 1. Satelliidil paikneva OLCI sensori mõõdetavad sagedusvahemikud.

Vahemik	Oa01	Oa02	Oa03	Oa04	Oa05	Oa06	Oa07	Oa08	Oa09	Oa10	Oa11
λ keskmine (nm)	400	413	443	490	510	560	620	665	674	681	709
Ribalaius (nm)	15	10	10	10	10	10	10	10	7.5	7.5	10
Vahemik	Oa12	Oa13	Oa14	Oa15	Oa16	Oa17	Oa18	Oa19	Oa20	Oa21	
λ keskmine (nm)	754	761	764	768	779	865	885	900	940	1020	
Ribalaius (nm)	7.5	2.5	3.75	2.5	15	20	10	10	20	40	

Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, HENDRIK RISTKOK,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Valguse difuusse nõrgenemisteguri hindamisvõimalused Läänemeres satelliidiandmete abil“, mille juhendajad on Tuuli Soomets ja Kaire Toming, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Hendrik Ristkok

29.05.2024