

Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut

Läänemere klorofüll- α algoritm

(Deliverable 2.2.1. Improved chlorophyll- α algorithm)

Teostatud projekti "Eesti mereala keskkonna ja loodusväärtuste hindamise ja seire innovaatilised lahendused" raames

Version 7, 21.01.2021

Leping: RITA1/02-60-01

Vastutav täitja: Georg Martin

Aruande koostajad: Tuuli Soomets, Tiit Kutser

Tallinn 2020



RITA

mereRITA

The logo for mereRITA features a stylized blue wave icon above the text "mereRITA".

Aruande versioonide info

Versiooni number	Kuupäev	Info
1	31.12.20	Esimene versioon. T. Soomets
2	04.01.21	Täiendatud versioon. T. Kutser
3	05.01.21	Täiendatud versioon. T. Soomets
4	06.01.21	Täiendatud versioon, T. Kutser
5	07.01.21	Esimene tellijale esitatud versioon
6	21.01.21	Täiendatud versioon. T. Soomets
7	21.01.21	Täiendatud versioon, T. Kutser

Sisukord

Sisukord	3
Executive Summary	4
1. Sissejuhatus	5
2. Materjal ja metoodika	8
2.1. Uuringualad	8
2.2. <i>In-situ</i> andmed.....	8
2.3. Optilise kaugseire andmed	9
2.4. Klorofüll- <i>a</i> algoritmid	9
3. Tulemused	11
3.1. Satelliidipildid	11
3.2. Peegeldusteguri spektri analüüs	12
3.3. Klorofüll- <i>a</i>	13
4. Kokkuvõte	17
5. Soovitused seireprogrammi täiendamiseks	17
Kasutatud allikad	19

Executive Summary

The aim of this study was to develop an algorithm that allows more accurate retrieval of chlorophyll-a concentration in the Baltic Sea from Sentinel-3 OLCI imagery than the current pan-European services (CMEMS and EUMETSAT).

In the current study two field work campaigns were carried out in 2019-2020 (total three days of sampling). There was no funding to organise field campaigns and therefore this work depended fully on availability of space on ship to carry out necessary measurements. Unfortunately, there were no same day Sentinel-3 OLCI match ups for the fieldwork dates (i.e. all fieldwork days were cloudy). Only 3 cloud-free satellite images from the day before or after the *in-situ* samplings were available with 21 unique points. This is too little to develop a Baltic Sea chlorophyll-a algorithm and strictly speaking this data cannot be used for that purpose due to algorithm development protocols that do not allow more than three-hour difference between the fieldwork and satellite overpass. On the other hand, reflectance measurements were carried out on board the research vessel. This data was used to test several empirical algorithms for chlorophyll-a retrieval as well as to evaluate the performance of atmospheric correction of Sentinel-3 data. Although the latter analysis suffers the same problem that the reflectance data and satellite data was collected one day apart.

The results of this task show that there is need in a specialized project where collecting the bio-optical data for remote sensing algorithm development and validation is the prime aim of the work. Baltic Sea has three different “seasons” – spring bloom, clear water period, and summer bloom of cyanobacteria. No atmospheric correction method works reliably in the Baltic Sea and the optical complexity of waters is very high. Consequently, the new project must focus on collecting hundreds of *in-situ* match-ups (simultaneous *in-situ* and satellite data) from the three main seasons and different locations (e.g. river inflows with large amount of coloured dissolved organic matter). Only proper validation of atmospheric correction methods and chlorophyll-a retrieval methods will allow to achieve the situation where remote sensing products can be trusted in the Baltic Sea monitoring.

This study was financially supported by the European Regional Development Fund within National Programme for Addressing Socio Economic Challenges through R&D (RITA).

1. Sissejuhatus

Fütoplanktoni biomass on üks põhilisi veekogude eutrofeerumise indikaatoreid. Kõige levinum parameeter, mille abil fütoplanktoni biomassi hinnatakse on planktonis leiduva pigmendi klorofüll-*a* kontsentratsioon. Mõõtmiste tegemine merel on kallis ja aeganõudev. Uurimisläve päev võib maksta kümneid tuhandeid eurosid, laeval töötab tihti kümneid inimesi, aga samas on ühe päeva jooksul uuritavate mõõtejaamade hulk äärmiselt piiratud (enamasti vaid mõned jaamad päevas). Peale selle, võtab kogutud proovide analüüs laboris tihti veel nädalaid. Samas võib meri olla nii ajas kui ruumis väga dünaamiline. Näiteks õitsengutes või kaldalähedastes vetes võivad vee omaduse juba mõnisada (või isegi mõnikümmend) meetrit mõõtejaamast eemal, või mõni tund enne või pärast mõõtmisi, olla oluliselt erinevad kui jaamas kogutud veeproovis. Seda ei saa me kunagi teada. Seiremõõtmisi teostatakse ka vaid mõned korrad aastas väga piiratud hulgas mõõtejaamades, sest see töö on väga ajamahukas ja kallis. Mis toimub meres seiremõõtmiste vahepeal jääb meile laevalt tehtavate mõõtmiste puhul teadmata.

Kaugseire on üks võimalus uurida erinevate parameetrite ajalis-ruumilist muutlikust ookeanides, meredes ja siseveekogudes. Kaugseirega on näiteks võimalik seirata kogu Läänemerd ja teha seda isegi mitu korda päevas. Varasematel aastatel tugines kaugseire teaduslikel satelliitidel. See tähendab, et ehitati valmis üks satelliit, lasti see orbiidile ja kasutati kuniks aparaat töötab. Rutiinse seire teostamine nõuab seda, et ühesugused andmed oleks garanteeritult kättesaadavad aastaid ja aastakümneid. Seepärast käivitas Euroopa Komisjon koostöös Euroopa Kosmoseagentuuriga Sentinel programmi, mille raames on tagatud ühesugune andmevoog (ja selle tootmise rahastus) aastakümneteks. Näiteks vee kvaliteedi seiramiseks on orbiidil kaks Sentinel-3 satelliiti, mille pardal on OLCI sensor. Kaks järgmist satelliiti on juba valmis ehitatud, et tagada olukord, kus ühe satelliidi tõrke korral oleks orbiidil vähemalt üks analoogne satelliit ning kiiresti oleks võimalik taastada kahe satelliidiga olukord. Nüüd on tagatud see, et kui teadlased on mingi parameetri seiramiseks meetoodika välja töötanud, siis saab seda kasutada pikka aega ning ei pea hakkama kohandama järgmise (aga enamasti teistsuguse) satelliidi jaoks.

Klorofüll-*a* on üks parameetreid, mida kaugseire abil veekogudes hinnatakse. Ookeanis töötavad need meetodid üsna hästi – klorofüll-*a* hindamise viga on alla 30%. Ookeanid on selles mõttes lihtsamad süsteemid, et fütoplankton on sisuliselt ainus vees leiduv optiliselt aktiivne aine, mis muudab vee värvi ja võimaldab selle põhjal biomassi hinnata. Rannikuvetes on asi keerulisem, sest seal leidub jõgede poolt transporditud värvust omavat lahustunud orgaanilist ainet ning nii jõgede kui tuule poolt transporditud tahkeid osakesi. Nende ainete mõjude eraldamine üksteisest on väga keeruline ning seepärast on ka klorofüll-*a* hindamise viga suurem kui ookeanides. Läänemeri on oma optiliselt omadustelt sisuliselt kogu ulatuses rannikuvesi ehk siis erinevate vees leiduvate ainete kontsentratsioonide hindamine kaugseirega on keerulisem kui ookeanides. Läänemeres on kaugseire seisukohast veel terve rida spetsiifilisi probleeme. Näiteks on meri suhteliselt kaugel põhjas ning seetõttu on päike suhteliselt madalal. Ühelt poolt tähendab see seda, et mõõtmisteks on vähe valgust. Teiselt poolt suurendab see veepinnalt peegeldunud valguse (mis ei anna meile infot vee omaduste kohta) osakaalu satelliidi poolt mõõdetud signaalis. Läänemere vees on ka väga palju värvust omavat lahustunud orgaanilist ainet, mis neelab tugevalt valgust (eriti sinises spektriosas) ning teeb vee veelgi tumedamaks. Ehk siis Läänemeri on oma tumeduse tõttu keerukas objekt kaugseire sensoritele (nõuab mõõteriistadelt väga suurt tundlikust), aga ka väga keeruline objekt kaugseire algoritmide

väljatöötamiseks, sest vees leiduvate ainete kontsentratsioonid varieeruvad suuremas vahemikus kui enamuses muudes meredes.

Läänemeres on kaks fütoplanktoni õitsengute perioodi – kevadõitseng ja suvine õitseng. Kevadõitsengus domineerivad ränivetikad ja suvel õitsevad tsüanobakterid. Need on optiliselt kaks väga erinevat fütoplanktoni rühma ning seetõttu on sarnase klorofüll-*a* kontsentratsiooniga veed kevadel ja suvel erinevad ning sama algoritmiga klorofüll-*a* hindamine tõenäoliselt võimatu. Ehk tõenäoliselt on vaja erinevaid algoritme kevadeks ja suveks (Simis *et al.*, 2017). Erinevalt teistes fütoplanktoni rühmadest suudavad tsüanobakterid ise veesambas liikuda ja valida omale kasvuks optimaalne sügavus. Kaugseire sensorid näevad biomassi väga erinevalt sõltuvalt sellest kas see biomass on veesambas ühtlaselt segunenud (nagu tavalise fütoplanktoni puhul) või esineb tihedate kihtidena erineval kaugusel veepinnast (Kutser *et al.*, 2006). Tsüanobakterid moodustavad ka pinnakogumeid, mis on sisuliselt ujuvuse kaotanud rakkude mass veepinnal. Selles massis ei ole võimalik hinnata klorofüll-*a* kontsentratsiooni, sest see kiht veepinnal võib olla isegi sentimeetreid paks. Kihi pinnal ei pruugi (näiteks päikese toimel) klorofüll-*a*'d ollagi, aga seesmistes kihtides (kuhu kaugseirega ei näe) võib klorofüll-*a* kontsentratsioon olla veel väga suur. Kuna kaugseire läbi pinnakogumite ei näe, siis ei saa ka selle all oleva veemassi omadusi hinnata.

Üle 90% satelliidi poolt veekogude kohal mõõdetud kiirgusest on tegelikult tagasi hajunud atmosfäärist ega anna meile mingit infot veekogude kohta. See on vee kaugseire jaoks ebavajalik osa, mis tuleb andmetest eemaldada. Seda protsessi nimetatakse atmosfäärikorreksiooniks. Läänemere oludes on see väga keerukas protsess. Ühelt poolt on vesi tume ja väga varieeruv (nagu eelpool kirjeldatud). Teiselt pool ei kehti osad neist eeldustest, mida kasutatakse ookeanide kohal kogutud info atmosfäärikorreksioonis. Kuna valdav enamus vee kohalt mõõdetud signalist pärineb atmosfäärist, siis on väikesed vead atmosfäärikorreksioonis tihti samas suurusjärgus kui kogu vee tulev kasulik info.

Eelpoolmainitud põhjustel ei ole üllatus, et näiteks Copernicuse Mereteenused (CMEMS) ei ole suutnud Läänemere jaoks sobiliku klorofüll-*a* algoritmi välja töötada. See eeldaks suurt hulka (sadu) samaaegseid kontaktmõõtmis ja pilvevabu satelliidipilte. Euroopa Liidu Ühendatud Uurimisinstituutide (*Joint Research Centre, JRC*) teadlased on hinnanud, et ühe sellise mõõtepaari hind on keskmiselt 50 000€. Hind on äärmiselt kallis kuna uurimislaevaga merel mõõtmine on väga kallis, teadlaste ja laborantide töökulu on suur ning tihtipeale on ilm pilves ning ka miljoneid maksnud ekspeditsiooniga ei pruugi ühtegi samaaegset *in-situ* ja satelliidiandmete paari saada. Läänemere kohal on pilviseid päevi oluliselt rohkem kui Euroopa merede kohal keskmiselt. Samas kasutame meie uurimistödeks merel keskmisest väiksemaid laevu. Seetõttu on ühe algoritmi väljatöötamiseks ning atmosfäärikorreksiooni edukuse hindamiseks vajaliku andmete paari hind ilmselt suurusjärgu soodsam kui suurtelt laevadelt teostatud ekspeditsioonide puhul. Käesoleva projekti raames oli meil selle alateema välitööde ja laborianalüüside tarbeks kasutada alla tuhande euro (+palgaraha) ehk oluliselt vähem kui ühe mõõtepunkti tegelik hind. Tegelikult oleks aga vaja teostada kümneid või sadu mõõtmisi igal aastaajal ja erinevat tüüpi vetes. Eelarveliste piirangute tõttu sõltusime täielikult sellest palju meil oli võimalik saada tasuta kaasa uurimislaevale, mille kulud olid kaetud mõnest teisest RITA projekti alateemast.

Klorofüll-*a* algoritmid ning nende kasutatavus Läänemere oludes

Klorofüll-*a* kontsentratsioonide leidmiseks kasutasime juba eelnevalt seiretöös häid tulemusi näidanud C2RCC protsessori klorofüll-*a* produkti (`conc_chl`). Lisaks plaanitud C2RCC produktile, katsetasime veel teisigi varasemalt Läänemeres hästi töötnud algoritme (Ligi *et al.*, 2017). 30-st erinevast klorofüll-*a*

algoritmist valisime välja 8 kõige paremini Läänemere jaoks töötanud algoritmi. Me kasutasime algsetes algoritmides kasutatud lainepikkustele lähimaid võimalike OLCI kanaleid: 665 nm, 674 nm, 681 nm ja 709 nm. Lisaks veel kasutasime kanali 620 nm väärtusi. Samas väärib märkimist, et Ligi *et al.* (2017) teostasid oma analüüsid kasutades laevalt või paadist mõõdetud vee heleduskoefitsiendi spektreid. Need peaks olema identsed satelliidiandmetest peale atmosfäärikorrektsiooni saadud vee peegeldusteguri (heleduskoefitsiendi) spektritega. Ka meie teostasime peegeldusteguri mõtmisi merel ning analüüsisime erinevate klorofüll-*a* hindamise algoritmide sobivust kasutades neid andmeid. Nagu eelpool mainitud ei anna ükski praegusel ajal kasutuses olev atmosfäärikorrektsiooni meetod Läänemere oludes piisavalt häid tulemusi. See mõjutab ka meie uurimistööd, sest atmosfäärikorrektsiooni parandamine ja/või erinevate atmosfäärikorrektsioonide testimine ei olnud selle projekti ülesanded.

Töö eesmärk ja uurimisrühm

Käesoleva töö eesmärgiks oli testida ja arendada erinevate klorofüll-*a* hindamise algoritme Sentinel-3 OLCI sensori tarbeks, leidmaks meetodi(d), mis hindaks klorofüll-*a* sisaldust Läänemeres täpsemini kui üle-Euroopalised kaugseire teenusepakkujad (CMEMS, EUMETAT, jt).

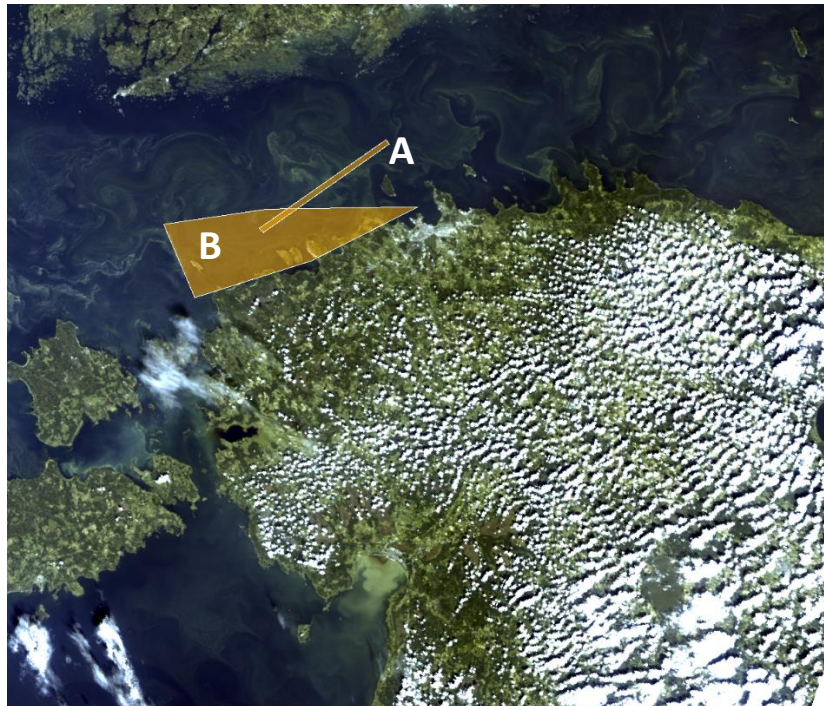
Töö teostasid Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi töötajad Tuuli Soomets, Birgot Paavel ja Tiit Kutser. Välitöödel osalesid täiendavalt Martin Ligi, Mirjam Uusõue (Randla).

Uuringu tellis ja uuringut rahastab Eesti Teadusagentuur Euroopa Regionaalarengu Fondist toetatava programmi „Valdkondliku teadus- ja arendustegevuse tugevdamine“ (RITA) tegevuse 1 „Strateegilise TA tegevuse toetamine“ kaudu. Uuring valmis Keskkonnaministeeriumi eesmärkide elluviimiseks.

2. Materjal ja metoodika

2.1. Uuringualad

RITA projekti raames koguti klorofüll-*a* andmeid kahe uurimislaua Salme ekspeditsiooni raames. Kahe kampaania jooksul oli kolm *in-situ* mõõtmispäeva (26.04.2019, 06.08.2020 ja 07.08.2020), kus oli võimalik teostada ka bio-optilisi mõõtmisi käesoleva alateema raames. Kõik kolm päeva olid pilves. Ehk siis rangelt võttes ei õnnestunud saada mitte ühtegi mõõtmist, mis vastaks kaugseire algoritmide väljatöötamiseks vajalikele kvaliteedinõuetele (pilvevaba satelliidipilt, ± 3 tundi mõõtmise ja satelliidi ülennu vahel). Juhul, kui meri on suhteliselt homogeenne (ei esine õitsenguid) kasutatakse kaugseires parema puudumisel ka *in-situ* mõõtmistele eelnenud või järgneva päeva satelliidipilte. Mõlema ekspeditsiooni jaoks olid olemas eelmise või järgmise päeva pilvevabad satelliidi (Sentinel-3A või -3B OLCI) pildid. Teisalt, augustis 2020 oli uuritavas piirkonnas tsüanobakterite õitseng ning vesi oli äärmiselt heterogeenne (Joonis 1). Seega, rangelt võttes ei oleks tohtinud neid pilte kasutada, sest ka tund paar satelliidi ülennu ja veeproovi võtmise vahel võis tähendada olulisi muutusi fütoplanktoni biomassis. Üritasime siiski neid andmeid kasutada. Mõlemad ekspeditsiooni mõõtejaamad asusid Soome lahes (Joonis 1).



Joonis 1. 08.08.2020 Sentinel-3B OLCI RGB pilt. Kaks RITA *in-situ* mõõtmisjaamu hõlmavat piirkonda on märgitud kollaste kujunditega. A kujund: 26.04.2019; B: 06-07.08.2020. Pilt: ESA.

2.2. *In-situ* andmed

Fütoplanktoni hulka iseloomustati klorofüll-*a* kontsentratsiooni abil, mis määrati järgides HELCOM (2017) soovitatud metoodikat. Igast mõõtejaamast (kokku 34 unikaalset jaama) kogutud veeproovid filtreeriti läbi Whatman GF/F filtrite ning filtrid pandi pigmentide ekstraheerimiseks 96%-lisse etanooli lahusesse ning jäeti 24h toatemperatuuril pimedasse. Seejärel lasti proovidel sulada ja tsentrifugeeriti

ekstrakti 10-20 minutit ning klorofüll-*a* kontsentratsioon mõõdeti skaneeriva UV-VIS spektrofotomeetriga Thermo Helios g.

Igas mõõtejaamas teostati ka kiirgusspektrite mõõtmised, et saada peegeldusteguri R spektrid. Kiirguse mõõtmised teostati kahe hüperspektraalse (350-900 nm, 3 nm resolutsioon) radiomeetriga TriOS-RAMSES järgides REVAMP protokoll (Tilstone *et al.*, 2003). Üks sensor oli suunatud üles mõõtes veepinnale langevat kiirgust, ja teine sensor, oli suunatud veepinnale, mõõtes veepinnalt peegeldunud kiirgust. Lihtsustatult, jagades veepinnalt peegeldunud kiirguse, veepinnale langenud kiirgusega saame peegeldusteguri spektri üle 350-900 nm spektripiirkonna. Võrdlemaks uurimislavalt mõõdetud vee heleduskoeffitsiendi spektreid satelliidi andmetega arvutati Ramsese spektrid ümber kasutades OLCI spektrikanalite karakteristikuid (Uudeberg *et al.*, 2019).

2.3. Optilise kaugseire andmed

RITA projekti raames kasutatud 27.04.2019 Sentinel-3A ja -3B pildidel oli mõlemal seitse pilvevaba mõõtejaama ja 08.08.2020 oli mõlemal viis pilvevaba mõõtejaama. Lisaks 05.08.2020 Sentinel-3B pildil oli üheksa mõõtejaama. Seega Sentinel-3A pildidelt saime 12 ja Sentinel-3B pildidelt 21 pilvevaba mõõtejaama, kokku 33 punkti.

OLCI Level-1 täisresolutsiooniga pildid (300 × 300 m) laaditi alla Copernicus Open Access Hub andmebaasist (koduleht: www.scihub.copernicus.eu). Allalaetud OLCI Level 1 piltidele rakendati atmosfäärikorrektsioon kasutades C2RCC protsessorit (Case-2 Regional CoastColour, Brockmann *et al.*, 2016) SNAP pilditöötluskeskkonnas. Tulemusena saadi iga piksli peegeldusteguri spekter ning klorofüll-*a* kontsentratsiooni hindav produkt (conc_chl) vastavalt igale *in-situ* mõõtejaamale. Ainult pilve- ja kvaliteedikarakteristikute vabade 1x1 piksli väärtusi kasutati edasises analüüsis. Saadud tulemustele vastavalt töötasime välja parimad algoritmid klorofüll-*a* leidmiseks kasutades kahe kanali suhte meetodi.

2.4. Klorofüll-*a* algoritmid

Lisaks juba eelmainitud C2RCC protsessori klorofüll-*a* produktile (conc_chl), valisime Ligi *et al.* (2017) uurimusest, kus testiti Läänemere jaoks 30 klorofüll-i algoritmi, välja 8 parimat algoritmi ($R^2 > 0.5$, CHL11-CHL18). Need algoritmid hõlmavad spektrivahemikku 664 nm kuni 709,5 nm, samas kui OLCI sensoril on selles vahemikus vaid 4 kanalit. Seega valisime iga algoritmi jaoks lähima OLCI kanali ja saime 3 erinevat algoritmi (CHL1-CHL3). Lisaks Ligi *et al.* (2017) töös välja toodud algoritmidele, lisasime veel ühe algoritmi (CHL4), mis kasutab 620 nm kanalit (Tabel 1). Tegime seda tuginedes käesolevas töös saadud *in-situ* ja OLCI peegeldusteguri kanalite korrelatsioonidele (vt tulemuste pt 3.2, Joonis 4).

Tabel 1. Kasutatud klorofüll-*a* algoritmid.

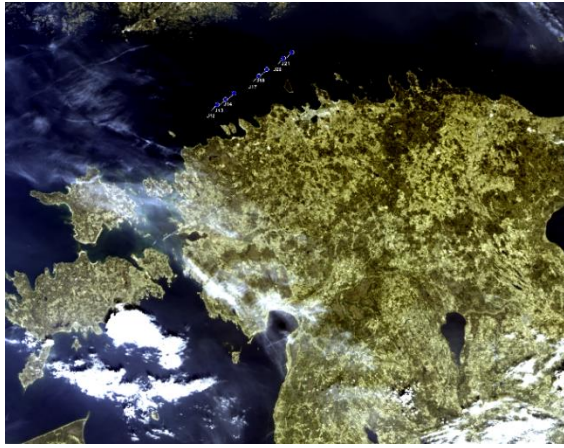
Viide	Algne algoritm	Ligi <i>et al.</i> (2017) nimi	Algoritm OLCI kanalitega	Nimi
Ammenberg <i>et al.</i> , 2002; Koponen <i>et al.</i> , 2007	R705/R664	CHL14		
Kallio <i>et al.</i> , 2001; Moses <i>et al.</i> , 2009	R707.5/R664	CHL17	R709/R665	CHL1
Dierberg & Carriker, 1994; Duan <i>et al.</i> , 2007; Menken <i>et al.</i> , 2006	R700/R670	CHL12		
Kallio <i>et al.</i> , 2001; Kutser <i>et al.</i> , 1999	R702/R674	CHL13	R709/R674	CHL2
Kallio <i>et al.</i> , 2003	R705/R673	CHL15		
Kallio <i>et al.</i> , 2001	R709.5/R673.5	CHL18		
Dierberg & Carriker, 1994	R693.5/R679	CHL11	R709/R681	CHL3
Kallio <i>et al.</i> , 2001	R706.5/R677.5	CHL16		
-	-	-	R709/R620	CHL4

3. Tulemused

3.1. Satelliidipildid

Allpool on näidatud kõik RITA projekti raames kasutatud Sentinel-3A ja -B RGB pildid koos mõõtejaamadega. Kolme kuupäeva jaoks oli kokku 5 pilti. 27.04.2019 ja 08.08.2020 päevade jaoks olid mõlemad Sentinel-3A ja -3B pildid.

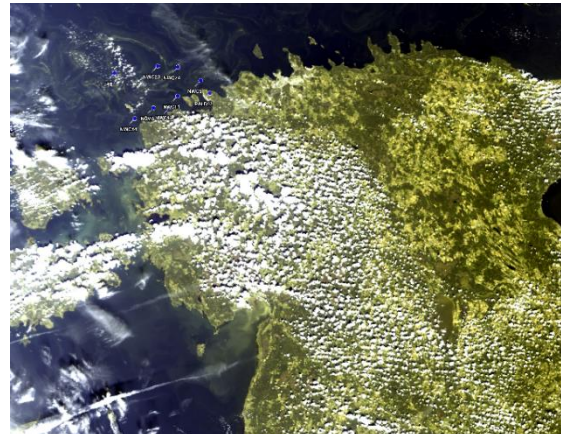
27.04.2019 Sentinel-3A



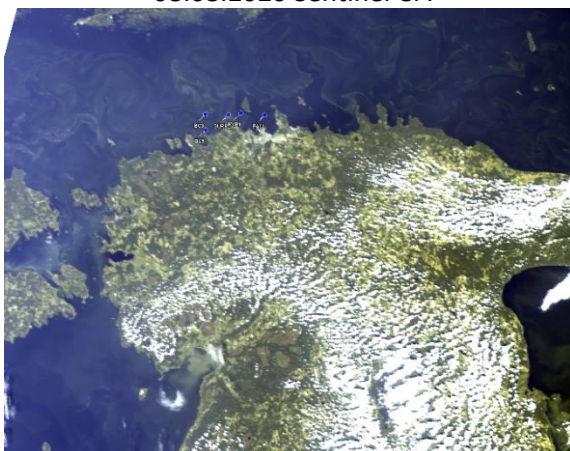
27.04.2019 Sentinel-3B



05.08.2020 Sentinel-3B



08.08.2020 Sentinel-3A



08.08.2020 Sentinel-3B

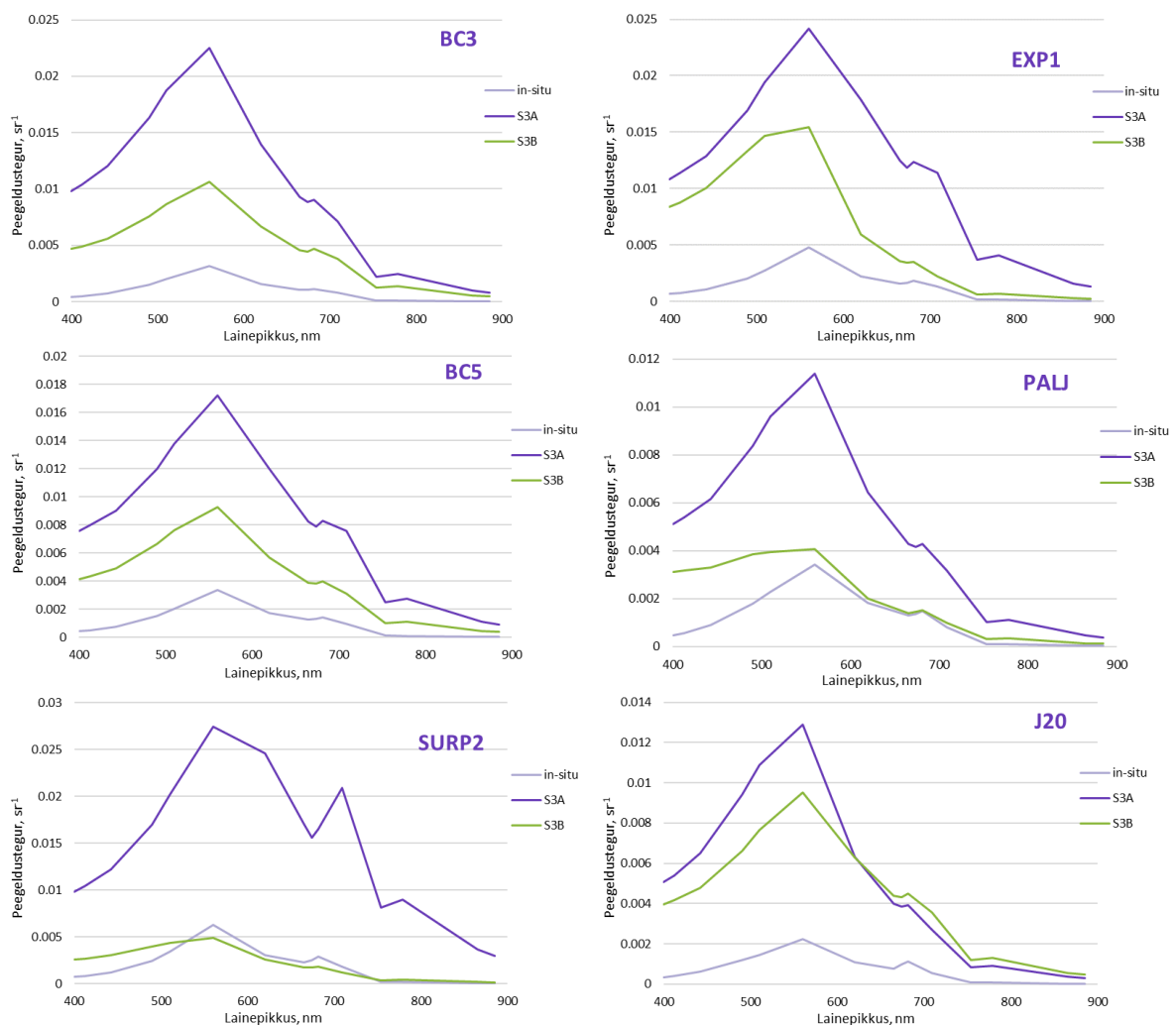


Joonis 2. Kasutatud Sentinel-3 RGB satelliidipildid koos mõõtepunktidega.

Joonisel 2 on näha et tegelikult isegi nendest kolmest päevast üksi polnud täielikult pilvevaba. Lisaks annab piltide vaatlus aluse kahtluseks, et tegelikult oli õhuke pilvekiht (kiudpilved) siiski 27.04.2019 Sentinel-3B ja 08.08.2020 Sentinel-3A piltidel. Kuid kuna kvaliteeti hindavad parameetrid on tunnistanud selle pilvevabaks siis jätsime need pildid analüüsi sisse: 33 punkti +- 1 päeva kaugseire andmetega.

3.2. Peegeldusteguri spektri analüüs

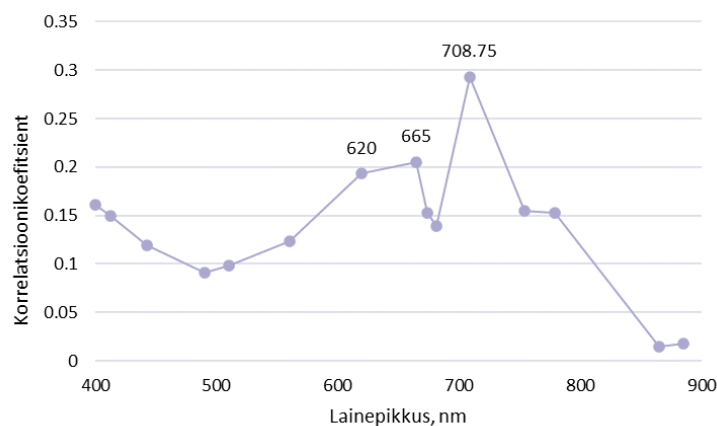
Kaugseire algoritmide väljatöötamise jaoks on vaja teada kaugseire andmetest peale atmosfäärikorrektsiooni saadavate peegeldusteguri spektrite kvaliteeti, sest see määrab lõpp-produkti kvaliteedi. Sobivate *in-situ* andmete vähesuse tõttu saime teostada 33 mõõdetud peegeldusspektrite võrdluse kaugseire peegeldusteguri spektritega. Võrrelda kahjuks ei saanud mitte küll sama päeva spektreid, vaid +-1 päeva andmeid.



Joonis 3. Erinevate mõõtejaamade *in-situ*, Sentinel-3A ja -3B peegeldusteguri spektrite võrdlus. *In-situ* mõõtmine on teostatud 07.08.2020 ja Sentinel-3A ja -3B spektrid on mõõdetud 08.08.2020, välja arvatud joonis J20, kus *in-situ* on teostatud 26.04.2019 ja kaugseire andmed pärit 27.04.2019. OLCI atmosfäärikorrektsioon on teostatud C2RCC protsessoriga.

Joonisel 3 on näha, et Sentinel-3B peegeldusteguri spektrid langevad *in-situ* mõõtmisega paremini kokku kui Sentinel-3B spektrid. Kui vaadata Joonisel 2 toodud RGB pilte siis võiks järeldada, et see võib tuleneda pildi kvaliteedist. Samas, siis peaks aprilli spektrid näitama vastupidist, et Sentinel-3A on täpsem. Kuid Joonis 3, J20, mis esindab hästi kõiki selle päeva mõõtepunkte näitab nüüd, et mõlemad sensorid ülehindavad *in-situ* spektrit tugevalt. Jaama SURP2 joonisel on näha, et satelliidi ülelennu ja *in situ* mõõtmiste vahepeal on veemass oluliselt muutunud. Sentinel-3A spekter on väga tüüpiline vetikaõitsengule – peegeldusteguri väärtused on suured ning 709 nm kohal on tugev piik. Kuna õitsengud on ruumiliselt väga varieeruvad ning veemassid on liikuvad, siis on ilmne, et Sentinel-2B ülelend on tabanud veemassi, mis on sarnane *in situ* mõõtmiste ajal olnuga. Sentinel-3A ülelennu ajal on aga samas kohas olnud tugev õitseng. See juhus on ka ilmekaks näiteks miks on vaja satelliidi ülelennuga samaaegseid *in situ* mõõtmisi.

Me võrdlesime kõiki OLCI spektrikanaleid merel mõõdetud peegeldustegurite spektritega ning leidsime, et kõige halvemini ühtisid rohelises spektriosas olevad kanalid. Parimad kanalid olid 620 nm, 665 nm ja 709 nm, millede korrelatsioonikordajad, R^2 , olid vastavalt 0,193, 0.205 ja 0.293. Kõikide kanalite korrelatsioonikordajad on toodud Joonisel 4.



Joonis 4. Erinevate mõõtejaamade *in-situ*, Sentinel-3A ja -3B peegeldusteguri spektrite võrdlus.

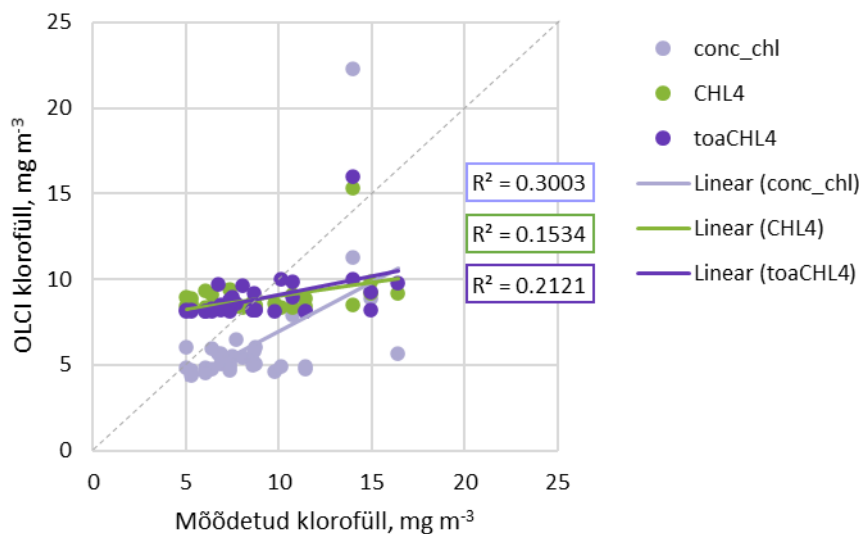
Neid kanaleid otsustasime ka kasutada, et leida parimaid klorofüll-*a* algoritme. Lisaks, toetudes varasemale kirjandusele võtsime eelmainitud kanalite juurde veel 674 nm ja 681 nm.

3.3. Klorofüll-*a*

Me katsetasime erinevaid empiirilisi algoritme, et leida parimat algoritmi klorofüll-*a* leidmiseks kaugseire andmetest (Tabel 1-2). Rakendasime Tabelis 1 toodud algoritme OLCI peegeldusteguri spektritele ning tulemused, koos statistikutega on toodud Tabelis 2. Kuna tulemused olid nõrgad siis selguse huvides esitasime vaid tugevaimad tulemused Joonisel 5.

Kuigi meie valimis on 33 punkti siis see number võib olla natuke ekslik, kuna selle 33 punkti seas oli vaid 21 unikaalset punkti, sest 12 punktile oli nii Sentinel-3A kui ka Sentinel-3B vaste. Ning need 21 unikaalset punkti on mõõdetud vaid kahel erineval päeval ja toetuvad vaid 5 erinevale pildile. Seega ühe pildi kvaliteet mõjutab oluliselt saadud tulemust. Joonisel 2 on välja toodud kõik kasutatud pildid, kust ongi näha, et tegelikult kõik pildid pole päris pilvevabad ning mõni mõõtepunkt võib olla mõjutatud ka õhukesest kiudpilvest, mida pildi kvaliteedianalüüs ei ole suutnud tuvastada.

Kõik algoritmid kasutavad suhet kanaliga 709 nm, kuna eutroofsetes vetes on vee heledus (peegeldustegur) lainepikkustel 700-710 nm (OLCI korral spektrikanal R709) üldiselt kõige parem fütoplanktoni biomassi näitaja. Ilmselt on nende algoritmide läbikukkumine seotud atmosfäärikorrektsiooniga, mis eemaldab koos atmosfääriga ka suurema osa veest tulevast signalist 709 nm ümbruses. Seetõttu testisime ka atmosfäärikorrektsioonita spektritega samade kanalisuhete kombinatsiooni kuid vastupidiselt mõningatele varasematele töödele (nt Toming *et al.*, 2017), meie ei näinud olulist tulemuste paranemist. Tabelis 2 on toodud vaid parim atmosfäärikorrektsioonita tulemus (toaCHL4), teiste algoritmide (toaCHL 1-3) tulemused jäid veelgi nõrgemaks (R^2 jäi vahemikku 0,15-0,18). Samas tuleb jällegi mees pidada, et meie valim on väga piiratud nii ajalisel kui ruumiliselt ning seireprogrammi raames kogutud *in-situ* andmete kvaliteet ei vasta kaugseire nõudmistele.



Joonis 5. *In-situ* ja OLCI algoritmide klorofüll-*a* korrelatsioon.

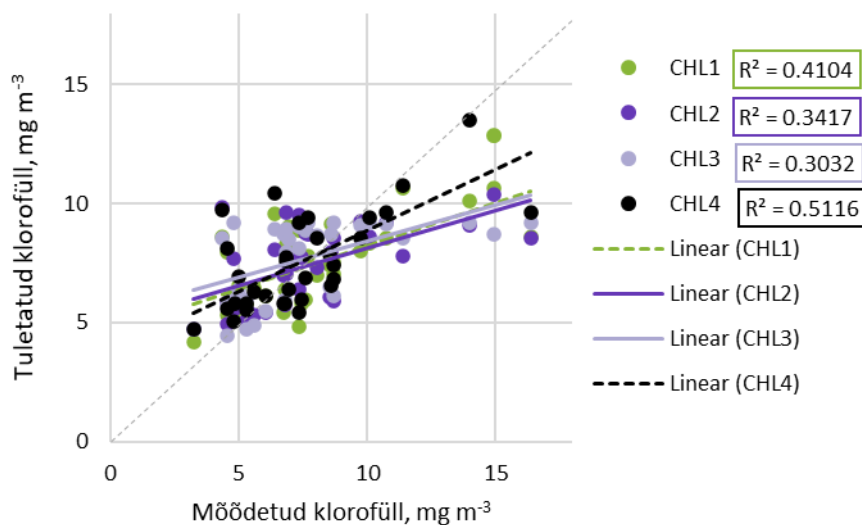
Tabel 2. Klorofüll-*a* leidmiseks kasutatud OLCI peegeldusteguri spektri kanalisuhted, algoritmid, korrelatsioonikordaja (R^2), ruutkeskmine viga (RMSE) ja keskmine absoluutne veaprotsent (MAPE). Kasutatud mõõtepunktide koguarv on 33 (unikaalseid punkte 21).

Nimi	Valem	Algoritm	R^2	RMSE	MAPE
CHL1	R709/R665	$y = 35.67x^2 - 56.24x + 30.6$	0,138	2,85	26,92
CHL2	R709/R674	$y = 25.52x^2 - 42.21x + 25.91$	0,135	2,86	26,96
CHL3	R709/R681	$y = 31.18x^2 - 50.03x + 28.51$	0,136	2,85	26,98
CHL4	R709/R620	$y = 65.12x^2 - 68.17x + 26.18$	0,153	2,83	26,82
toaCHL4	toa709/toa620	$y = 483.57x^2 - 673.87x + 242.92$	0,212	2,73	25,41
conc_chl ^a	C2RCC	Brockmann <i>et al.</i> 2016	0,3	3,93	31,44

Kaugseire andmeanalüüsi põhjal võib järeldada, et C2RCC protsessor, sarnaselt eelnevate aastatega on rahuldav valik klorofüll-*a* hindamiseks. Kuigi peab mees pidama, et hoolimata kõrgeimast determinatsioonikoefitsiendist, on ka hinnangu viga on suurim (31%) (Tabel 2).

Kuna meie valim kaugseire valideerimiseks oli väga piiratud siis teostasime lisaanalüüsi uuritud algoritmidele. Selleks rakendasime samu algoritme (CHL1-CHL4) OLCI kanalitele ümberarvutatud *in-situ* peegeldusteguri spektritele. Saadud tulemused on toodud Joonisel 6 ja Tabelis 3 on välja toodud statistikud. Rakendades samu algoritme mõõdetud kiirgusspektritele parandas see saadud klorofüll

tulemust, CHL4 algoritm oli parim ($R^2 = 0,51$). Võrreldes satelliidilt saadud tulemusi (joonis 5) laevalt mõõdetud peegeldusteguritest saadud tulemustega (joonis 6) ning võttes arvesse joonisel 3 nähtud erinevusi satelliidilt ja laevalt mõõdetud peegeldustegurite vahel on ilmne, et ka praegu parimaid tulemusi andnud atmosfäärikorrektsioon C2RCC ei anna Läänemere oludes piisavalt häid tulemusi. Teisalt, vajab uurimist miks laevalt mõõdetud peegeldustegurist hinnatud klorofüll-a ei andnud paremaid tulemusi kui $r^2=0,51$. Üks võimalus on, et testitud kaugseire algoritmid ei võimalda paremat tulemust saada. Peab meeles pidama, et enamus teostatud mõõtmisi on tehtud öitsengutes (klorofüll-a üle 5mg/m^3). Suvises öitsengus võis kaugseire tulemustele mõju avaldada tsüanobakterite vertikaalne kihistumine veesambas. Samuti peab meeles pidama, et veeproovide võtmine ja vee peegeldusteguri mõõtmine ei toimu laeval samaaegselt. Uurimislaev on mõõtmiste ajal triivis ning 5-20 minutit ajalist erinevust mõõtmiste vahel võib öitsengu olukorras tähendada ka erinevaid veemasse, mida mõõdeti. Konkreetsemate põhjuste selgitamiseks oleks vaja rohkem in situ mõõtmisi.



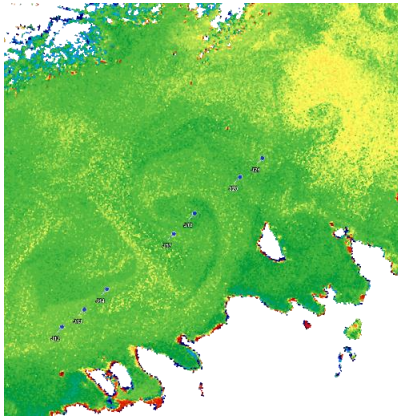
Joonis 6. *In-situ* peegeldusteguri spektri kanalisuhtest ja mõõdetud klorofüll-a korrelatsioon.

Tabel 3. Klorofüll-a leidmiseks kasutatud *in-situ* peegeldusteguri spektri kanalisuhted, algoritmid, korrelatsioonikordaja (R^2), ruutkeskmine viga (RMSE) ja keskmine absoluutne veaprotsent (MAPE). Kasutatud mõõtepunktide koguarv on 34.

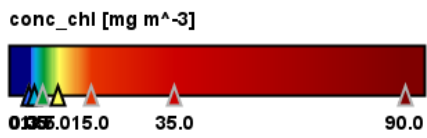
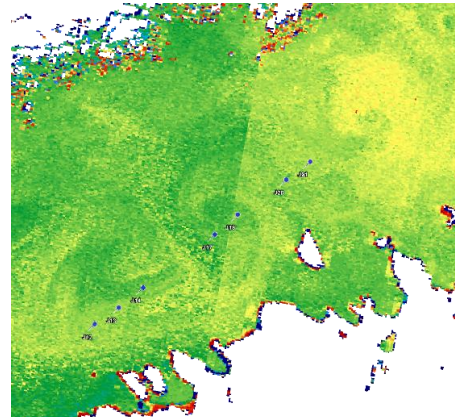
Nimi	Valem	Algoritm	R^2	RMSE	MAPE
CHL1	R709/R665	$y = 0.46e^{3.85x}$	0,416	2,32	23,36
CHL2	R709/R674	$y = 14.83x^{1.56}$	0,390	2,44	22,25
CHL3	R709/R681	$y = -97.26x^2 + 125.41x - 31.22$	0,303	2,49	24,76
CHL4	R709/R620	$y = 163.83x^2 - 121.18x + 27.11$	0,512	2,08	22,26

Kaugseire suurim eelis on selle ruumiline katvus. See tähendab, et ühe pildi pealt pole meil võimalik ainult mitte ükskuid punkte ruumis vaadelda vaid suuremat ala tervikuna. Allpool ongi toodud näited RITA projektis parimat tulemust näidanud klorofüll-a määramise meetod (C2RCC conc_chl) rakendatuna suuremale alale (Joonis 7). Kaugseire näitab selgesti öitsengukohad, näiteks Soome lahe avaosa. Kuid samas tuleb olla ettevaatlik, sest huumusainerikka jõe sissevool või merepõhja peegeldumine võib mõjutada klorofüll-a produkti väärtusi, näiteks Pärnu lahes ja Matsalu lahes (Joonis 7).

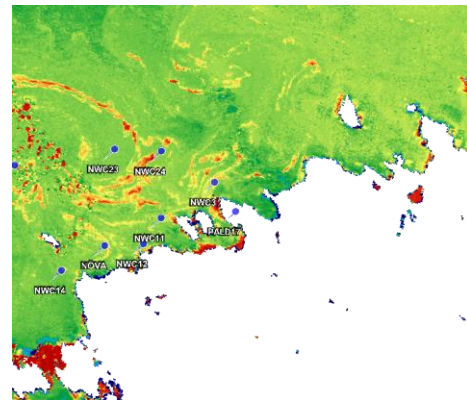
27.04.2019 Sentinel-3A



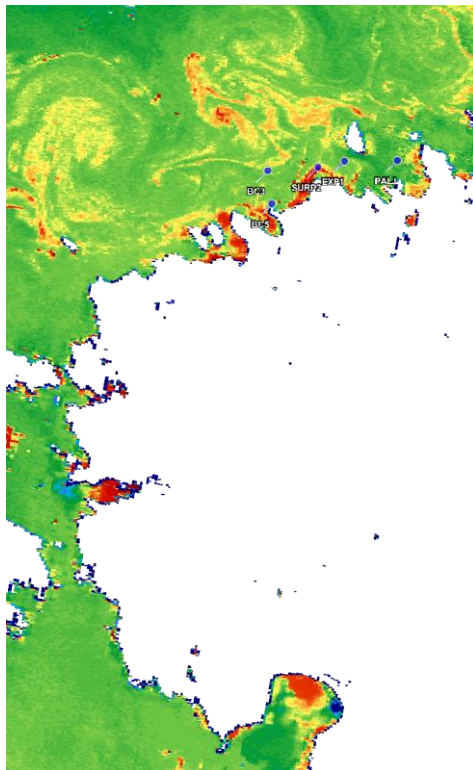
27.04.2019 S Sentinel-3B



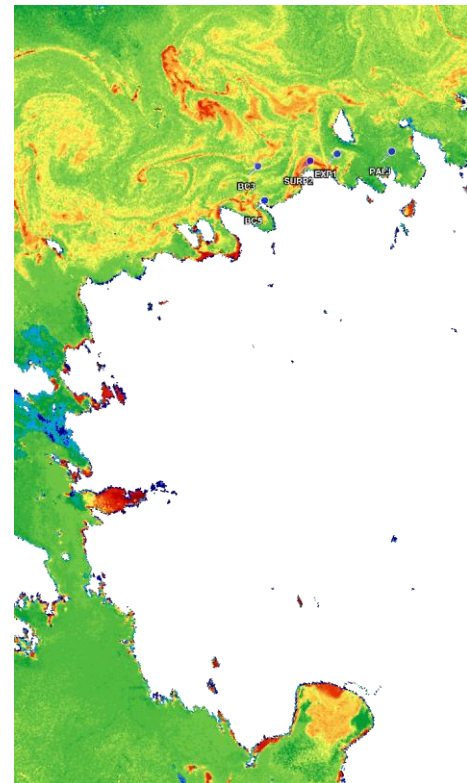
05.08.2020 Sentinel-3B



08.08.2020 Sentinel-3A



08.08.2020 Sentinel-3B



Joonis 7. Eesti rannikumere klorofüllü kontsentratsioon RITA projekti raames kasutatud Sentinel-3A ja -3B piltidel.

4. Kokkuvõte

RITA projekti raames teostati aastatel 2019-2020 kaks ekspeditsiooni uurimisläve Salme pardal kuna projekti piiratud rahastuse tingimustes oli võimalik andmeid koguda ainult sel juhul kui saime tasuta uurimislävale. Nende kahe ekspeditsiooni jooksul ei olnud kahjuks mitte ühtegi pilvevaba päeva. See tähendab, et ei õnnestunud saada mitte ühtegi *in-situ* mõõtmist, mis oleks teostatud täpselt samaaegselt Sentinel-3 OLCI mõõtmistega. Oli vaid 3 päeva, millal saime pilvevaba satelliidipildi *in-situ* mõõtmisele eelnenud või järgnenud päeval. Nendest kolmest päevast kahel oli saadaval kaks satelliidi pilti (nii Sentinel-3A kui ka Sentinel-3B). Kokku nende kolme päeva peale saime vaadelda 21 unikaalset mõõtepunkti. Kokku paralleelsete OLCI piltide peale 33 punkti. Seda on väga vähe töötamiseks välja kogu Eesti rannikumerd hõlmavat algoritmi, mis arvutaks aastaringselt klorofüll-*a* erinevates veekogu osades. Siiski teostasime mõõdetud andmetega analüüsi ja leidime kinnitust eelnevatele töödele, et sinises ja rohelses spektriosas kanalite kasutamist klorofüll-*a* algoritmides (mida tehakse avaookeanides ning teistes selgetes veekogudes) peaks vältima ning tuleks eelistada punase spektriosa kanaleid. Testitud algoritmide näitas kõige paremat tulemust C2RCC protsessori produkt `conc_chl`.

Kuna pilves ilma tõttu ei õnnestunud koguda mitte ühtegi andmepaari (samaaegne *in-situ* ja satelliidi mõõtmine), siis kasutasime kõiki (34) kahe kampaania jooksul laevalt mõõdetud peegeldusteguri spektrit, et testida valitud algoritme. Testitud algoritmide näitas paremaid tulemusi CHL4 algoritmi, mis kasutab 709 nm / 620 nm kanalite spektri väärtuste suhet.

5. Soovitused seireprogrammi täiendamiseks

Käesoleval ajal toimub Eestis klorofüll-*a* seire nii *in-situ* seirena avamere ja rannikumere alamprogrammide raames kui ka kaugseire abil. Seejuures ei kata *in-situ* mõõtmised kõiki seiratavaid veekogumeid. Osades neist toimub seire iga kuue aasta tagant. Kaugseirega antakse igal aastal hinnang klorofüll-*a* kontsentratsioonide kõigis veekogumites. Teisalt, nagu eespool mainitud, on probleeme kaugseirega hinnatud klorofüll-*a* täpsuses.

Lisaks TÜ Eesti mereinstituudi poolt analüüsitavaile kaugseire andmetele on Läänemere klorofüll-*a* kaarte võimalik alla laadida Copernicuse mereseire programmi (CMEMS) portaalist, Poola Okeanoloogiainstituudi portaalist (Satbaltyk), Soome keskkonnainstituudi portaalist (TARKKA) ja mujalt. Kas ja mil määral on need kaugseire produktid kasutatavad Eesti oludes, vajab valideerimist ehk ekspeditsioone merel, mille jooksul mõõdetakse nii vee peegeldustegurit kui vee omadusi. Ka peavad need mõõtmised olema tehtud selge ilmaga. Tavaseire raames kogutud klorofüll-*a* andmed (nii veeproovide analüüsil saadud kui ferrybox seadmetega hinnatud) üldjuhul selleks ei sobi. Näiteks ei teostata seiremõõtmiste raames vee peegeldusteguri mõõtmisi, et saaks hinnata atmosfäärikorrektsiooni õigsust ning kasutada klorofüll-*a* (ja teiste vee omaduste) hindamiseks kvaliteetseid kaugseire lähteandmeid.

Erinevate klorofüll-*a* hindamise meetodite valideerimiseks ning vajadusel sobivamate algoritmide väljatöötamiseks oleks vaja läbi viia eraldi projekt, kus on olemas vahendid ka välitööde teostamiseks. Et kaugseirega oleks võimalik klorofüll-*a* kontsentratsiooni hinnata on vaja teostada välitöid kevadõitsengutes, selgema perioodi jooksul õitsengute vahel ja seejärel suvistes tsüanobakterite õitsengutes. Mõõtmisi tuleb läbi viia avameres, pruuniveeliste jõgede läheduses (näiteks Pärnus), kus

vees leiduv lahustunud orgaaniline aine takistab klorofüll-a hindamist, ning hägusa veega aladel (näiteks Väinameri). Siis on mõõtmistega kaetud kõik Eesti rannikumeres esinevad veetüübid.

Lisaks klorofüll-a kontsentratsioonile peaks mõõtmised sisaldama järgmisi parameetreid:

- Vee peegeldustegur (heleduskoefitsient)
- Fütoplanktoni liigiline koosseis
- Värvust omav lahustunud orgaaniline aine (CDOM)
- Heljumi kontsentratsioon
- Fütoplanktoni vertikaalne jaotus
- Vee neeldumis- ja tagasihajumiskoeffitsientide vertikaalne jaotus

Pegeldusteguri mõõtmised võimaldavad hinnata atmosfäärikorrektsiooni õigsust ning ülejäänud parameetrid aitavad mõista kaugseire signaali formeerumist vees ning sellest klorofüll-a kontsentratsiooni hindamise võimalikkust. Kõik kasutatavad mõõtmised peavad olema teostatud selge ilmaga ning mitte enam kui ± 3 tunni jooksul satelliitide ülelennust. Et õitsengud on ajas ja ruumis väga varieeruvad ning neid ei pruugi mõnel aastal esineda peaks selline uurimisprojekt kestma minimaalselt kaks aastat.

Osaliselt on selliste mõõtmiste läbiviimiseks võimalik kasutada seirereise (kui laeva/paati mahub juurde kaks inimest ja aparatuur), aga pilvevabade päevade tabamiseks on suurem tõenäosus spetsiaalsete reisidega, mille ajakava on paindlik (merele minnakse ainult siis kui ilmateade lubab selget ilma). Selliste kompleksmõõtmiste arv on äärmiselt piiratud kõigis Läänemere äärsetes riikides. Seepärast oleks Läänemere kui terviku huvides (katmaks selliseid rannikvete tüüpe, mida Eestis ei esine) vajalik rahvusvaheline projekt/koostöö. Kuna sellise rahvusvahelise projekti organiseerimine võib olla keerukas, siis oleks kiirem lahendus Eesti rannikumere kaugseirele keskenduv projekt.

Kasutatud allikad

- Ammenberg, P., Flink, P., Lindell, T., Pierson, D., & Strombeck, N. (2002). Bio-optical modelling combined with remote sensing to assess water quality. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1621–1638. <https://doi.org/10.1080/01431160110071860>
- Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Stelzer, K., Embacher, S., & Ruescas, A. (2016, May). *Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters.*
- Dierberg, F. E., & Carriker, N. E. (1994). Field testing two instruments for remotely sensing water quality in the Tennessee Valley. *Environmental Science & Technology*, 28(1), 16–25. <https://doi.org/10.1021/es00050a004>
- Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., & Wang, Z. (2007). Assessment of Chlorophyll-a Concentration and Trophic State for Lake Chagan Using Landsat TM and Field Spectral Data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 129(1–3), 295–308. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9362-y>
- Kallio, K., Koponen, S., & Pulliainen, J. (2003). Feasibility of airborne imaging spectrometry for lake monitoring—a case study of spatial chlorophyll a distribution in two meso-eutrophic lakes. *International Journal of Remote Sensing*, 24(19), 3771–3790. <https://doi.org/10.1080/0143116021000023899>
- Kallio, K., Kutser, T., Hannonen, T., Koponen, S., Pulliainen, J., Vepsäläinen, J., & Pyhälähti, T. (2001). Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. *Science of The Total Environment*, 268(1–3), 59–77. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00685-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00685-9)
- Koponen, S., Attila, J., Pulliainen, J., Kallio, K., Pyhälähti, T., Lindfors, A., Rasmus, K., & Hallikainen, M. (2007). A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event in the Gulf of Finland. *Continental Shelf Research*, 27(2), 228–244. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.10.006>
- Kutser, T., Kallio, K., Eloheimo, K., Hannonen, T., Pyhälähti, T., Koponen, S., & Pulliainen, J. (1999). Quantitative monitoring of water properties with the airborne imaging spectrometer AISA. *Proc Estonian Acad Sci Biol Ecol*, 48, 25–36.
- Kutser, T., Metsamaa, L., Strömbeck, N., & Vahtmäe, E. (2006). Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1–2), 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.11.024>
- 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(1), 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2016.08.002>
- Menken, K. D., Brezonik, P. L., & Bauer, M. E. (2006). Influence of Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) on Lake Reflectance Spectra: Implications for Measuring Lake Properties by Remote Sensing. *Lake and Reservoir Management*, 22(3), 179–190. <https://doi.org/10.1080/07438140609353895>
- Moses, W. J., Gitelson, A. A., Berdnikov, S., & Povazhnyy, V. (2009). Satellite Estimation of Chlorophyll-*a* Concentration Using the Red and NIR Bands of MERIS—The Azov Sea Case Study. *IEEE*

Geoscience and Remote Sensing Letters, 6(4), 845–849.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2026657>

- Simis, S. G. H., Ylöstalo, P., Kallio, K. Y., Spilling, K., & Kutser, T. (2017). Contrasting seasonality in opticalbiogeochemical properties of the Baltic Sea. In *PLoS ONE* (Vol. 12, Issue 4).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0173357>
- Tilstone, G. ., Moore, G. F., Doerffer, R., Røttgers, R., Ruddick, K. G., & Pasterkamp, R. Jørgensen, P. V. R. (2003). Validation of MERIS Chlorophyll products in North Sea REVAMP Protocols Regional Validation of MERIS Chlorophyll products. *Proceedings of the Working Meeting on MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation (ENVISAT MAVT-2003)*, 22.
- Toming, K., Kutser, T., Uiboupin, R., Arikas, A., Vahter, K., & Paavel, B. (2017). Mapping Water Quality Parameters with Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument imagery in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 9(10), 1070. <https://doi.org/10.3390/rs9101070>
- Uudeberg, K., Ansko, I., Põru, G., Ansper, A., & Reinart, A. (2019). Using Optical Water Types to Monitor Changes in Optically Complex Inland and Coastal Waters. *Remote Sensing*, 11(19), 2297. <https://doi.org/10.3390/rs11192297>