

Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut

## Primaarproduktiooni hindamine kaugseire abil

(Deliverable 2.2.2. Estimating primary production from remote sensing)

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

Versioon 7  
18.01.2021

Leping: RITA1/02-60-01  
Vastutav täitja: Georg Martin  
Aruande koostajad: Tuuli Soomets, Tiit Kutser

Tallinn 2020



**RITA**

mereRITA

The logo for mereRITA consists of three blue wavy lines above the text "mereRITA" in a serif font.

### 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	15.01.21	Täiendatud versioon, T. Kutser
7	18.01.21	Täiendatud versioon. T. Soomets

## Sisukord

Sisukord .....	3
Executive Summary .....	4
1. Sissejuhatus .....	5
2. Materjal ja metoodika .....	6
2.1. <i>In-situ</i> mõõtmised .....	6
2.1.1. Uuringuala .....	6
2.1.2. Primaarproduksiooni mõõtmine .....	6
2.2. Primaarproduksiooni mudel .....	7
2.3. Kaugseire andmed .....	7
3. Tulemused .....	8
4. Kokkuvõte .....	11
5. Soovitused seireprogrammi täiendamiseks .....	11
Kasutatud allikad .....	12

## Executive Summary

The aim of the study was to validate and apply a remote sensing based bio-optical primary production model for the Baltic Sea.

The phytoplankton primary production (PP) is the basis of the food chain and ecosystem of the water body. Measuring PP *in-situ* requires time consuming incubations as well as following laboratory analysis and it is complex and expensive procedure. Consequently, the number of primary production measurements is very low while the production can vary significantly in space and time. Therefore, remote sensing and model calculations could offer a powerful solution for temporal and spatial estimations of PP. In current study PP was measured altogether in 4 different stations (during 2 different days). We adjusted the bio-optical model developed for optically complex lakes for Baltic Sea with very good result ( $R^2 = 0.87$ ). Unfortunately, only 4 measuring points, that we were able to collect withing the budget limits of this project, are too few to apply the model to the whole Baltic Sea with satisfactory certainty, but the results of this work are very promising.

**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

Kogu ökosüsteemi produktiivsuse alus on primaarproduksioon ehk esmasproduksioon (PP, primary production). See on autotroofide poolt fotosünteesiprotsessis toodetud orgaaniline aine (seotud energia hulk moodustatud anorgaanilisest süsinikust ja mineraalainetest). Veekogudes on esmasprodutsentideks põhiliselt mikroorganismid - vetikad ja tsüanobakterid (sinivetikad).

PP mõjutavad kõige rohkem valgus, toiteainete hulk ja temperatuur. Muudest mõjuritest on olulised vee segunemine ning vaenlaste (zooplanktoni) valikuline toitumine. Vee liikumisest tingitult võivad vetikad kanduda sügavale, kus neil pole võimalik kasvada. PP hindamiseks on mitu võimalust. Veekogudes kasutatakse neist sagedamini nelja: hapniku- ( $O_2$ ) meetod, radioaktiivse süsiniku ( $^{14}C$ ) meetod, hapniku stabiilsete isotoopide ( $^{16}O$ ,  $^{17}O$  ja  $^{18}O$ ) meetod ning fluorestsentsi kineetikameetod. Kaks esimest meetodit põhinevad ainevahetuse otsesel mõõtmisel.

Kõige täpsemaks loetakse  $^{14}C$  meetodi (mida kasutati ka antud töös), kuna selle meetodi suur tundlikkus võimaldab kasutada lühikest ekspositsiooniga ja teha mõõtmisi ka väheproduktiivsetes vetes. Tulemus ei sõltu lämmastiku vormist, kuid sõltub ekspositsiooni pikkusest. Mõõdetud PP ühikuks on kas milligrammi süsinikku kuupmeetris ( $mg\ C\ m^{-3}$ ) või milligrammi süsinikku ruutmeetril ( $mg\ C\ m^{-2}$ ). Viimane näitab, kui palju toodetakse orgaanilist ainet terves veesambas ja on nimetatud integraalseks primaarproduksiooniks  $PP_{int}$ .

Kuna kõik eelmainitud meetodid on väga kompleksed, keerulised, ajamahukad ning kulukad teostada, siis PP hindamine kaugseire abil võiks pakkuda tõhusat lahendust, seda eriti PP hindamisel üle suuremate regioonide. Kaugseire annab infot kogu veekogu kohta, vastupidiselt *in-situ* mõõtmistele, mis annab infot vaid ühe ruumipunkti kohta.

Suhteliselt hiljuti viis Euroopa Kosmoseagentuur (European Space Agency, ESA) orbiidile 2 satelliiti: Sentinel-3A ja -3B, mõlemal pardal mereuurimiseks mõeldud keskmise lahutusega (pikslisuurus 300 x 300 m) sensor OLCI (Ocean and Land Color Instrument). OLCI võimaldab mereuringuid kõrge spektraalse (21 erinevat kanalit) ja ajalise (globaalne katvus kahe päevaga, Eestis enam-vähem iga päev) lahutusega.

PP hindamiseks kaugseire abil valisime PP bio-optilise mudeli, mis on küll välja töötatud optiliselt keerukate järvede jaoks (Arst et al., 2008), kuid mis on kohandatud kaugseire andmetele (Kauer et al., 2015; Soomets et al., 2019, 2020). Kuna mudelit on lisaks hägusatele veekogudele (nagu Peipsi ja Võrtsjärv) edukalt rakendatud ka suure, sügava ja selgeveelisele järvele (Genfi järv), siis see annab aluse eeldada, et sama mudel peaks töötama ka Läänemeres, mis on oma omadustelt nende veekogude vahepealne.

### Töö eesmärk ja uurimisrühm

Käesoleva töö eesmärgiks oli valideerida ja rakendada Läänemere jaoks bio-optilist primaarproduksiooni mudelit, mis on varasemalt optiliselt keerukates vetes näidanud häid tulemusi.

Töö teostasid Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituudi töötajad Tuuli Soomets, Birgot Paavel ja Tiit Kutser. Välitöödel osalesid ka külalisdoktorant Sijia Li ning laborant Külli Kutser.

**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. *In-situ* mõõtmised

#### 2.1.1. Uuringuala

*In-situ* primaarproduktiooni mõõtmised toimusid Soela väina läheduses. Kaks mõõtmist teostati Soela väinast avamere pool 17.07.2019 ning kaks mõõtejaama oli Soela väinast Väinamere pool 18.07.2019 (Joonis 1). Lisaks allpool kirjeldatud primaarproduktiooni mõõtmisele teostati ka veeproovist klorofüll *a* kontsentratsiooni määramine ning teiste bio-optiliste parameetrite mõõtmised nii *in-situ* kui ka laboris.



Joonis 1. Neli *in-situ* primaarproduktiooni mõõtejaama Sentinel-3A OLCI (18.07.2019) RGB pildil. Pilt: ESA.

#### 2.1.2. Primaarproduktiooni mõõtmine

Primaarproduktiooni (PP) mõõdeti  $^{14}\text{CO}_2$  assimilatsioonikiiruse meetodi järgi. Selleks mõõdetakse esmalt vee läbipaistvus 30 cm läbimõõduga valge ketta (Secchi ketta) abil. Vee läbipaistvuseks loetakse sügavust, kus on selle ketta nähtavuse piir. Vastavalt läbipaistvusele valitakse 6 erinevat sügavust, kus primaarproduktiooni vertikaalset jaotust mõõdetakse. Igale sügavusele pannakse 2 paralleeli 24 ml läbipaistvad klaasviaalid, kus on mõõtejaamast võetud vee ning steriilse  $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$  lahuse segu. Lisaks hoitakse üht klaasviaali samasuguse seguga pimedas, et selgitada välja fotosünteesiprotsessist sõltumatu süsihappegaasi fikseerimise määr (heterotroofselt ja kemotsünteesi teel fikseeritud  $\text{CO}_2$ ). Pudeleid eksponeeriti veekogus 2.5-3 tundi. Lisaks mõõdeti veeproovist  $\text{CO}_2$  sisaldus vees.

Inkubeerimise järgselt pandi igast viaalist 6 ml proovi steriilsetesse stsintillatsiooniviaalidesse ja hapestati (pH < 2), lisades 150 µl 0,5 N HCl 1 ml proovi kohta. Pudelid jäeti 24 tunniks avatuna seisma, mille järel oli proovidest eemaldunud anorgaaniline <sup>14</sup>C. Lahuse radioaktiivsus määrati Optiphase “HiSafe”3 kokteilis, kasutades süsinikuloendurit. PP (mg C m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>) arvutati vastavalt standardvalemile (Nielsen, Bresta, 1984):

$$PP = \frac{(xl - xd) \times [CO_2] \times 12 \times 1,05 \times 1,06 \times v1 \times k}{y \times v2 \times t},$$

Kus  $xl$  on heledast pudelist saadud filtri radioaktiivsus (DPM),  $xd$  on tumedast pudelist saadud filtri radioaktiivsus (DPM),  $y$  on ühte pudelisse lisatud NaH<sup>14</sup>CO<sub>3</sub> lahuse radioaktiivsus (DPM). [CO<sub>2</sub>] märgib mõõdetud süsihappegaasi kontsentratsiooni vees (mmooli/l), ning 12 on süsiniku aatommass, 1,05 on koefitsient, mis arvestab <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> ja <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> assimilatsioonikiiruste erinevust ja 1,06 on faktor, mis arvestab assimileeritud süsiniku kadu ekspositsioonija vältel hingamise tõttu.  $v1$  on proovipudeli maht (ml) ja  $v2$  on pipeteeritud vee hulk (ml) ning  $k$  on üleminekukoefitsient liitritelt m<sup>3</sup>-tele.

Trapetsintegreerimise abil arvutati integraalne primaarproduksioon (PP<sub>int</sub>, mg C m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). PP<sub>int</sub> peegeldab primaarproduksiooni suurust 1 m<sup>2</sup> veepinna all olevas veesambas. Matemaatiliselt on see võrdne primaarproduksiooni sügavusjaotuse kõvera integraaliga, graafiliselt aga selle kõvera alla jääva pindalaga. Kuna kõvera matemaatiline funktsioon ei ole teada, tuleb kasutada lihtsustust. Kõveraalune pindala jaotatakse trapetsiteks nii, et nende aluste pikkused oleksid võrdsed primaarproduksiooniga meie poolt mõõdetud sügavustel. Trapetsite kõrgused on võrdsed mõõtmis sügavuste vahedega. Trapetsi pindala on võrdne aluste poolsumma ja kõrguse korrutisega.

## 2.2. Primaarproduksiooni mudel

Kasutatud PP mudel on küll välja töötatud optiliselt keerukate siseveekogude jaoks (Arst et al., 2008, 2012), kuid see on üks väheseid bio-optilisi mudeleid, mis on kohandatud kasutamaks vaid kauge seire andmeid kasutades (Kauer et al., 2015; Soomets et al., 2019; 2020). Mudeli põhimõtteks on, et PP on fotosünteetiliselt neeldunud kiirguse ja süsiniku fikseerimise kvantsaagise funktsioon (Smith et al., 1989):

$$PP(z) = \Psi \cdot Q_{PAR}^*(z) \cdot F_{PAR}(z),$$

kus PP(z) on primaarproduksioon (mg C m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>) sügavusel  $z$ ,  $\Psi$  on faktor 12 000, et teisendada süsiniku moolid milligrammideks,  $Q_{PAR}^*(z)$  on fotosünteetiliselt neeldunud kiirgus sügavusel  $z$  (arvutatakse kvantikiirguse põhjal (mol photons m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>)), ja  $F_{PAR}(z)$  on süsiniku fikseerimise kvantsaagis (mol C (mol photons)<sup>-1</sup>) fotosünteetilise kiirguse piirkonnas (400-700 nm) sügavusel  $z$ . Mudelil on vaid kolm sisendparameetrit: (1) klorofüll  $a$  (mg m<sup>-3</sup>), (2) difuusne valguse nõrgenemiskoefitsient  $K_d$  in (m<sup>-1</sup>) ja (3) pealelangev kiirgus  $q_{inc}$  (mol photons m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>).

## 2.3. Kaugseire andmed

OLCI Level-1 täisresolutsiooniga pildid (300 × 300 m) laaditi alla Copernicus Open Access Hub andmebaasist (koduleht: [www.scihub.copernicus.eu](http://www.scihub.copernicus.eu)). Allalaetud OLCI Level 1 piltidele, tuginedes eelnevatele töödele (k.a. käesoleva projekti tegevusele 2.2.1), rakendati atmosfäärikorreksiooniks C2RCC protsessorit (Case-2 Regional CoastColour, Brockmann et al., 2016), et saada PP mudeli sisendid. Tulemusena saadi iga piksli kohta mudeli kaks sisendit: klorofüll kontsentratsiooni hindav

produkt (conc\_chl) ja vees valguse nõrgenemiskoeffitsienti hindav produkt (kd\_490). Lisaks laaditi alla ka standarttöötusega Level 2 pildid, kust saadi ka mudeli kolmas sisend - pealelangeva kiirguse produkt PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

### 3. Tulemused

PP mõõdeti 17.07.2019 Soela väinast Läänemere poole kahes „avamere“ punktis: LNMR10 ja LNMR11 ja 18.07.2019 Soela väinast Väinamere poolal kahes „sisemere“ mõõtejaamas: HIUV3 ja PRML1 (Joonis 1). Kõikides jaamades mõõdeti ka CO<sub>2</sub> ja klorofüll sisaldus veeproovis ning vee läbipaistvus. Kõik mõõtejaamade detailid on toodud Tabelis 1. Avamere mõõtepunktid (LNEM 10 ja 11) eristusid sisemere punktidest oma suurema vee läbipaistvuse ning sügavama vee poolest. Kuid samas LNEM10 jaamas oli ka kõige kõrgem mõõdetud produktsioon.

**Tabel 1.** Nelja mõõtejaama *in-situ* parameetrid. Mõõtmise kuupäev ja pudelite eksponeerimise alguse kellaeg ja kestus ( $T_{\text{eksp}}$ ). Mõõtejaama sügavus ( $S_{\text{max}}$ ), vee läbipaistvus ( $S_{\text{Secchi}}$ ) ja valguse nõrgenemiskoeffitsient ( $K_d$ ). Lisaks hiljem laboris mõõdetud lahustunud süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>) ja klorofüll sisaldus (Chl) veeproovis. PP<sub>max</sub> tähistab mõõdetud suurimat produktsiooni kuupmeetris.

	Kuupäev	Kellaeg	$T_{\text{eksp}}$ h	$S_{\text{max}}$ m	$S_{\text{Secchi}}$ m	$K_d$ $\text{m}^{-1}$	CO <sub>2</sub> mmol L <sup>-1</sup>	Chl mg m <sup>-3</sup>	PP <sub>max</sub> mg C m <sup>-3</sup> h <sup>-1</sup>
LNEM10	17.07.19	12:20	3,00	12,00	8,25	0,14	2,57	1,69	5,73
LNEM11	17.07.19	13:45	2,66	10,00	7,75	0,15	2,49	0,58	1,55
HIUV3	18.07.19	10:55	2,75	7,50	6,50	0,21	1,91	1,62	2,04
PRML 1	18.07.19	11:50	2,58	6,00	5,50	0,38	2,34	0,49	2,95

Arvutamaks PP väärtusi rakendades kolme erinevat bio-optilist parameetrit, lõime kolm erinevat mudeli versiooni: 1) mudel-insitu, kus mudeli sisenditeks olid *in-situ* klorofüll ja valguse nõrgenemiskoeffitsient ja suurim võimalik pealelangev kiirgus antud kuupäeval (5,95 mol photons m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, kuna pealelangevat kiirgust ei mõõdetud); 2) mudel-C2RCC, kus kõik mudeli sisendid on Sentinel-3 OLCI pildilt; ja 3) mudel-RITA, kus me kohandasime mudelist saadava PP profiili *in-situ* mõõdetud sügavusele. Täpsed satelliidi andmetest saadud sisendite väärtused on toodud Tabelis 2.

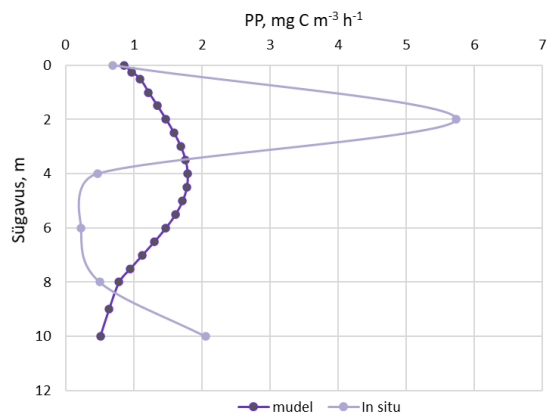
**Tabel 2.** Nelja mõõtejaama mudeli sisendid saadud 18.07.2019 Sentinel-3A OLCI Level 2 pildilt. Valguse nõrgenemiskoeffitsiendi ( $K_d$ ) ja klorofüll (Chl) andmed on saadud C2RCC protsessori produktina (vastavalt kd\_490 ja conc\_chl) ja pealelangeva kiirguse ( $q_{\text{inc}}$ ) produkt PAR saadi standart Level 2 pildilt ning teisendati mol photons m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> ühikutesse.

	$K_d$ $\text{m}^{-1}$	Chl mg m <sup>-3</sup>	$q_{\text{inc}}$ mol photons m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
LNEM10	0,16	1,05	5,51
LNEM11	0,17	1,11	5,49
HIUV3	0,24	1,46	5,51
PRML 1	0,23	1,38	5,49

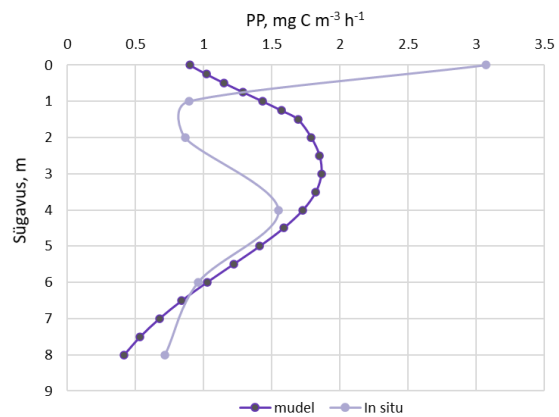
Joonisel 2 on toodud *in-situ* mõõdetud PP profiilid ja mudel-RITA saadud PP profiilid kõigi nelja mõõtejaama jaoks.



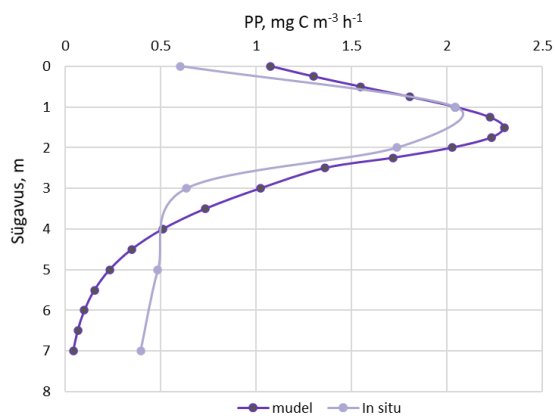
LNEM10



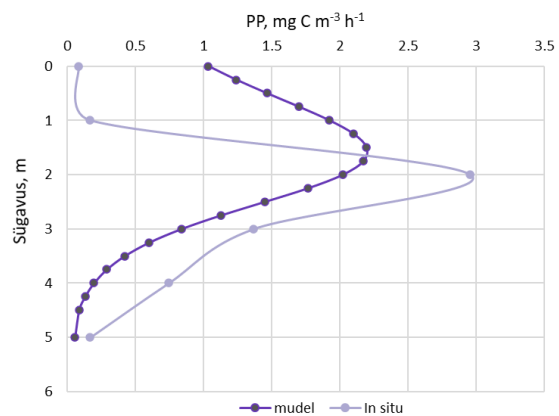
LNEM11



HIIUV3



PRML1



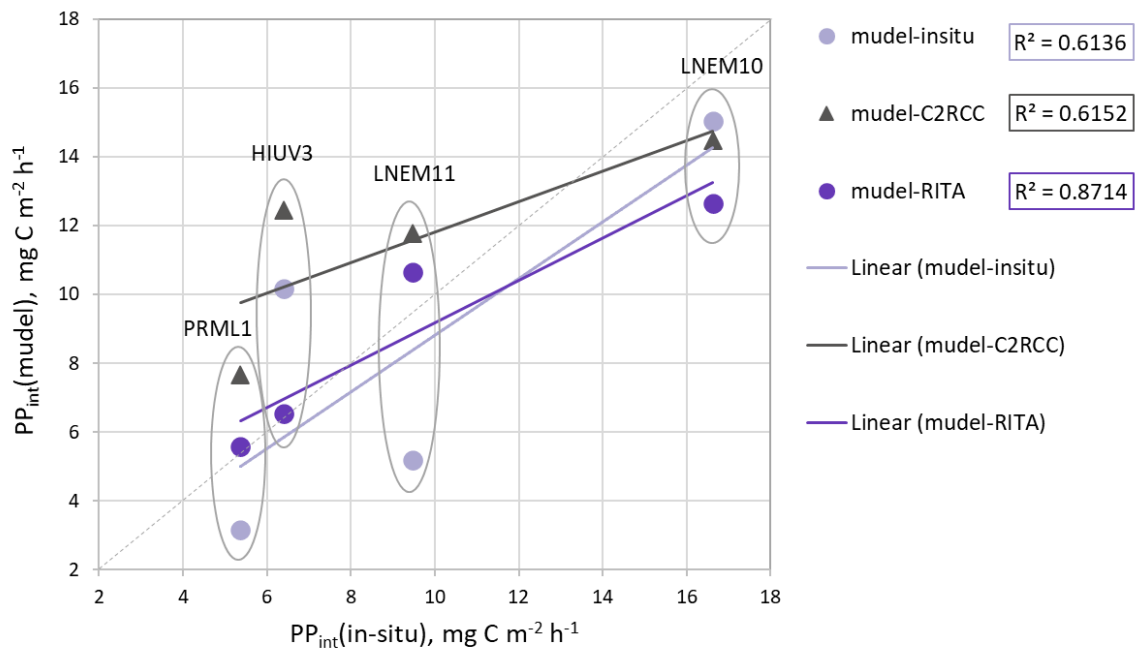
Joonis 2. *In-situ* ja mudel-RITA primaarproduktiooni (PP) vertikaalne jaotus igas mõõtejaamas.

Joonisel 2 on näha, et avamere mõõtejaamade profiile ei ole suutnud mudel jäljendada, kuid sisemere mõõtejaamade PP profiilide imiteerimine on hea. See võib tuleneda sellest, et mudelis kasutame sisendina vaid klorofüllü väärtusi, mis on saadud pinnakihist, kus ootamatult suur vetikaõitseng sügavamal veesambas ei kajastu. Avamere pool oli tsüanobakterite (mis suudavad veesambas ise liikuda) õitseng juba alanud, kuid sisemere pool tsüanobakterid puudusid. Samas peab arvestama ka seda, et sisemere punktidele oli sama päeva satelliidipildi andmed, kuid avamere punktide jaoks kasutasime mõõtepäevast järgmise päeva satelliidipilti (kuna sama päeva pildil olid mõõtejaamad pilve all).

Ökoloogilisest seisukohast on PP profiilide täpselt imiteerimisest isegi olulisem mudeli võimekus arvutada PP terves veesambas ehk  $PP_{int}$  tulemused. Kõikide mudeliversioonide, aga ka *in-situ* mõõdetud  $PP_{int}$  väärtused on toodud Tabelis 3 ning Joonisel 3 on näha kõikide mudeliversioonide korrelatsioon erinevates mõõtejaamades *in-situ* mõõtmistega.

**Tabel 3.** Integraalse primaarproduktsooni ( $PP_{int}$ ,  $mg\ C\ m^{-2}\ h^{-1}$ ) väärtused, nii *in-situ* kui ka kolme erineva mudeli versiooni kohta.

	$PP_{int}$ , $mg\ C\ m^{-2}\ h^{-1}$			
	<i>In-situ</i>	Mudel-insitu	Mudel-C2RCC	Mudel-RITA
LNEM10	16,62	15,03	14,48	12,65
LNEM11	9,46	5,18	11,77	10,65
HIUV3	6,41	10,18	12,44	6,54
PRML 1	5,36	3,15	7,65	5,59



**Joonis 3.** *In-situ* ja kolme erineva mudeli integraalse primaarproduktsooni ( $PP_{int}$ ,  $mg\ C\ m^{-2}\ h^{-1}$ ) korrelatsioon erinevates mõõtejaamades.  $PP_{int}$  mudelid: mudel-insitu (sisendid mõõdetud *in-situ*), mudel-C2RCC (sisendid Sentinel-3 OLCI pildilt) ja mudel-RITA (sisendid Sentinel-3 OLCI pildilt ja kohandatud PP profiil).

Tabelist 3 ja Jooniselt 3 on näha, et mudelit kasutades *in-situ* andmetega langeb kõige paremini kokku kõige produktiivsem mõõtepunkt (LNEM10). Samas nelja mõõtepunkti peale kokku on mudel-insitu determinatsiooni kordaja kõige madalam (0,61). Üldiselt kipub üldiselt mudel ülehindama HIUV3 punkti ja alahindama LNEM10 punkti. Kohandatud sateliidiandmetega versioon mudel-RITA ei ülehinna enam kolme mõõtepunkti, kuid alahindab rohkem kui mudel-C2RCC kõige produktiivsemat punkti LNEM10, kuid siiski on väga heas korrelatsioonis *in-situ* mõõtmistega ( $R^2 = 0,87$ ). Arvutatud statistikud on toodud kõikide mudeliversioonide kohta Tabelis 4.

**Tabel 4.** Statistikut primaarproduktsooni mudelitele: determinatsioonikordaja ( $R^2$ ), keskmine absoluutne protsentuaalne viga (MAPE), ruutkeskmine viga (RMSE), süstemaatiline viga (Bias) ja mõõtepunktide arv ( $n$ ).

	$R^2$	MAPE	RMSE	Bias	$n$
Mudel-insitu	0,61	38,76	3,16	-1,08	4
Mudel-C2RCC	0,62	43,56	3,59	2,12	4
Mudel-RITA	0,87	10,68	2,08	-0,61	4

Hoolimata mudel-RITA kõige madalamast täpsusest LNEM10 punkti hindamisel (absoluutne viga 24 %), hindas see mudeliversioon teisi kolme mõõtepunkte väga hea täpsusega (absoluutne viga jäi vahemikku 2,1-12,5 %). Kusjuures mudel-insitu absoluutne viga nende kolme mõõtepunti määramisel oli vahemikus 41,3-58,9% ning mudel-C2RCC vastavalt 24,3-94,3 %. Kogu valimi absoluutne viga  $PP_{int}$  määramisel on väga hea mudel-RITA jaoks (vaid 11 %) ja ka ruutkeskmise viga on rahuldavalt madal (2,1). Teised mudelite versioonid nii häid tulemusi ei näita (Tabel 4).

#### 4. Kokkuvõte

Kogu veekogu ökosüsteemi ja toiduahela aluseks on fütoplantoni primaarproduksioon, PP. Kuigi see on äärmiselt oluline parameeter, on seda äärmiselt keeruline ning kallis mõõta, ning tihti on mudelarvutused ainus viis, kuidas saada kogu veekogu kohta ruumiliselt või ajaliselt infot. Siinkohal võikski olla kaugseire ja mudelarvutuste kombineerimine võimas lahendus hindamaks PP ajas ja ruumis. MereRITA projekti raames oli meil võimalik teostada *in-situ* PP mõõtmisi kahel päeval kokku neljas mõõtejaamas. Läänemere jaoks kohandatud mudel kaugseire (C2RCC protsessori produktid) andmetega andsid väga häid tulemusi ( $R^2 = 0,87$ ). Kahjuks on vaid 4 mõõtepunkti liiga vähe (ja meil puuduvad andmed teistest PP mõõtmistest Läänemeres minevikus), et rahuldava kindlusega rakendada mudelit kogu Läänemerele, kuid antud töö tulemused on väga paljutöötavad ning mudel-RITA vajaks valideerimist suurema andmekoguga.

#### 5. Soovitused seireprogrammi täiendamiseks

Veekogude primaarproduksioon on väga oluline nende ökoloogilist seisundit iseloomustav parameeter. Nagu käesolevast uuringust näha, on primaarproduksiooni võimalik Läänemeres hinnata kaugseire abil. Kaugseire kasutamine seireprogrammis võimaldaks anda primaarproduksiooni ruumilisi hinnanguid (näiteks veekogumite kaupa) ning tuvastada PP muutusi ajas. Sentinel-3 satelliidid pildistavad kogu Läänemere sisuliselt iga päev (isegi kaks korda päevas). Seega saaks PP muutusi jälgida kõigil pilvevabadel päevadel kogu jäävaba perioodi jooksul. Copernicus programmi kaudu on satelliidiandmete saadavust garanteeritud järgmisteks aastakümneteks.

Tagamaks primaarproduksiooni hinnangute usaldusväärsust, ning primaarproduksiooni kui indikaatori lisamise seireprogrammi, oleks vaja läbi viia jätku-uuring. Käesolev uuring andis küll positiivse tulemuse, aga nelja mõõtejaama põhjal ei ole võimalik tagada, et tulemused on usaldusväärsed kogu Läänemere ning kogu jäävaba perioodi jaoks.

Jätku-uuring peaks arvestama järgmiste asjaoludega:

\* Läänemeres on kaks oluliselt erinevat fütoplanktoni õitsengut – ränivetikate poolt domineeritud kevadõitseng ning tsüanobakterite poolt domineeritud suvine õitseng. Seega oleks mudeli valideerimiseks vaja teha välitööd kevadõitsengu ajal, selgema vee perioodil ning tsüanobakterite õitsengu ajal.

\* Mõõtmised peavad hõlmama erinevate omadustega veemasse - vähese läbipaistvusega pruuniveelisi jõgede suudmealasid (näiteks Pärnu), hägusaid veemasse (näiteks Väinameres) ning mõõtmisi suhteliselt selgeveelisemas Läänemere avaosas. Siis oleks kaetud kõik põhilised Läänemeres esinevad veetüübid.

\* Selliste mõõtmiste läbiviimine oleks üsna ajamahukas, sest PP *in situ* mõõtmisi saab logistilistel põhjustel teha maksimaalselt kaks päevas.

\* Mõõtmised olema läbi viidud selge ilmaga, et saaks satelliidipildi samaaegselt *in situ* mõõtmistega.

\* Tagamaks algoritmide valideerimise erinevate õitsengute jaoks (mida ei pruugi igal aastal esineda) ning tagamaks analüüsiks piisava hulga pilvevabade päevade *in situ* mõõtmiste olemasolu peaks selline projekt kestma vähemalt kaks aastat.

\* Vaja oleks uurida ka teiste võimalike *in situ* PP mõõtmiste (mis on vähem ajamahukad) kasutuselevõttu.

- Näiteks on pakutud pCO<sub>2</sub> hinnangute kasutamist (Zhang et al., 2021), aga peab meeles pidama, et kaudsed *in situ* mõõtmistel põhinevad PP hinnangud võivad olla ebatäpsemad kui kaugseirel tuginevad hinnangud.
- Teiseks võimaluseks oleks antud töös kasutatud PP mudelit valideerida *in situ* O<sub>2</sub> järgi (Cole et al., 2000). Kuigi O<sub>2</sub> meetodi jaoks on vajalik sensori eksponeerimine mõõtejaamas kogu päeva (kuni 24h), on see meetod siiski oluliselt lihtsam kui <sup>14</sup>C meetod. Võiks ka kasutada ära kõrgsagedusega mõõtvate, juba olemasolevaid, poide tulemusi.
- Kuna nii CO<sub>2</sub> kui ka O<sub>2</sub> meetoditel on omad nõrkused siis uuem idee on kombineerida O<sub>2</sub> ja CO<sub>2</sub> koosmõõtmisi (Vachon et al., 2020), kuid täpse metodika selleks peaks Läänemere jaoks veel välja töötama.

Peale sellist uuringut on tõenäoliselt võimalik PP hinnangud seireprogrammi kavva võtta.

## Kasutatud allikad

Arst, H., Nõges, P., Nõges, T., Kauer, T., & Arst, G.-E. (2012). Quantification of a Primary Production Model Using Two Versions of the Spectral Distribution of the Phytoplankton Absorption Coefficient. *Environmental Modeling & Assessment*, 17(4), 431–440. <https://doi.org/10.1007/s10666-011-9305-z>

Arst, H., Nõges, T., Nõges, P., & Paavel, B. (2008). In situ measurements and model calculations of primary production in turbid waters. *Aquatic Biology*, 3(1), 19–30. <https://doi.org/10.3354/ab00059>

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.*

Cole, J. J., Pace, M. L., Carpenter, S. R., & Kitchell, J. F. (2000). Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations. *Limnology and Oceanography*, 45(8), 1718–1730. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.8.1718>

Kauer, T., Kutser, T., Arst, H., Danckaert, T., & Nõges, T. (2015). Modelling primary production in shallow well mixed lakes based on MERIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 163, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.023>

Smith, R. C., Prezelin, B. B., Bidigare, R. R., & K. S., B. (1989). Bio-optical modeling of photosynthetic production in coastal waters. *Limnology and Oceanography*, 34(8), 1524–1544. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1524>

- 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(1), 49–60. <https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1530529>
- Soomets, T., Uudeberg, K., Kangro, K., Jakovels, D., Brauns, A., Toming, K., Zagars, M., & Kutser, T. (2020). Spatio-Temporal Variability of Phytoplankton Primary Production in Baltic Lakes Using Sentinel-3 OLCI Data. *Remote Sensing*, 12(15), 2415. <https://doi.org/10.3390/rs12152415>
- Vachon, D., Sadro, S., Bogard, M. J., Lapierre, J., Baulch, H. M., Rusak, J. A., Denfeld, B. A., Laas, A., Klaus, M., Karlsson, J., Weyhenmeyer, G. A., & Giorgio, P. A. (2020). Paired O<sub>2</sub> –CO<sub>2</sub> measurements provide emergent insights into aquatic ecosystem function. *Limnology and Oceanography Letters*, 5(4), 287–294. <https://doi.org/10.1002/lol2.10135>
- Zhang, S., Rutgersson, A., Philipson, P., & Wallin, M. B. (2021). Remote Sensing Supported Sea Surface pCO<sub>2</sub> Estimation and Variable Analysis in the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 13(2), 259. <https://doi.org/10.3390/rs13020259>