

**Eiropas savienības Eiropas Jūrlietu un zivsaimniecības fonda Rīcības programmas zivsaimniecības attīstībai 2014.-2020.gadā prioritātes “Veicināt integrētās jūrlietu politikas īstenošanu” atbalstāmā pasākuma “Zināšanu uzlabošana jūras vides stāvokļa jomā” projekta Nr. 17-00-F06803-000001 ietvaros noslēgtā (iepirkuma identifikācijas Nr. VARAM 2016/54)**

**Līguma Nr IL/106/2017  
NOSLĒGUMA ZIŅOJUMS**



## **EITROFIKĀCIJAS NOVĒRTĒJUMS (D5)**

Izpildes termiņš: 20.06.2022

Rīga, 2022

## Saturs

Kopsavilkums .....	2
Ievads .....	3
1. Hlorofila a koncentrācija .....	4
1.1. Vasaras hlorofila a aprēķins balstoties uz satelītu informāciju .....	4
1.1.1. Ievads – Baltijas jūras situācija .....	4
1.1.2. Datu pieejamības raksturojums .....	5
1.1.2.1. Sentinel-3 datu un produktu pieejamība .....	5
1.1.2.2. Sentinel-2 datu pieejamība un apstrāde .....	8
1.1.3. Testēšana .....	9
1.1.3.1. Hlorofila a novērtēšanas metožu savstarpējās sakarības .....	9
1.1.3.2. Hlorofila a novērtēšanas metožu reakcija uz vides signāliem .....	12
1.1.3.2.1. Reģionālie aspekti .....	12
1.1.3.2.2. Sezonālie aspekti .....	13
1.1.4. Rīgas līča vides stāvokļa novērtēšanas indikatora koncepts .....	16
1.1.4.1. Datu iegūšana .....	16
1.1.4.2. GES robežvērtību noteikšana .....	17
1.1.4.3. Rīgas līča vides stāvokļa novērtējums izmantojot 2021.gada augusta datus .....	17
1.1.5. Rekomendācijas tālākai indikatora attīstībai .....	18
1.2. Pavasara hlorofila a indikators .....	19
2. Izšķīdušā skābekļa koncentrācija .....	24
2.1. Dziļūdens skābekļa indikators .....	24
2.1.1. Ievads .....	24
2.1.2. Pētījuma vispārējs apraksts .....	24
2.1.3. Rezultātu apraksts .....	24
2.1.4. Skābekļa deficīta raksturojums .....	26
2.2. Seklūdens skābekļa indikators .....	28
2.2.1. Ievads .....	28
2.2.2. Pētījuma vispārējs apraksts .....	28
2.2.3. Rīgas līča virsējā slāņa definēšanas metodikas apraksts .....	33
2.2.4. Rīgas līča piegrunts ūdens slāņa skābekļa deficīta aprēķināšana .....	35
Izmantotā literatūra .....	39

---

## KOPSAVILKUMS

---

Eiropas Savienības Eiropas Jūrlietu un zivsaimniecības fonda projekta Nr. 17-00F06803-000001 ietvaros noslēgtā līgumdarba “Zināšanu uzlabošana jūras vides stāvokļa jomā (Līguma Nr. IL/106/2017) (turpmāk tekstā – Līgumdarbs) ietvaros tika veikts pētījums, lai celtu zināšanu kapacitāti un iegūtu nepieciešamo datu materiālu 5. Raksturlieluma “Līdz minimumam ir samazināta cilvēka darbību izraisītā eutrofikācija, jo īpaši tās nelabvēlīgā ietekme, tāda kā bioloģiskās daudzveidības samazināšanās, ekosistēmu degradācija, kaitīgo aļģu ziedēšana un skābekļa trūkums dziļākajos ūdens slāņos” vides stāvokļa novērtēšanai.

Vasaras sezonas hlorofila a koncentrāciju ūdens virsējā slānī jau samērā ilgu laiku izmanto kā vides stāvokļa indikatoru. Tomēr esošā jūras monitoringa novērojumu kapacitāte dod iespēju aprēķināt šo indikatoru ar samērā lielu nenoteiktību, jo ir samērā problemātiski nodrošināt labu novērojumu telpisko nosegumu un biežumu. Tāpēc pēdējos 10-20 gados tiek strādāts pie tehniskiem risinājumiem, lai varētu izmantot satelītu informāciju vasaras hlorofila a vidējās vērtības aprēķināšanai. Viena no tehniski grūtāk īstenojamām problēmām ir atmosfēras korekcijas koeficienta izstrāde, kas balstās uz vietas iegūto optisko datu pieejamību. Tāpēc Līgumdarba ietvaros sadarbības formā ar Apvienoto Pētījumu Centru (JRC) tika īstenoti optisko datu iegūšanas darbi. Paralēli tika pārskatīti hlorofila a mērījumi jūras ūdeņu virsējā slānī. Tika konstatēts, ka vēsturiskie dati no 0-10 m ūdens slāņa ir samērā nepiemēroti, lai kalibrētu no satelīta iegūto signālu, jo satelīts reģistrē hlorofila a koncentrāciju 0-0.5 m slānī. Uz papildus iegūto hlorofila a datu no ūdens virsējā slāņa bāzes tika izstrādāti un aprobēti pārrēķina algoritmi un saskaņotas GES vērtības. Veiktā pētījuma rezultāti ir daudzsoļi, tomēr datu kopa, uz ko tie balstās, ir salīdzinoši neliela. Attiecīgi, ir nepieciešams turpināt iesāktos pētījumus un veikt aprobāciju, izmantojot plašāku datu kopu. Savukārt pavasara fitoplanktona indikators, kas ir nozīmīgs, lai raksturotu izmaiņas pavasara fitoplanktona sabiedrībā, ir izstrādāts konceptuālā līmenī. Indikatora iedzīvināšanai monitoringa programmā ir nepieciešamas investīcijas tehniskās kapacitātes nodrošināšanai.

Pētījuma laikā tika veikts būtisks darbs pie piegrunts ūdens slāņa skābekļa deficīta indikatora aprobācijas. Indikatoram ir svarīga loma korektā eutrofikācijas efektu novērtēšanā. Pētījuma rezultāti parādīja, ka indikators labi atspoguļo eutrofikācijas efektus Baltijas jūras ūdeņu slānī, kas ir dziļāks par 80 m, t.i., zem haloklīna. Ūdens sānī, kas ir seklāks par 80 m šis indikators nav piemērojams. Esošā prakse attiecināt novērtējumu pēc dziļūdens skābekļa deficīta uz visu novērtējuma vienību (piem., Austrumgotlandes baseinu) dod kļūdainu iespaidu par patieso stāvokli, kā arī neatbilst Kritērija D5C5 metodiskajam standartam, t.i., novērtējot bentisko dzīvotņu stāvokli pēc kritērija D5C5 ir jāvērtē, cik lielā platībā (kā proporcionālā daļa no kopējā) ir eutrofikācijas efekti. Skābekļa deficīts ir būtisks negatīvs eutrofikācijas efekts, kas ietekmē bentisko sabiedrību. Attiecīgi, ja novērtējuma vienībā, teritorijā, kas atrodas seklāk par 80 m šāds efekts nav novērojams, ir kļūdaini norādīt, ka ir. Līdzīgi tika konstatēts, ka Rīgas līcī, kur nav novērojams haloklīns, piegrunts ūdens slāņa deficīts kā indikators ir izmantojams tikai dziļākajos rajonos. Seklūdens daļā skābekļa krājums atjaunojas pietiekami ātri, lai nebūtu konstatējams būtisks tā deficīts.

---

## **IEVADS**

---

Eiropas Savienības Eiropas Jūrlietu un zivsaimniecības fonda projekta Nr. 17-00F06803-000001 ietvaros noslēgtā līgumdarba “Zināšanu uzlabošana jūras vides stāvokļa jomā (Līguma Nr. IL/106/2017) (turpmāk tekstā – Līgumdarbs) ietvaros tika veikts pētījums, lai celtu zināšanu kapacitāti un iegūtu nepieciešamo datu materiālu 5. Raksturlieluma “Līdz minimumam ir samazināta cilvēka darbību izraisītā eitrofikācija, jo īpaši tās nelabvēlīgā ietekme, tāda kā bioloģiskās daudzveidības samazināšanās, ekosistēmu degradācija, kaitīgo aļģu ziedēšana un skābekļa trūkums dziļākajos ūdens slāņos” vides stāvokļa novērtēšanai. Pētījums galvenokārt fokusējās uz 5. Raksturlieluma kritērijiem: D5C2 (primārais kritērijs) – Hlorofila a koncentrācija nav tādā līmenī, kas liecinātu par nelabvēlīgu ietekmi, kuru rada bagātināšanās ar barības vielām un D5C5 (primārais kritērijs) – Izšķīdušā skābekļa koncentrācija dēļ bagātināšanās ar barības vielām nav samazinājusies līdz līmenim, kas liecina par nelabvēlīgu ietekmi uz bentiskajām dzīvotnēm vai citām eitrofikācijas sekām.

---

## 1. HLOOROFILA A KONCENTRĀCIJA

---

### 1.1. VASARAS HLOOROFILA A APRĒĶINS BALSTOTIES UZ SATELĪTU INFORMĀCIJU

#### 1.1.1. *levads – Baltijas jūras situācija*

Baltijas jūra ir optiski sarežģītāka salīdzinājumā ar tipiskiem jūras ūdens baseiniem. Izstrādātie okeāna krāsas (*ocean colour*) algoritmi, kas ir balstīti uz zilās un zaļās datu joslas attiecību, nedod pietiekami labu rezultātu Baltijas jūrai tās īpatnējo optisko apstākļu dēļ (Ligi et al., 2017). Baltijas jūras ūdeņos ir augsts izšķīdušās organiskās vielas daudzums, kas lielākoties ienāk no boreālajiem mežiem, padarot šīs jūras ūdeņus relatīvi tumšus salīdzinājumā ar citām jūrām un okeāniem, un kas ir arī lielākais gaismas absorbētājs (Kowalczyk et al., 2005, Ligi et al., 2017). Tādējādi Baltijas jūras atstarošanās līmenis ir salīdzinoši zems, it īpaši no zilā spektra (Kratzer, Moore, 2018, Toming et al., 2017). Vislabākie rezultāti par hlorofila-a koncentrāciju Latvijas un Igaunijas piekrastes ūdeņos ir iegūti izmantojot algoritmus, kas strādā ar zaļo un sarkano krāsu spektru (Toming et al., 2017).

Baltijas jūras optiskās īpašības atšķiras ne tikai no citām jūrām un okeāniem, bet ir atšķirīgas arī dažādās Baltijas jūras daļās (1.1. tabula). Baltijas jūrā izšķīdušās krāsainās vielas absorbcija variē no aptuveni 0.30-1.17 m<sup>-1</sup> ZR daļā (Kratzer, Moore, 2018). Savukārt Baltijas jūras centrālajā daļā absorbcija var sasniegt pat 4.10 m<sup>-1</sup> (Kratzer, Moore, 2018), bet dienvidu daļā - aptuveni 0.20-2.29 m<sup>-1</sup>. Vidējais krāsainās izšķīdušās vielas absorbcijas līmenis (RDS,  $\alpha_{CDOM}$ ) parasti ir daudz zemāks, variējot no 0.0012-0.64 m<sup>-1</sup> ar mediānu 0.006 m<sup>-1</sup>.

Kā jau iepriekš minēts, Baltijas jūra tālīzpētes klasifikācijā ir definēta kā optiski īpaši sarežģīti ūdeņi (*Case II waters*). Optiski sarežģīti ūdeņi nozīmē, ka ūdenī ir liels hlorofila daudzums, kas atšķiras no multispektrālo instrumentu (tai skaitā Sentinel OLCI) kalibrēšanā izmantotajiem algoritmiem, lielāks aerosolu daudzums, zemes ietekme, liels sanešu daudzums, kas ieplūduši no piekrastes upēm. Duļķainos un ūdeņos ar augstu absorbcijas līmeni ir iespējamas lielas neprecizitātes veicot atmosfēras korekcijas procedūras, iegūstot neatbilstoši augstas hlorofila a koncentrācijas (Binding et al., 2010, Moore et al., 1999, Gross et al., 2000, Reinart et al., 2006). Papildus jūras krāsai šajā reģionā saule lielākoties atrodas zemu pie horizonta, apgrūtinot tālīzpētes sensoru redzamību, jo nereti Saules gaisma rada atspīdumu, traucējot satelītu sensoru mērījumus. Baltijas jūras reģionu arī bieži klāj mākoņi, kas tiešā veidā samazina datu pieejamību.

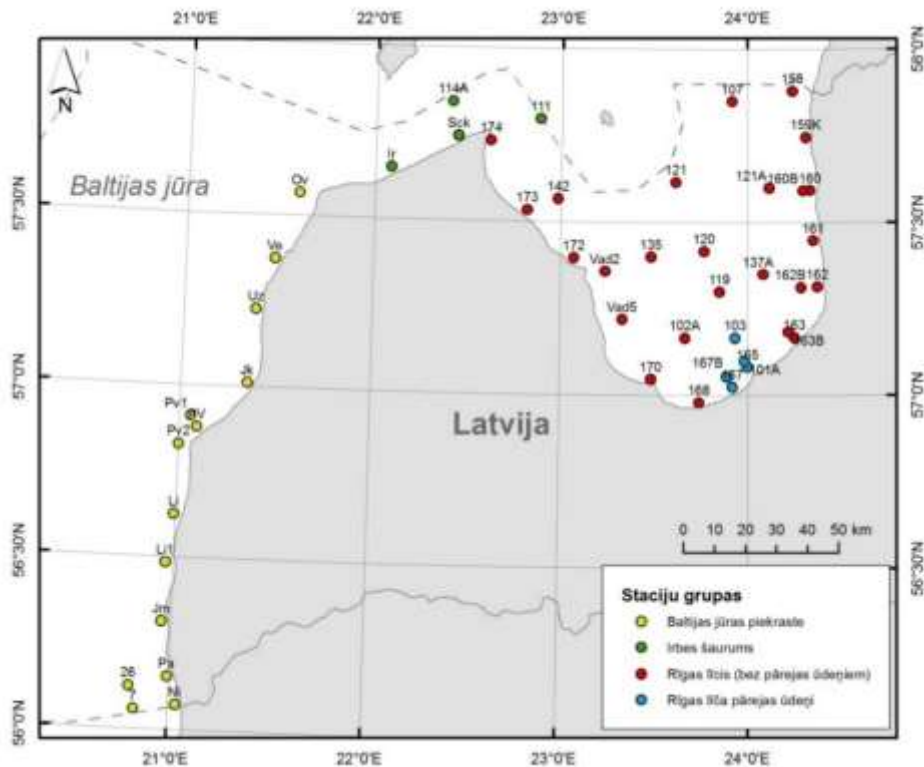
1.1. tabula. *Optisko parametru salīdzinājums dažādos Baltijas jūras reģionos (Kratzer, Moore, 2018).  $a_{CDOM}$  – krāsainās izšķīdušās vielas absorbcija 440 nm (apgrieztā metra mērvienībā (reciprocal meter)),  $SD$  - Seki dziļums (Secchi depth)*

Baltijas jūras daļa	Chl-a $\mu\text{g L}^{-1}$	SPM $\text{g m}^{-3}$	$a_{CDOM}$ $\text{m}^{-1}$	SD m	References
Arkona jūra	0.3–7.0	0.7–9.0	0.2–0.4	5.0–9.5	(Ohde et al., 2007, Fleming-Lehtinen, Laamanen, 2012)
Bornholmas jūra	0.4–4.0	0.4–5.0	0.2–0.3	2.0–10.5	(Ohde et al., 2007)
Gotlandes baseins	0.2–4.0	3.0–6.0	0.2–0.4	3.0–10.0	(Ohde et al., 2007)
Pomerānijas līcis	0.4–13.0	0.5–20.0	0.2–0.9	3.0–7.0	(Ohde et al., 2007, Kowalczyk et al., 2005, Wasmund et al., 2001)
Gdaņskas līcis	0.4–72.6	0.4–15.7	0.4–4.4	4.5–7.0	(Kowalczyk et al., 2005, Wasmund et al., 2001, Wozniak et al., 2011)
DA Baltijas jūra, Lietuvas krasts	0.6–116.2	1.1–32.0	0.01–2.0	4.0–6.0	(Wasmund et al., 2001, Vaičiūtė et al., 2012)
Pērnavas līcis	0.7–10.7	5.0–24.3	0.6–3.7	0.5–4.3	(Alikas et al., 2012, Alikas et al., 2015)
Rīgas līcis	2.0–46.0	10.0–24.0	1.5–13.0	3.1–6.9	(Fleming-Lehtinen, Laamanen, 2012, Raag et al., 2014, Toming et al., 2009)
Somu līcis	1.2–130	0.8–20.0	0.6–1.2	1.8–4.0	(Vazyulya et al., 2014, Koponen et al., 2007)
Rietumu Gotlandes baseins	0.4–52.4	0.5–21.7	0.3–4.1	0.7–12.8	(Kratzer, Tett, 2009)

### 1.1.2. Datu pieejamības raksturojums

#### 1.1.2.1. Sentinel-3 datu un produktu pieejamība

Latvijas jūras ūdeņu eitrofikācijas raksturošanai un vides stāvokļa novērtēšanas koncepta izstrādei, izmantojot Sentinel-3 satelītu iegūtos datus un to produktus, apkopoti un testēti dati periodā no 2018. gada līdz 2021. gada augustam. Bez Sentinel-3 hlorofila-a produkta (turpmāk: CHL\_NN) un kopējā suspendēto daļiņu produkta (turpmāk: TSM\_NN) analizē iekļauti *in situ* mērījumi, kas veikti ar zondi (turpmāk: CTD), un spektrofotometriski noteiktās hlorofila a (turpmāk: Chl-a) un izšķīdušās organiskās vielas koncentrācijas (turpmāk: DOC), kā arī Seki dziļums, kas izmantots kā ūdens optisko īpašību aprakstošs parametrs. Apkopoti dati no visām Latvijas nacionālā monitoringa stacijām (*1attēls*), kas sakrīt ar Sentinel-3 CHL\_NN un TSM\_NN pieejamību.



1.1.attēls. Baltijas jūras un Rīgas līča monitoringa staciju tīkls in situ lauku mērījumu un satelītmērījumu hlorofila koncentrāciju salīdzināšanai

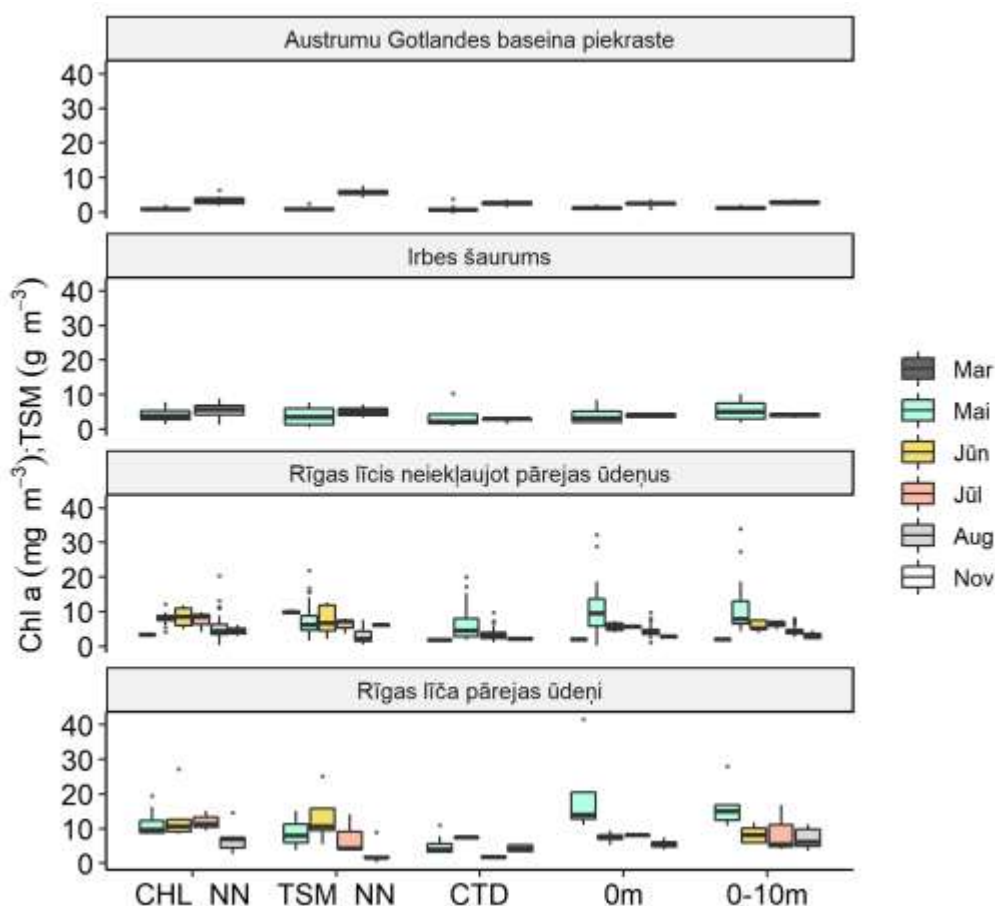
CHL\_NN, TSM\_NN var nebūt pieejami mākoņainības dēļ, kā arī Saules gaismas atspīduma dēļ, tādējādi satelītdatos tiek norādīta to kvalitāte kā zema (ja apzīmēti ar 'maskām', piemēram, mākonis (*cloud*), mākoņa mala (*cloud border*), mākoņa ēna (*cloud shade*), saules atspīdums (*sun glare*)) vai neesoša (ja apzīmēta kā NA vērtība). Kopumā iegūti 145 datu punkti. Datu kopa lielākoties reprezentē Rīgas līci, savukārt Austrumu Gotlandes baseina piekrasti raksturo 25 mērījumu kopas (1.2. tabula).

1.2. tabula. Datu rindu skaits katram analizētajam Baltijas jūras reģionam

Baltijas jūras apakšbaseins	Ūdens reģions	Datu kopu skaits
Austrumu Gotlandes baseins	Austrumu Gotlandes baseina piekraste	25
Rīgas līcis	Irbes šaurums	8
Rīgas līcis	Rīgas līcis (neiekļaujot pārejas ūdeņus)	90
Rīgas līcis	Rīgas līča pārejas ūdeņi	22

Apskatot datu sezonālo pieejamību pa parametriem (1.1.2. attēls), redzams, ka Irbes šaurumā un Austrumu Gotlandes baseina piekrastē iespējams analizēt vien maija un augusta datus, kas kopumā nedos informāciju par sezonālo mainību satelītdatu pielietojamības potenciālam kā eitrofikācijas indikatoram. Savukārt Rīgas līcis ir apsejots regulārāk (tā vienkāršākās pieejamības dēļ), ietverot arī atsevišķu projektu datus ("Virszemes ūdeņu monitorings piekrastes pārejas un teritoriālajos ūdeņos",

„Zināšanu uzlabošana par jūras ekosistēmu, jūras vides stāvokli un to ietekmējošām slodzēm”) sniedzot iespēju, tos analizēt arī sezonālā griezumā.



1.2. attēls. Sentinel-3 OLCI Level2 produkta hlorofila (CHL\_NN), suspendētā materiāla (TSM\_NN) un lauku in situ mērījumu datu izkliede

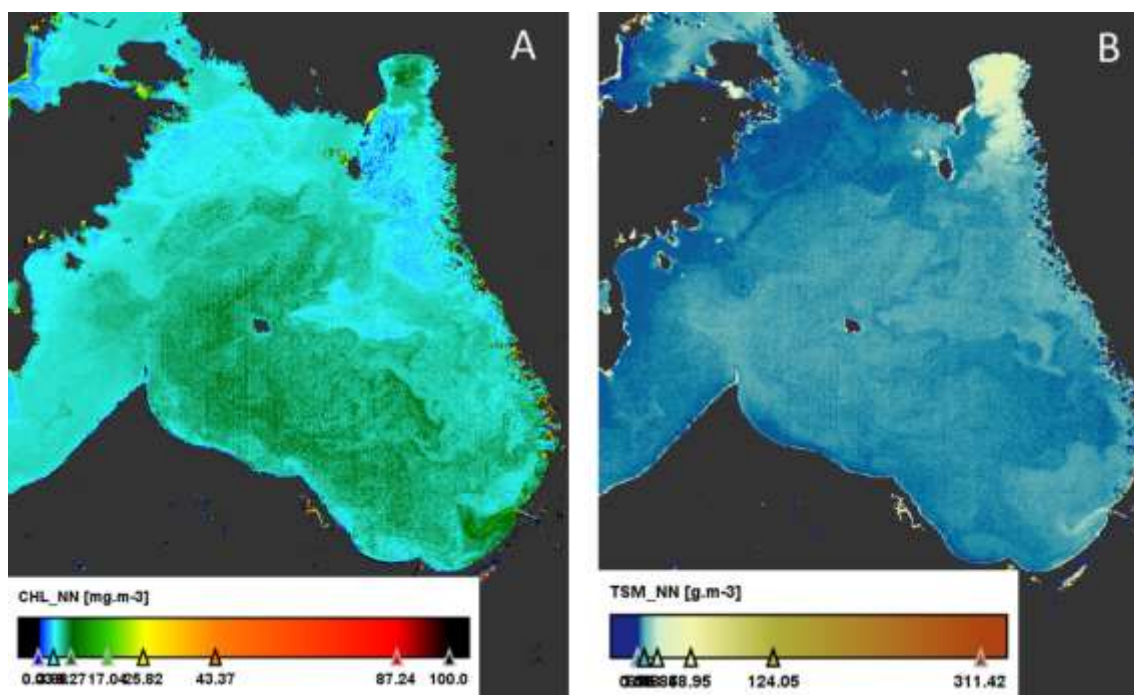
In situ dati iegūti izmantojot dažādas metodes: 1) zondes mērījumi 1 m dziļumā (CTD); 2) virskārtas paraugošana (0m); 3) integrētā truba 0-10m virskārtas paraugošanai (0-10m).

Sezonālais aspekts Baltijas jūras optiskajiem apstākļiem ir būtisks, jo tas var dot nozīmīgu ietekmi satelītdatu produktu izmantošanā. Baltijas jūrai ir raksturīgas divas atšķirīgas fitoplanktona sezonas – diatomu dominējošā pavasara ziedēšana un cianobaktēriju ziedēšanas periods vasaras beigās un rudens sākumā (Wasmund, 1994). Optiskie parametri šīm divām sezonām ir ļoti atšķirīgi un, apstrādājot šos datus, nevar izmantot vienus un tos pašus tālīzpētes algoritmus (Simis et al., 2017, Ligi et al., 2017, Toming et al., 2017). Hlorofila a novērtētās koncentrācijas iegūšanai varētu izmantot algoritmus, kas speciāli ir radīti konkrētajai sezonai. Specializētie sezonālie algoritmi sniegtu vislabākos rezultātus Baltijas jūrai, bet atsevišķiem Baltijas jūras apakšbaseiniem ir iespējams arī atrast tādu joslu algoritmus, kas strādātu un varētu tikt izmantoti visu gadu (Ligi et al., 2017).

Baltijas jūras optiski sarežģītie ūdeņi ir arī iemesls, kāpēc Copernicus jūras vides monitoringa serviss (CMEMS – Copernicus Marine Environment Monitoring Services) nav spējis izstrādāt okeāna krāsas



produktus, kas labi korelētu ar *in situ* datiem (Toming et al., 2017). Bet, ņemot vērā visus optiskos sarežģījumus, no Sentinel-3 datiem tomēr var iegūt salīdzinoši labus satelītdatus atklātajos Baltijas jūras ūdeņos, vai skatoties kādu reģionu atsevišķi (Toming et al., 2017). Kā piemērs Sentinel-3 datu iespējam satelītprodukts (1.1.1. attēls).



1.1. attēls. Sentinel-3 satelītproduktu piemērs (izšķirtspēja 300×300m)

A) CHL\_NN produkts – hlorofila a aplēse; B) TSM\_NN produkts – kopējo suspendēto daļiņu aplēse. Attēli no 2021.gada 5.augusta; lejuplādētas no <https://coda.eumetsat.int/#/home>; apstrādātas SNAP programmā.

#### 1.1.2.2. Sentinel-2 datu pieejamība un apstrāde

Piekrastes ūdeņos kā papildus informāciju var izmantot datus no Sentinel-2 satelīta, kas ir paredzēts sauszemes datu ievākšanai. Sentinel-2 nodrošina līdzīgus joslu parametrus (spektrālās joslas pīķa augstums sasniedz 700-710 nm), kurus var veiksmīgi izmantot hlorofila aprēķināšanas algoritmos un noteikt hlorofila dinamikas aplēses piekrastes un citās seklās zonās ar 20 m izšķirtspēju (Ligi et al., 2017). Hlorofila dati no Sentinel-2 ir analizēti reģiona iekšzemes ezeros (Ansper & Alikas, 2018; Grendaitė et al., 2018; Soomets et al., 2020), bet to izmantošanas potenciāls piekrastes ūdeņos vēl ir jātestē.

Tā kā Sentinel-2 satelīti nodrošina datus Baltijas jūras reģionam vienu reizi 4-5 dienās, tad ievērojami samazinās pieejamais datu apjoms (kopā 14 novērojumi Rīgas līča ūdeņiem, neiekļaujot pārejas ūdeņus). Jānorāda, ka Sentinel-2 dati atlasīti 2020. un 2021.gadam. Sentinel-2 pieejamie dati nesniedz tiešu hlorofila a aplēsi, tāpēc izmantoti 25 algoritmi (1. Error! Reference source not found.. tabula), kas v

eidoti dažādām (lielākoties saldūdens) ūdenstīpēm hlorofila a dinamikas novērtēšanai (piemēram, 1.1.2. attēls).

### 1.1.3. Testēšana

#### 1.1.3.1. Hlorofila a novērtēšanas metožu savstarpējās sakarības

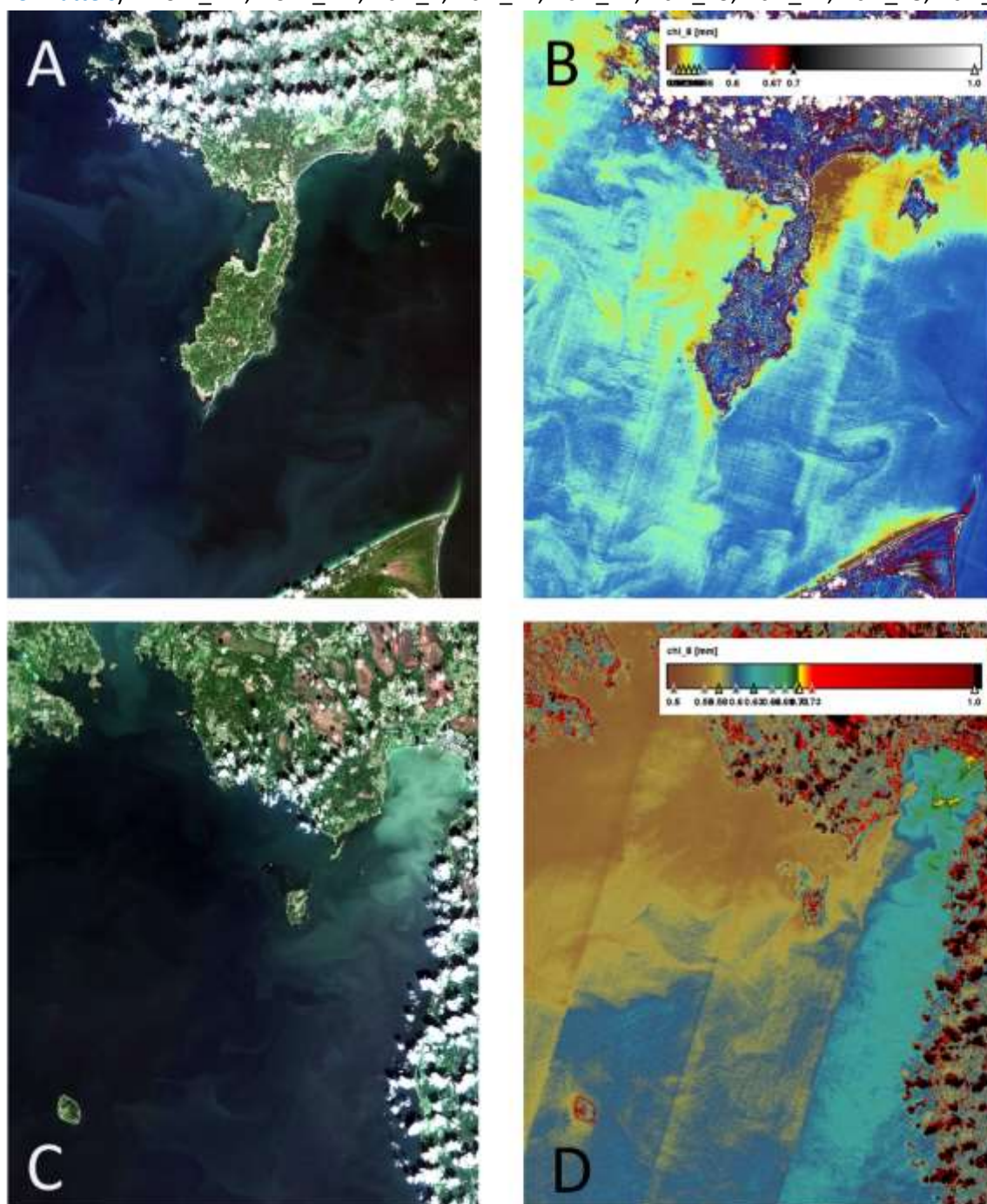
Izvērtējot hlorofila a *in situ* vērtību un Sentinel-3 un Sentinel-2 datu tiešo lineāro korelāciju, secināts, ka atsevišķi Sentinel-2 datu empīriskie algoritmi neatspoguļo Rīgas līča hlorofila a dinamiku (1.1.3. attēls). Savukārt visas trīs *in situ* metodes ir savstarpēji salīdzināmas, kā arī vāji, bet statistiski pozitīvi korelējošas ar CHL\_NN produktu, un vienlīdz vāji un pozitīvi korelējošas ar TSM\_NN produktu, kas norāda uz Rīgas līča ūdens krāsas ietekmi uz Sentinel-3 algoritmu limitējošo spēju izdalīt TSM no CHL.

**1.3. tabula. Izmantotie empīriskie algoritmi Sentinel-2 multispektrālo datu pārrēķinam uz hlorofilu raksturojošām datu rindām.** RXXX atspoguļo Sentinel-2 multispektrālā instrumenta nomērīto gaismas atspīdumu noteiktā XXX viļņu garumā. XXX norādīts nanometros, piemēram, R443 ir atstarošanās intensitāte viļņiem ar garumu 443nm. Boldā atzīmēti algoritmi, kas izvēlēti tālākai izvērtēšanai, pamatojoties uz korelācijas analīzi (1.1.3. attēls). \* - algoritmi, kas uzrādīja visciešāko lineāro sakarību ar *in situ* hlorofila a vērtībām Rīgas līča ūdeņos (neiekļaujot pārejas ūdeņus)

Algoritma raksturojums	Saīsinājums	References
<i>R443/R560</i>	chl_1	Chavula et al., 2009
<i>R490/R443</i>	chl_2	Salem et al., 2017
<i>R490/R560</i>	chl_3	Salem et al., 2017
<i>(R490-R665)/(R560 - R665)</i>	chl_4	Salem et al., 2017
<i>(R490-R443)/(R490 + R443)</i>	chl_5	Salem et al., 2017
<i>(R443<sup>-1</sup> - R490<sup>-1</sup>) × R560</i>	chl_6	Salem et al., 2017
<b><i>(R740/R705) - (R740/R665)</i></b>	<b>chl_7*</b>	Zimba et al., 2006
<i>R665/R560</i>	chl_8	Matthews et al., 2010
<i>R665<sup>-1</sup>/R783</i>	chl_9	Moses et al., 2009
<i>R665<sup>-1</sup>/R740</i>	chl_10	Moses et al., 2009
<b><i>R665<sup>-1</sup> × R705</i></b>	<b>chl_11</b>	Moses et al., 2009
<b><i>R665<sup>-1</sup>/R705<sup>-1</sup></i></b>	<b>chl_12</b>	Gitelson et al., 2009
<b><i>(R665<sup>-1</sup>/R705<sup>-1</sup>) × R740</i></b>	<b>chl_13</b>	Gitelson et al., 2009
<b><i>(R665<sup>-1</sup>/R705<sup>-1</sup>) × R783</i></b>	<b>chl_14</b>	Gitelson et al., 2009
<i>(R665<sup>-1</sup> - R705<sup>-1</sup>) / (R740<sup>-1</sup> - R705<sup>-1</sup>)</i>	chl_15	Zhang et al., 2014
<i>R705 - (R665 + R740)/2</i>	chl_16	Toming et al., 2017
<i>R705/R665</i>	chl_17	Moses et al., 2009
<b><i>R740 × (R665<sup>-1</sup> - R705<sup>-1</sup>)</i></b>	<b>chl_18*</b>	Zimba et al., 2006
<i>R705 / (R560 + R665)</i>	chl_19	Koponen et al., 2007
<b><i>(R705<sup>-1</sup> - R665<sup>-1</sup>) / (R705<sup>-1</sup> + R665<sup>-1</sup>)</i></b>	<b>chl_20</b>	Moses et al., 2009
<i>R740/R665</i>	chl_21	Moses et al., 2009
<i>(R760/R800)/(R690/R720)<sup>-1</sup></i>	sen2r_chlRedEdge	Ranghetti et al., 2020

Atsevišķi empīriskie algoritmi savstarpēji ir cieši saistīti (piemēram, 1.1.3. attēls: chl\_11, chl\_12, chl\_13, chl\_14), norādot uz to nediferencēto sniegumu Rīgas līča ūdeņos, jo visticamāk radīti kādam konkrētam mērķim konkrētā reģionā. Jāuzsver, ka CHL\_NN nekorelē ne ar vienu Sentinel-2 datus

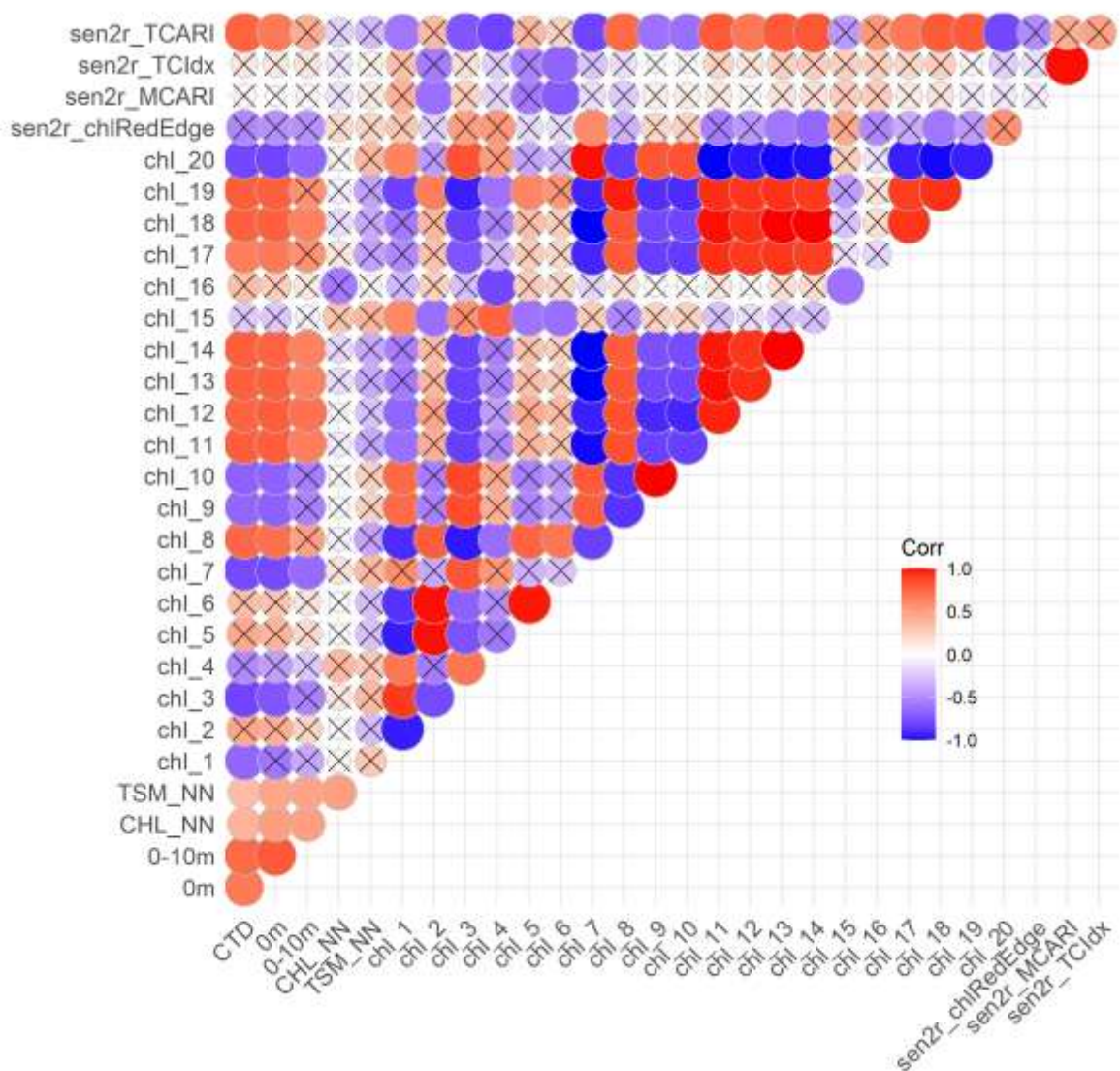
balstīto algoritmu rezultātiem, līdz ar to var spriest, ka Sentinel-3 un Sentinel-2 multispektrālie dati (un to produkti) reaģē uz atšķirīgiem signāliem. Turpmākā analizē iekļautas tālzpētes metodes/algoritmi, kuru hlorofila a aplēses korelē ar visām trim *in situ* metodēm (CTD, 0m, 0-10m; 1.1.3. attēls): TSM\_NN, CHL\_NN, chl\_7, chl\_11, chl\_12, chl\_13, chl\_14, chl\_18, chl\_20.



1.2. attēls. Sentinel-2 satelītattēla piemērs (izšķirtspēja 20×20m)

A,B ) Irbes šaurums ; C,D) Rīgas līča ziemeļu daļa, Pērnavas līcis. A,C) RGB attēli; B,D) Sentinel-2 multispektrālie dati pārrēķināti kā piemēru izmantojot chl\_8 algoritmu (1.3. tabula); chl\_8 vērtības nav lasāmas kā tieša hlorofila a aplēse, bet gan tās dinamikas rādītājs. Attēli no 2021.gada 5.augusta; lejuplādētas no <https://ehdatahub.maaamet.ee/dhus/#/home>; apstrādātas SNAP programmā.





**1.3. attēls. Pīrsona korelācijas matrica starp visiem hlorofila a dinamiku raksturojošiem parametriem**

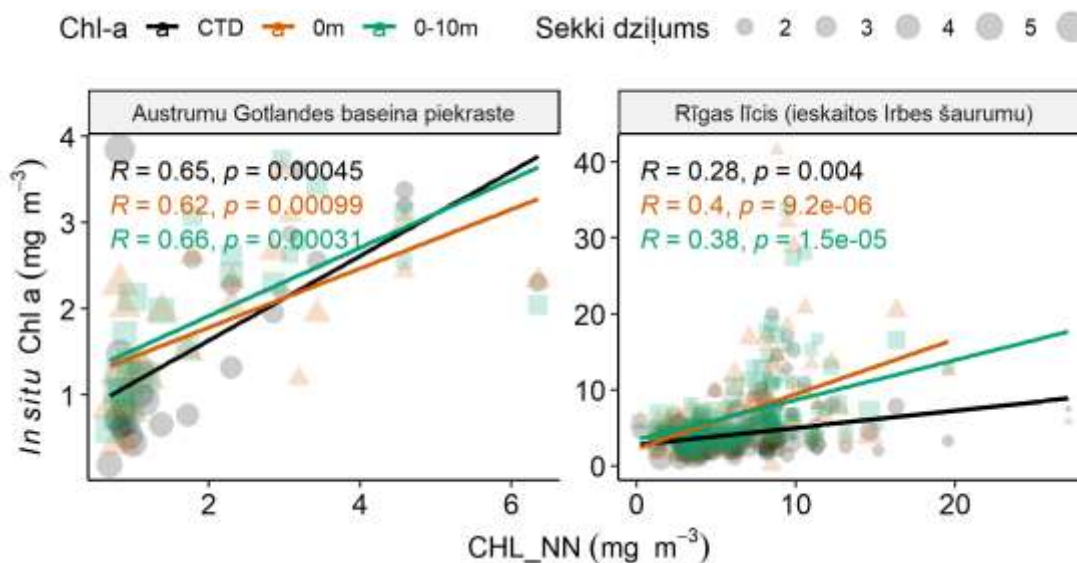
Empīrisko algoritmu saīsinājumus skatīt **1.Error! Reference source not found. tabulā**. CTD – in situ z ondes mērījumi (fluorescences metode); 0m – ūdens virskārtas in situ mērījumi (spektrofotometrija); 0-10m – virsējo 10m integrētā in situ vērtība (spektrofotometrija); CHL\_NN – Sentinel-3 L2 hlorofila produkts. Korelācijas koeficienta vērtība atspoguļota krāsu skalā no –1 (zils) līdz 1 (sarkans); statistiski nebūtiskās sakarības pārsvītrotas ar x.

Visi Sentinel-2 algoritmi, kas uzrādīja korelāciju ar *in situ* hlorofila a vērtībām Rīgas līcī, ir balstīti uz sarkanās gaismas spektra atstarošanās mērījumiem (viļņu garums 665-783 nm), apliecinot Toming et al. (2017) rezultātus reģionam. Jānorāda, ka chl\_11, chl\_12, chl\_13 un chl\_14 algoritmi savstarpēji cieši pozitīvi korelē ( $r > 0.92$ ,  $p < 0.001$ ), kā rezultātā visticamāk reaģē uz vienādiem signāliem un uzrāda nediferencētu sniegumu Rīgas līča ūdeņos.

### 1.1.3.2. Hlorofila a novērtēšanas metožu reakcija uz vides signāliem

#### 1.1.3.2.1. Reģionālie aspekti

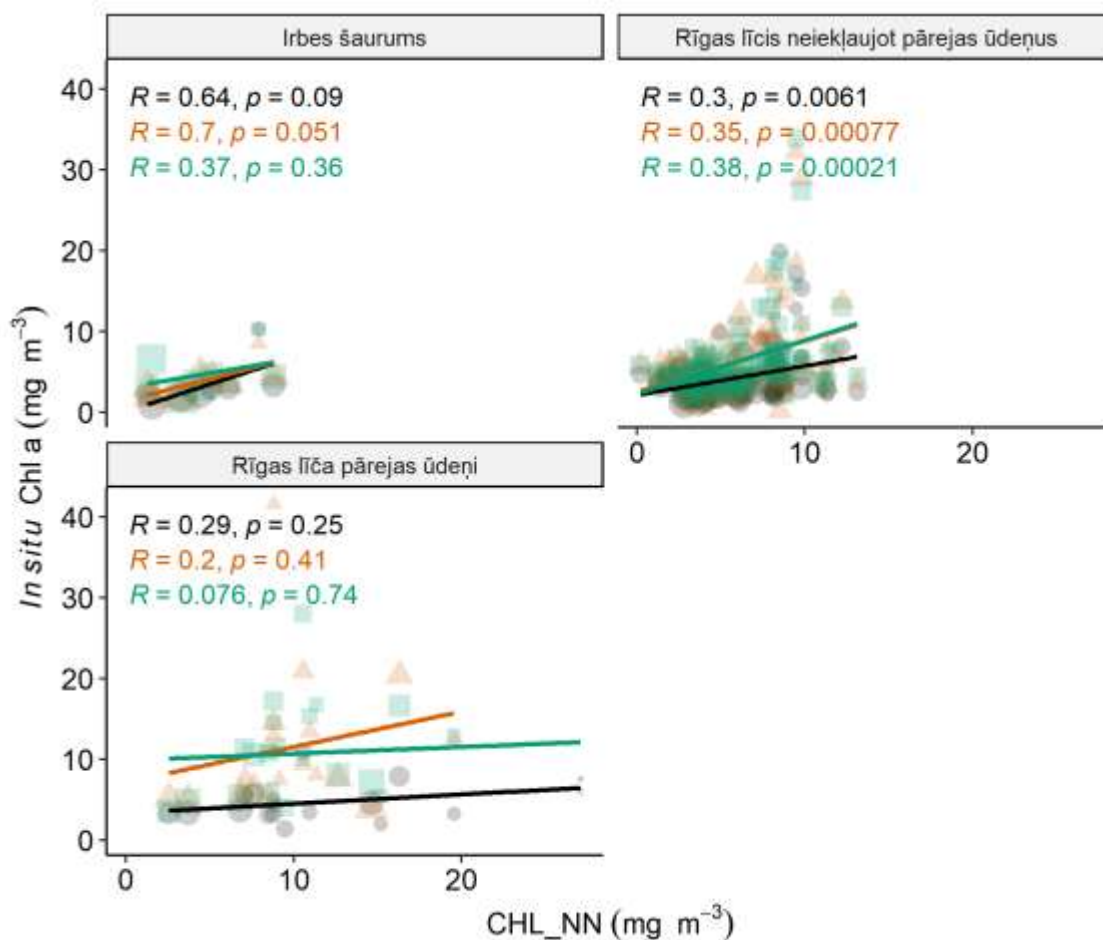
Lineārās regresijas modelis rāda spēcīgu saistību starp CHL\_NN un *in situ* vērtībām neatkarīgi no to ievākšanas metodes Austrumu Gotlandes baseina piekrastē. Savukārt Rīgas līča ūdeņos vizzemāko sakritību saistībā ar CHL\_NN uzrāda CTD mērītās hlorofila a koncentrācijas 1 m dziļumā (1.1.4. attēls;  $p = 0.004$ ). Izteikti redzamas arī atšķirības starp optiskajām īpašībām (caurredzamību) starp Austumu Gotlandes baseina piekrastes un Rīgas līča ūdeņiem.



1.4. attēls. Salīdzinājums starp Sentinel 3 OLCI Level2 produkta aprēķināto hlorofila koncentrāciju (CHL\_NN) un lauku mērījumiem (y ass, sk. leģendu: CTD – zondes hlorofila a mērījumi 1 m dziļumā; 0m – virskārtas hlorofila a koncentrācija; 0-10m - 0-10m virsējā slāņa vidējā hlorofila a koncentrācija). Attēloti Pīrsona korelācijas koeficienti.

Austrumu Gotlandes piekrastes ūdeņos kopumā novērotas zemākas hlorofila a koncentrācijas (1.1.4. attēls, pievērst uzmanību atšķirīgajām Y-ass skalām), kā arī Seki dziļums lielākoties ir dziļāks par 3 m. Rīgas līcī hlorofila a koncentrācijas sasniedz pat  $40 \text{ mg m}^{-3}$ , un Seki dziļums nereti ir mazāks par 3 m, kam par iemeslu ir gan augstās hlorofila a koncentrācijas, gan spēcīgās saldūdens ietekmes. Saldūdens ieplūdes ietekme uz Rīgas līča ūdens optiskajām īpašībām labi redzama 1.4. attēla C bildē, kur Sentinel-2 satelīts piefiksējis Pērnavas līča ūdens atšķirības ar Rīgas līča ziemeļu daļas atklātajiem ūdeņiem.

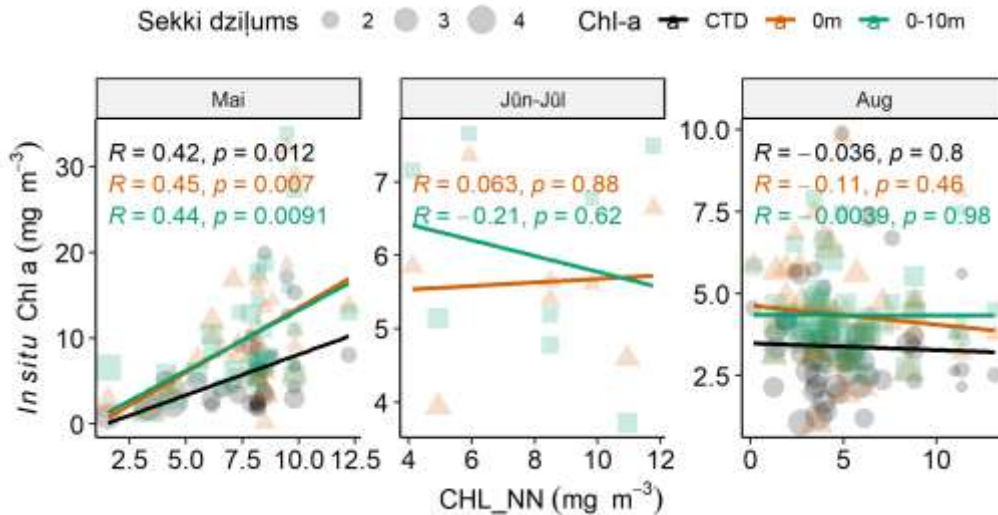
Rīgas līča reģionālās izmaiņas Sentinel-3 CHL\_NN un *in situ* hlorofila a vērtību saistību sakritībā redzamas 1.7. attēlā Rīgas līča pārejas ūdeņos (teritorija Rīgas līča dienvidu daļā; Daugavas, Gaujas, Lielupes noteces tiešā ietekmē) tālīzpētes algoritms strādā ar vizzemāko precizitāti. Irbes šauruma un Rīgas līča pārējie ūdeņi (neiekļaujot pārejas ūdeņus) uzrāda arī statistiski būtisku saistību starp CHL\_NN un *in situ* vērtībām (1.1.5. attēls), līdz ar to turpmākā analīze veikta tikai šiem ūdens reģioniem, tos apvienojot.



1.5. attēls. Salīdzinājums starp Sentinel 3 OLCI Level2 produkta aprēķināto hlorofila koncentrāciju (CHL\_NN) un lauku mērījumiem (y ass, sk. leģendu: CTD – zondes hlorofila a mērījumi 1 m dziļumā; 0m – virskārtas hlorofila a koncentrācija; 0-10m - 0-10m virsējā slāņa vidējā hlorofila a koncentrācija). Attēloti Pīrsona korelācijas koeficienti. Leģenda kā 1.3. attēlā.

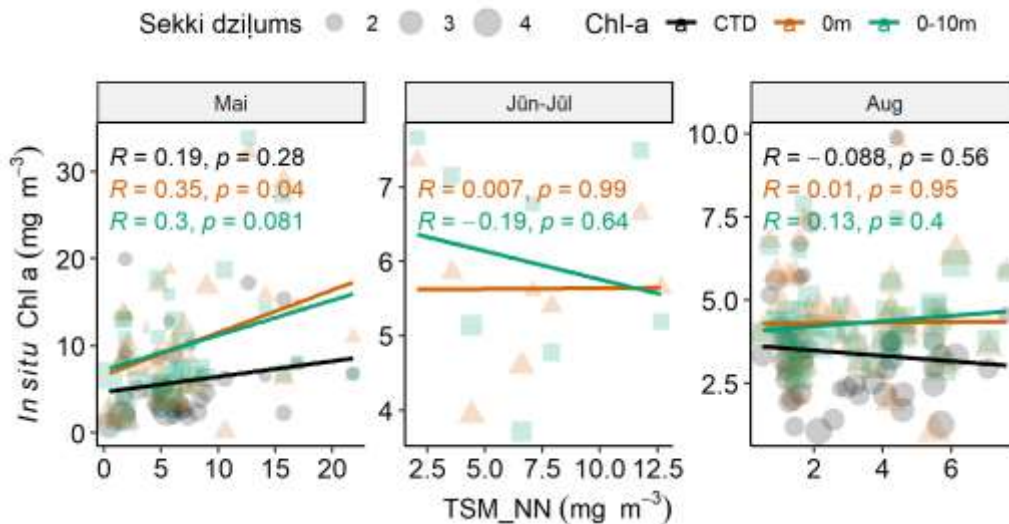
#### 1.1.3.2.2. Sezonālie aspekti

Apskatot CHL\_NN sakritību ar *in situ* hlorofila a vērtībām, redzams, ka vienīgi pavasara periodā novērojama cieša korelācija (1.1.6. attēls), savukārt TSM\_NN produkts vispār neuzrāda saistību ar hlorofila *in situ* vērtībām (1.1.7. attēls). Vasaras mēnešu (augusts) hlorofila a vērtību atspoguļojums Sentinel-3 produktā CHL\_NN uzlabojas tikai nedaudz, iekļaujot Seki dziļumu kā mainīgo (kategorizējot datu kopu divās grupās: Seki ≤ 2.5m un Seki > 2.5m), norādot uz īpaši problemātiskiem ūdeņiem, ja Seki lielāks par 2.5m (1. Error! Reference source not found.. tabula).



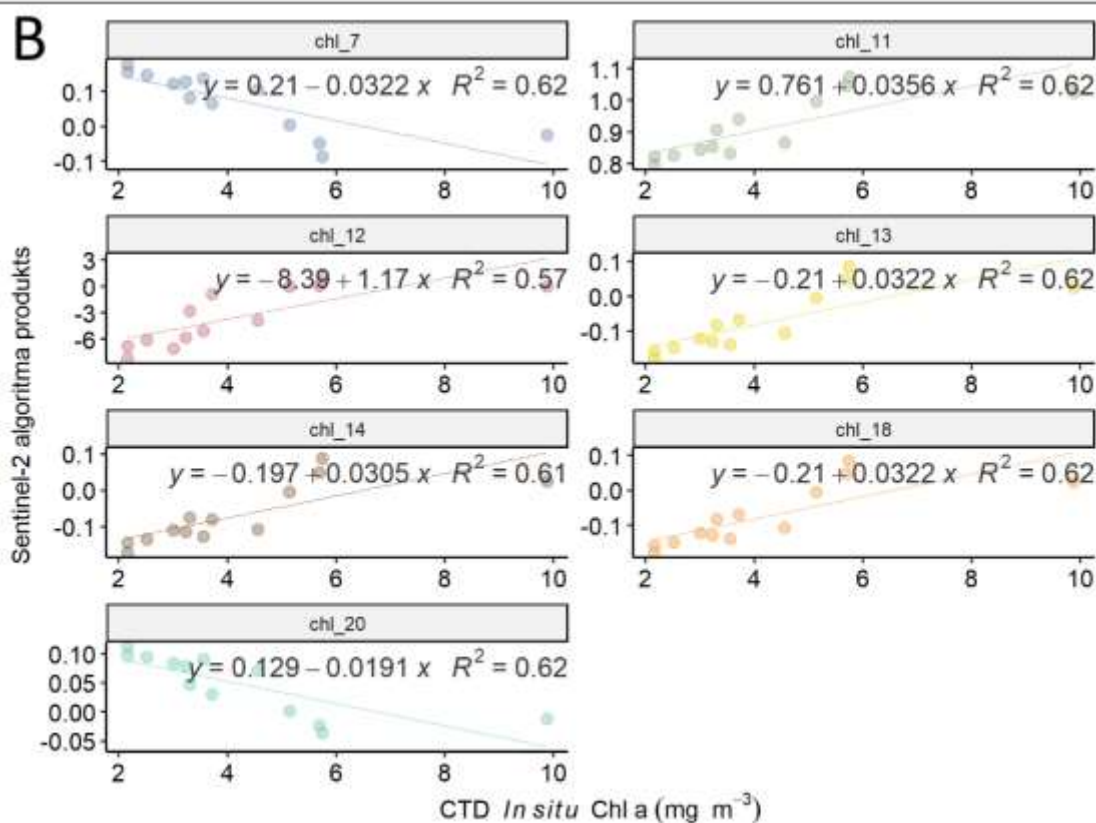
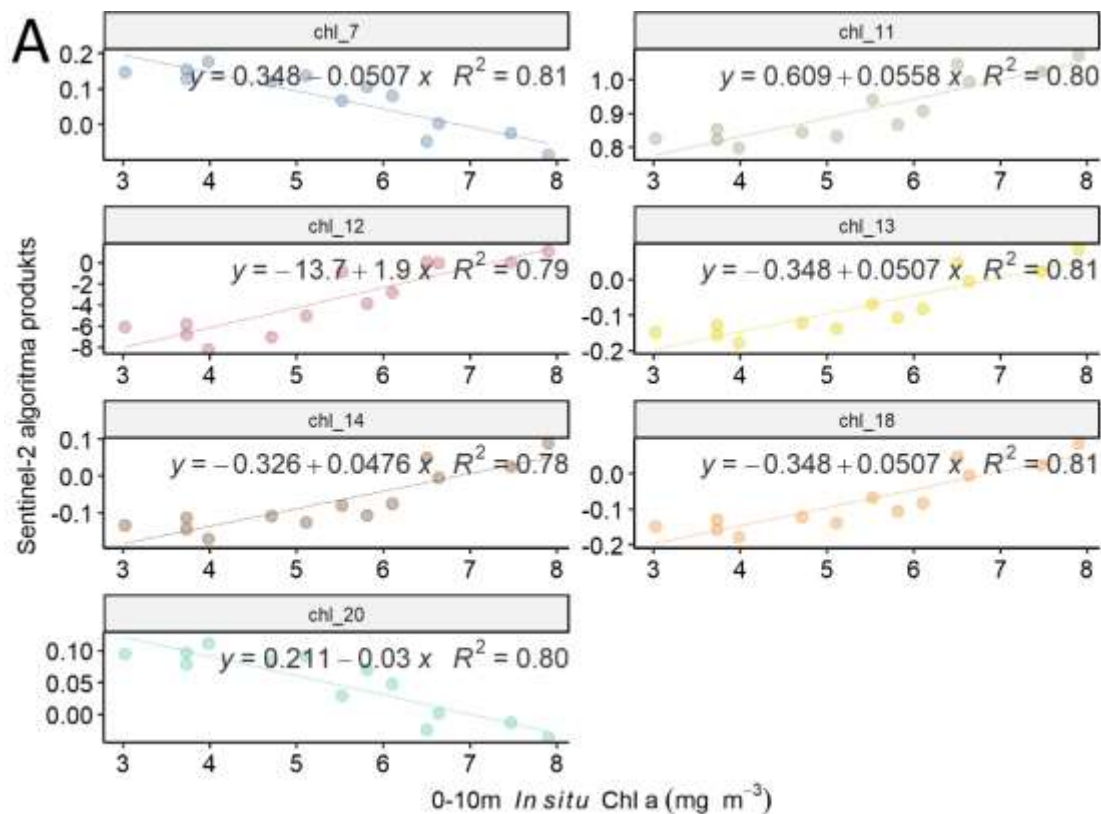
1.6. attēls. Salīdzinājums starp Sentinel 3 OLCI Level2 produkta aprēķināto hlorofila koncentrāciju (CHL\_NN) un in situ mērījumiem (y ass, sk. leģendu: CTD – zondes hlorofila a mērījumi 1 m dziļumā; 0m – virskārtas hlorofila a koncentrācija; 0-10m - 0-10m virsējā slāņa vidējā hlorofila a koncentrācija) Rīgas līča (neiekļaujot pārejas ūdeņus) reģionam. Attēloti Pīrsona korelācijas koeficienti.

Ligi et al. (2017) konstatēja līdzīgu dinamiku Sentinel-3 multispektrālo datu un vides hlorofila a koncentrāciju sakrītībai Baltijas jūras austrumu daļā, par iemeslu minot Sentinel-3 nepiemēroti zemo izšķirtspēju (300×300m), kas limitē sensoru iespēju fiksēt hlorofila a koncentrācijas cianobaktēriju masveida savairošanās laikā.



1.7. attēls. Salīdzinājums starp Sentinel 3 OLCI Level2 produkta aprēķināto hlorofila koncentrāciju (TSM\_NN) un in situ mērījumiem (y ass, sk. leģendu: CTD – zondes hlorofila a mērījumi 1 m dziļumā; 0m – virskārtas hlorofila a koncentrācija; 0-10m - 0-10m virsējā slāņa vidējā hlorofila a koncentrācija) Rīgas līča (neiekļaujot pārejas ūdeņus) reģionam. Attēloti Pīrsona korelācijas koeficienti.





1.8. attēls. Salīdzinājums starp Sentinel 2 multispektrālo datu aprēķinātajām hlorofila a aplēsēm un *in situ* mērījumiem A) integrētā parauga hlorofila a vērtība; B) virsējā slāņa CTD 1m dziļumā hlorofila vērtība. Attēlota lineārās regresijas līkne un determinācijas koeficients.



1.4. tabula. Salīdzinājums starp Sentinel 3 OLCI Level2 produkta aprēķināto hlorofila koncentrāciju (CHL\_NN) un in situ mērījumiem (CTD – zondes hlorofila a mērījumi 1 m dziļumā; 0m – virskārtas hlorofila a koncentrācija; 0-10m - 0-10m virsējā slāņa vidējā hlorofila a koncentrācija) no augusta mēneša Rīgas līča (neiekļaujot pārejas ūdeņus) reģionam. Attēloti Pīrsona korelācijas koeficienti.

<i>in situ</i> metode	Seki ≤ 2.5m	Seki > 2.5m
CTD	R= -0.540, p= 0.069	R= 0.070, p= 0.670
0m	R= -0.550, p= 0.061	R= -0.150, p= 0.360
0-10m	R= -0.003, p= 0.044	R= -0.060, p= 0.720

Izšķirtspējas uzlabošanai testēta Sentinel-2 (izšķirtspēja 20×20m) vasaras (augusta) datu kopai (n=13). Analīzei izvēlēti algoritmi, kas uzrādīja statistiski būtisku korelāciju ar visām trīs *in situ* metodēm iegūtajiem datiem (1. Error! Reference source not found.. tabula; 1.1.3. attēls). Visi izvēlētie algoritmi uzrāda lineāru sakritību ar *in situ* hlorofila vērtībām (1.1.8. attēls) gan salīdzinot tos ar integrētā (0-10m) hlorofila a vērtībām (determinācijas koef.  $R^2 \geq 0.78$ ), gan ar virskārtas mērījumiem, kas ievākti ar zondi (determinācijas koef.  $R^2 \geq 0.57$ ; gandrīz identiskas sakarības iegūtas arī ar spektrofotometriski iegūtajām vērtībām no virskārtas, bet nav attēlotas).

Integrētā slāņa (0-10 m) hlorofila a vērtību dinamika visprecīzāk atspoguļota chl\_7 un chl\_18 algoritmos ( $R^2 = 0.81$ ), kas ir arī ar visaugstākajiem rādītājiem virskārtas mērījumos, tāpēc izvēlēti par potenciālajiem algoritmiem vasaras hlorofila a dinamikas novērtēšanai Rīgas līča ūdeņos (neiekļaujot pārejas ūdeņus). Abi šie algoritmi ietver trīs vienas un tās pašas spektrālās joslas (665 nm, 705 nm, 740 nm), kas atbilst B4, B6 un B7 spektrālajām joslām Sentinel-2 MSI instrumentam. Tomēr, jānorāda, ka matemātiski abi šie algoritmi ir identiski, tikai viens rezultējas ar + zīmi un otrs ar – zīmi, kā rezultātā nav jēgpilni iekļaut abus algoritmus novērtējumā; tiek izvēlēts chl\_7 algoritms kā rezultējoši vislabāk raksturojošais Rīgas līča vasaras (augusta) hlorofila a dinamikai.

#### 1.1.4. Rīgas līča vides stāvokļa novērtēšanas indikatora koncepts

##### 1.1.4.1. Datu iegūšana

Datu iegūšana var tik veikta manuāli no ESA <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> lapas vai no Igauniju kūrētā <https://ehdatahub.maaamet.ee/dhus/#/home> arhīva, vai automātiski, izmantojot lejupielādes skriptus (pieslēdzoties caur API kādai no šiem URL). Attēlu apstrāde un nepieciešamo spektrālo joslu vērtības var tik iegūtas pusautomātiski, izmantojot SNAP programmas funkcionalitāti vai citas ĢIS platformas, vai automatizējot procesu, izstrādājot nepieciešamo aprēķinu skriptus kādā programmēšanas valodā. Iegūtās spektrālo joslu atstarošanās vērtības jāpārrēķina uz hlorofila a koncentrācijas aplēsi, izmantojot formulu (1) (skatīt 1. Error! Reference source not found.. tabulā chl\_7 algoritmu):

$$chl_{aplēse} = (B6/B5) - (B6/B4), \text{ kur} \quad (1)$$

B4 – 664.6 nm spektrālās joslas atstarošanās vērtība;

B5 – 704.1 nm spektrālās joslas atstarošanās vērtība;

B6 – 740.5 nm spektrālās joslas atstarošanās vērtība.

#### 1.1.4.2. GES robežvērtību noteikšana

HELCOM Core eitrofikācijas indikators Rīgas līcī novērtē hlorofila a vasaras koncentrāciju pret robežvērtību  $2.7 \text{ mg m}^{-3}$  (<https://helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/Chlorophyll-a-HELCOM-core-indicator-2018.pdf>). Šāda robežvērtība pielietojama arī izvērtējot eitrofikācijas līmeni, izmantojot satelītdatos balstīto hlorofila a koncentrācijas aplēsi. Lai robežvērtība būtu salīdzināma ar iegūto hlorofila a koncentrācijas aplēsi (kas aprēķināta pēc (1) formulas), robežvērtība jāpārrēķina pēc konstatētās šī algoritma (chl\_7) rezultējošās datu sakritības vienādojuma ar monitoringa *in situ* datiem (1.1.8. attēls A:chl\_7). Vienādojums robežvērtības pārrēķinam sekojošs:

$$\text{chl7GES} = 0.348 - 0.0507 x, \text{ kur} \quad (2)$$

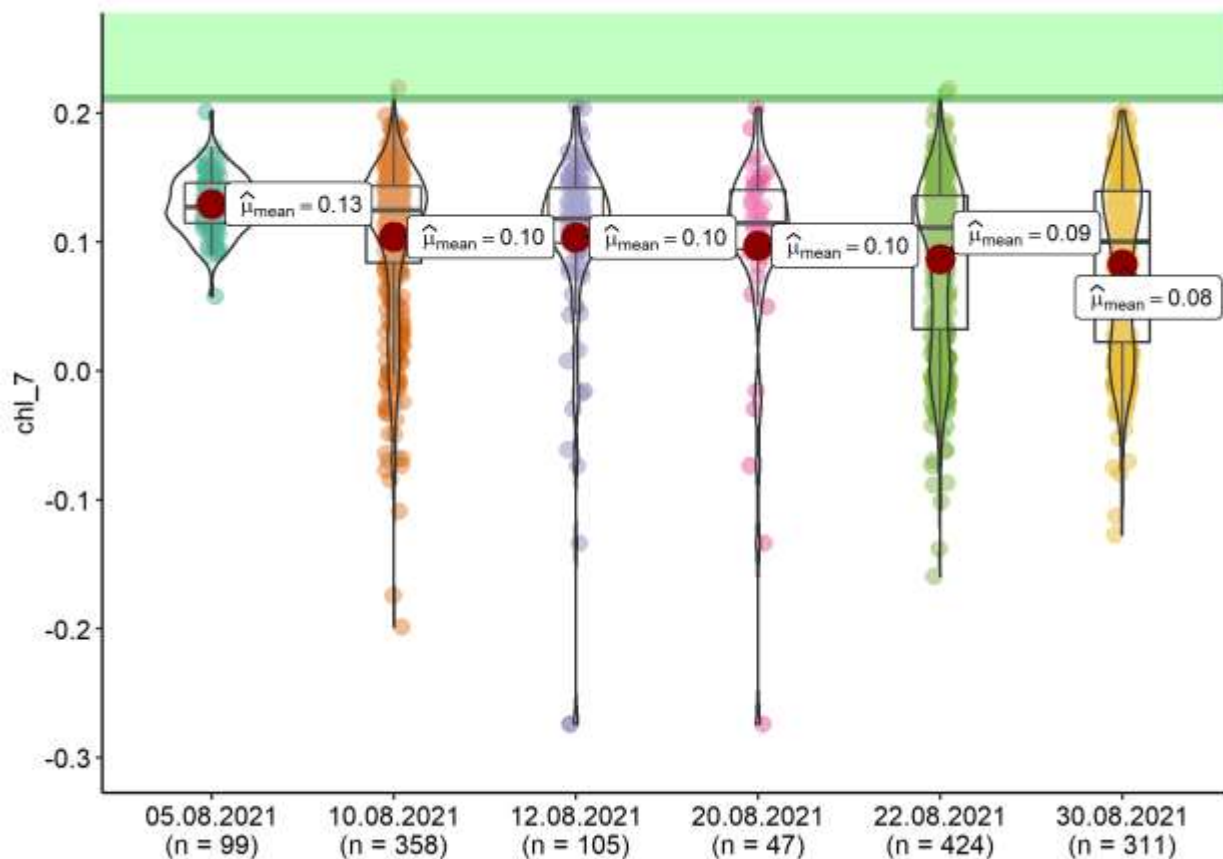
x – robežvērtība *in situ* datiem, t.i.,  $2.7 \text{ mg m}^{-3}$ .

Rezultējoši iegūstam GES robežvērtību novērtējumam, kas veikts pārrēķinot Sentinel-2 datus pēc chl\_7 algoritma; hlorofila koncentrācijas aplēsei jābūt  $> 0.211$ , lai Rīgas līcis tiktu atzīts labā vides stāvoklī.

#### 1.1.4.3. Rīgas līča vides stāvokļa novērtējums izmantojot 2021.gada augusta datus

Sentinel-2 multispektrālie dati no 2021. gada augusta izmantoti Rīgas līča eitrofikācijas indikatora koncepta izstrādei. Vērtības B4 (664.6 nm), B5 (704.1 nm) un B6 (740.5 nm) spektrālajām joslām apkopoti visam Rīgas līcim (izņemot pārejas ūdeņus), izmantojot koordinātu tīklu ( $1 \times 1 \text{ km}$ ). Satelītattēli manuāli lejupielādēti no <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Izmantojot SNAP programmas funkcionalitāti, iegūti B4, B5 un B6 spektra joslu dati, kas tālāk pārrēķināti uz hlorofila a aplēsi un apstrādāti ar R programmēšanas valodu R Studio platformā. Dati vizualizēti, izmantojot *ggplot2* (Wickham et al., 2016) un *ggstatsplot* (Patil, 2021) funkcionalitāti.

Sentinel-2 datus balstītā eitrofikācijas indikatora testēšanas rezultāti 2021.gada augustam atspoguļoti 1.1.9. attēlā. Redzams, ka kopumā Sentinel-2 dati pieejami sešos datumos ar atšķirīgu datu pieejamību. Tomēr vidējā vērtība nemainās ievērojami un svārstās robežās starp 0.08-0.13, kas ir mazāka nekā noteiktā GES vērtība (0.211), no kā var secināt, ka 2021.gada augusta eitrofikācijas stāvoklis Rīgas līcī (neiekļaujot pārejas ūdeņus) neatbilda “labam vides stāvoklim”.



1.9. attēls. Sentinel-2 datos balstītās hlorofila aplēses (izmantojot chl\_7 algoritmu; sk.1.Error! R eference source not found.. tabulu) datu izkliede. Boxplot grafika horizontālā strīpa reprezentē datu mediānu (ģeometrisko vidējo); sarkanais punkts un norādītās vērtības atspoguļo aritmētisko vidējo vērtību. Robežvērtība GES stāvoklim = 0.211 (tumši zaļā horizontālā taisne).

### 1.1.5. Rekomendācijas tālākai indikatora attīstībai

Lai pilnvērtīgi izmantotu Sentinel-3 satelītdatu produktus (piemēram, CHL\_NN, TSM\_NN), nepieciešams izvērstāk koncentrēties uz pavasara/vasaras sākuma periodu, kad fitoplanktona sabiedrībā nedominē cianobaktērijas (1.1.6. attēls). Potenciāli Sentinel-3 satelītdatu produktus varētu izmantot, novērtējot fitoplanktona pavasara ziedēšanas intensitāti, un izmantot kā izejas datus "Fitoplanktona pavasara ziedēšanas intensitātes indeksa" aprēķinam. Šis potenciāls būtu jāizvērtē atsevišķā datu analizē.

Šajā testēšanā izmantotais algoritms rāda lielu potenciālu Rīgas līča eutrofikācijas novērtēšanā, tomēr, lai uzlabotu rezultātu ticamību, būtu vēl jāizstrādā datu kvalitātes pārbaudes darba plūsmu, izvērtējot katra konkrētā punkta ticamību (šajā novērtējumā nav pielietots). Tai skaitā:

- Tas iekļautu tādu datu pirmsapstrādi, kā anomāliju detektēšana, salīdzināšana ar satelītdatos esošajām maskām (mākoņi, saules atspīdums), kas var ietekmēt visa satelītattēla vērtību kvalitāti.
- Kā arī potenciāli viena pikseļa vērtības vietā testēt arī pikseļu grupas (konkrētā pikseļa, kas sakrīt ar *in situ* stacijas koordinātām, un visu blakusesošo pikseļu vērtības) vidējās

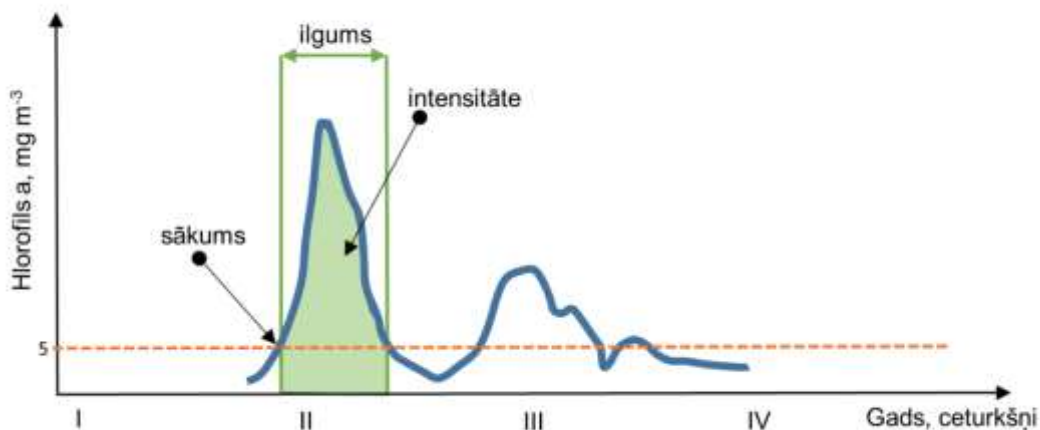
vērtības, ņemot vērā, ka *in situ* paraugošana un satelītattēla uzņemšana visbiežāk notiek ar laika nobīdi.

- Uzlabot izmantotā grida izšķirtspēju līdz minimumam (tuvojoties satelītattēla izšķirtspējai: 20×20 m), kas būtu izpildāms pēc iespējas automatizējot datu iegūšanas un apstrādes procesu.
- Izstrādāt visu testētā perioda mērījumu integrēšanu, lai iegūtu vienu reprezentatīvu vērtību katram testētajam periodam (vispiemērotāk: gadam). Šajā piemērā augustā iegūti seši novērojuma punkti. Lai tos pārrēķinātu vienā vērtībā, nepieciešams izstrādāt algoritmu, kas ņem vērā konkrētā datuma satelītattēla datu kvalitāti un pieejamību, padarot visas iegūtās vērtības līdzvērtīgas; bez kvalitātes pārbaudes darba plūsmas tas nav iespējams. Kvalitātes pārbaudes darba plūsmas izstrādei/rekomendāciju veikšanai nepieciešams lielāks datu apjoms, detalizētāka Sentinel-2 datu variēšanas un to ietekmes analīze.
- Potenciāli šo algoritmu chl\_7 testēt Rīgas līča pārejas ūdeņos. Šobrīd šādu testēšanu ierobežo datu pieejamība: 2021.gadā viena vērtība sakrita starp Sentinel-2 satelītdatiem un *in situ* vērtībām. Pārejas ūdeņi atrodas tuvāk sauszemei, līdz ar to ir biežāk pakļauti mākoņainībai, kas bija galvenais iemesls datu nepieejamībai.

## 1.2. PAVASARA HLOROFILA A INDIKATORS

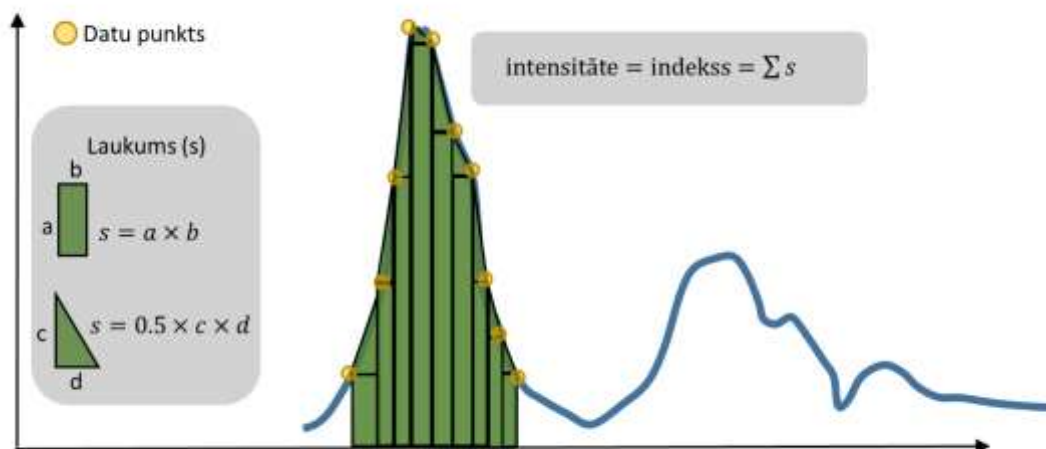
Fitoplanktona pavasara masveida savairošanās (“pavasara ziedēšana”; turpmāk: FPS) ir tipiska mērenās joslas ikgadēja parādība. Tās intensitāte ir tieši saistīta ar pieejamo biogēnu un gaismas daudzumu, kā arī ar ūdens kolonas sajaukšanās pakāpi un līdz ar to ar temperatūru, sāļumu un ledus esamību/neesamību. FPS Baltijas jūrā ir diatomu un dinoflagelātu dominēta, tomēr gadu no gada tās intensitāte mainās. [Fleming & Kaitala \(2006\)](#) aprakstīja metodi kā novērtēt fitoplanktona pavasara ziedēšanas intensitāti, izmantojot regulārus (reizi nedēļā) hlorofila-a mērījumus. Šī metode kalpo par pamatu HELCOM eitrofikācijas indikatora “*spring bloom chlorophyll-a indicator*” veidošanai (attīstības stadijā esošs indikators; EUTRO-OPER 4-2015, 2015). Šāds indikators primāri atspoguļo Jūras Stratēģijas Direktīvas (2017/848/ES) D5 raksturlielumu – eitrofikācija, kā arī ļauj novērtēt kopējo pelagiskās dzīvotnes kvalitāti (D1C6). Tas ietver arī Baltijas jūras Rīcības plāna eitrofikācijas un biodaudzveidības segmentus, kā arī piekrastes un pārejas ūdeņu zonā attiecināms uz EQ1 no Ūdens Stratēģijas Direktīvas (2000/60/EK).

FPS intensitātes noteikšanai nepieciešams definēt periodu, kad tā noris. Par FPS periodu uzskatāms brīdis no marta līdz jūnijam, kad hlorofila-a koncentrācija pārsniedz  $5 \text{ mg m}^{-3}$  (pēc [Fleming & Kaitala, 2006](#); [1.12. attēls](#) - ilgums). FPS intensitāte ir raksturojama ar laukumu, kas iekļaujas zem FPS perioda hlorofila-a līknes ([1.12. attēls](#) - intensitāte).



1.12. attēls. *Fitoplanktona pavasara masveida savairošanās (FPS) perioda un intensitātes definēšana.* Sākums – FPS perioda sākuma punkts: hlorofils-a > 5 mg m<sup>-3</sup>. intensitāte – zem FPS Attēlam ilustratīva nozīme (no Fleming & Kaitala (2006) ar modifikācijām)

FPS intensitāti raksturojošo laukumu starp katriem diviem punktiem sadala taisnstūra un taisnleņķa trijstūra figūrās, kurām aprēķina laukumu, balstoties uz empīriskajiem mērījumiem (datu punktu vērtībām). FPS intensitāte ir vienāda ar visu šo figūru laukumu summu (1.13. attēls).

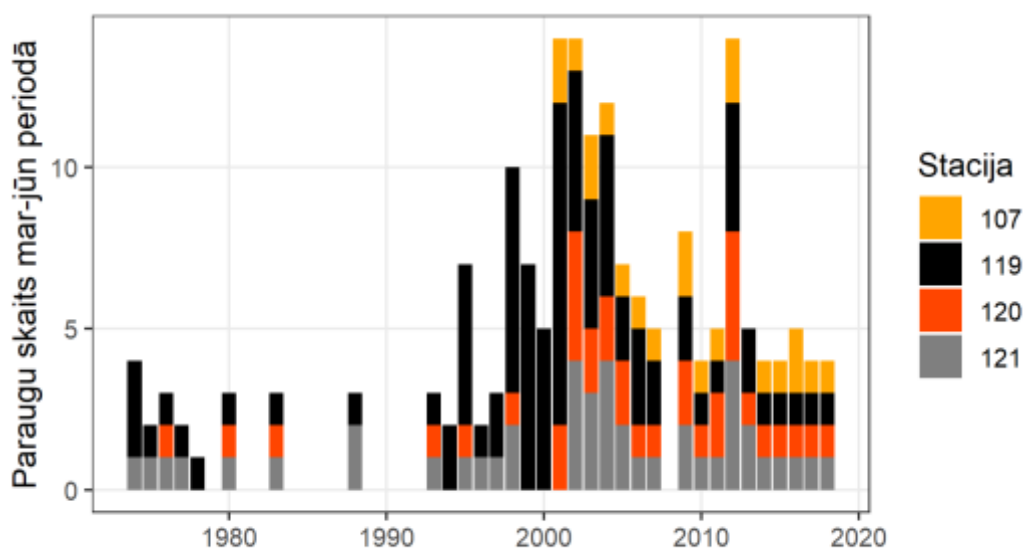


1.13. attēls. *Fitoplanktona pavasara ziedēšanas intensitātes indeksa vērtības aprēķins*

Lai novērtētu indikatora ieviešanas nepieciešamo datu daudzumu un noklājumu, tika veikta indikatora testēšana ar Latvijas Hidroekoloģijas institūta datiem no Rīgas līča atklātās daļas stacijām (1.14. attēls). Pavasara periodam (marts-jūnijs) pieejamo hlorofila-a datu daudzums stacijās attēlots 1.15. attēlā.

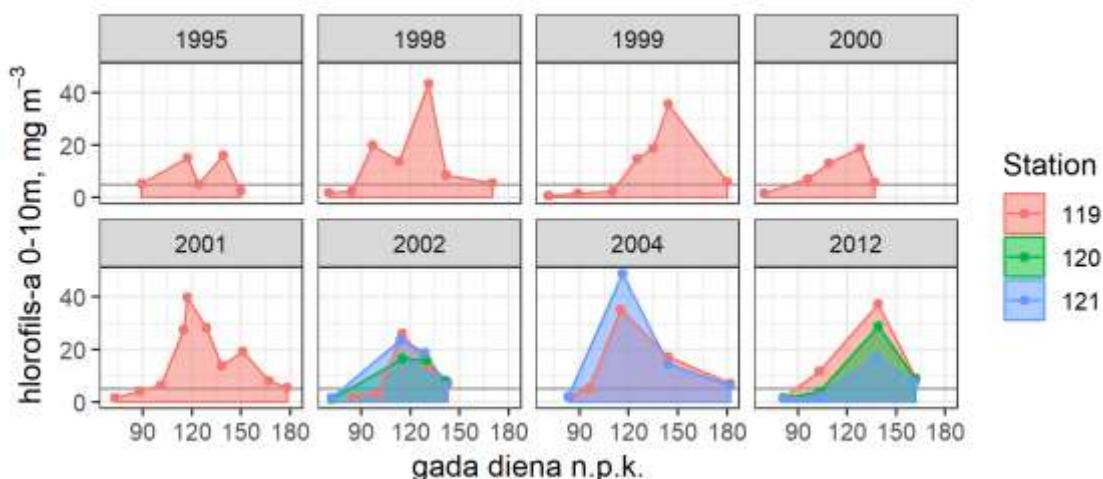


1.14. attēls. Rīgas līča atklātās daļas staciju atrašanās vietas (zilie punkti)



1.15. attēls. Latvijas Hidroekoloģijas institūta hlorofila *a* paraugošanas biežums pavasara periodā no marta līdz jūnijam Rīgas līča atklātās daļas stacijās

Indikatora testēšanā iekļauti tikai tie gadi, kuros, pirmkārt, marta-jūnija periodā stacijā veiktas trīs vai vairāk paraugošanas epizodes, kas ir minimālais punktu skaits, starp kuriem iespējams aprēķināt laukumu un, otrkārt, pieejami ziemas biogēnu mērījumi. Rezultātā, indikatora testēšanā iekļauti 8 gadi, kopā sastādot 13 mērījumu sērijas (1.16. attēls). Visbiežāk apsekota 119. stacija.



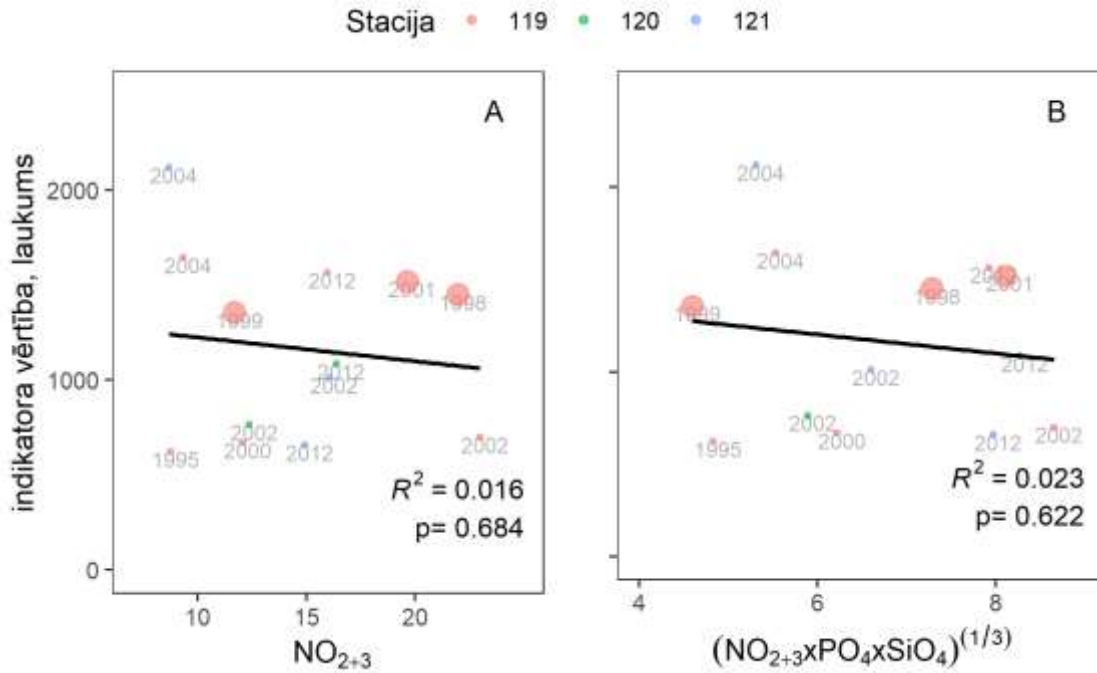
1.16. attēls. Fitoplanktona pavasara ziedēšanas indikatora testēšanā iekļautās mērījumu sērijas

Aprēķinātās indikatora vērtības neuzrāda sakarību ar ziemas neorganiskā slāpekļa koncentrāciju (1.17A. attēls), kas ir uzskatāms par galveno FPS limitējošo faktoru Rīgas līcī (Purina et al., 2018), kā arī nav novērojama sakarība ar biogēnu raksturojošo vērtību (1.17B. attēls), kas aprēķināta pēc Fleming & Kaitala (2006) aprakstītās metodes:

$$Nutr = \sqrt[3]{conc(NO_2NO_3) \times conc(PO_4) \times conc(SiO_4)}.$$

Šīs teorētiskās un arī citviet Baltijas jūrā empīriski novērotās (Fleming & Kaitala, 2006) sakarības neesamība norāda uz nereprezentatīviem datiem. Galvenā atšķirība starp minētajiem – indikatoru aprakstošo (Fleming & Kaitala, 2006) un indikatora praktiskā pielietojuma datu analīzi (Groetsch et al., 2016) – un Rīgas līča indikatora testēšanu ir *in situ* mērījumu skaits gan ziemas periodā, lai iegūtu pamat-datus biogēnu koncentrācijām pirms produktīvā perioda sākuma, gan pavasara periodā, kad sekots līdz hlorofila-a koncentrācijas izmaiņām. Fleming & Kaitala (2006) izmantoja datus, kas ievākti ar autonomu iekārtu (Ferrybox), aprēķinot vidējo nedēļas ietvaros (respektīvi katru nedēļu raksturo viena vērtība). Groetsch et al. (2016) izmantoja datus no Alg@line Ferrybox tīkla ar mērījumu intensitāti 1 katrās 20 sekundēs, nodrošinot 200m telpisko izšķirtspēju. Katram reģionam tika aprēķināta normalizēta vērtība katrai dienai periodā no 31. janvāra līdz 9. jūnijam (respektīvi kopā 129 dienas/datu punkti).





1.17. attēls. *Indikatora vērtību mainība saistībā ar ziemas A) neorganiskā slāpekļa koncentrāciju –  $NO_2+NO_3$  un B) kopējo biogēnu vērtību aprēķinātu pēc Fleming & Kaitala (2006) aprakstītās metodes. Mazākie datu punkti norāda, ka indikatora vērtība rēķināta no 3-5 datu punktiem, lielākie datu punkti norāda, ka indikatora vērtība rēķināta no 6-10 datu punktiem.*

Lai pilnībā aprobētu un ieviestu “Fitoplanktona pavasara ziedēšanas intensitātes indeksu” kā eitrofikācijas indikatoru Rīgas līcī, periodā 1.februāris-10.jūnijs nepieciešams nodrošināt in situ mērījumus ne retāk kā 1 reizi nedēļā. Praktiski un ekonomiski izpildāms tas ir, izmantojot Ferrybox sistēmas iekārtu/as. Šie automatizētie ūdens parametru mērinstrumenti ir izvietoti pārsvarā uz komerciāliem kuģiem, piemēram pasažieru prāmjiem, kas nodrošina regulāru datu ieguvu (Lips & Lips, 2017).



---

## 2. IZŠĶĪDUŠĀ SKĀBEKĻA KONCENTRĀCIJA

---

### 2.1. DZIĻŪDENS SKĀBEKĻA INDIKATORS

#### 2.1.1. *levads*

HELCOM CORE dziļūdens skābekļa indikators tiek izteikts kā skābekļa deficīts (skābekļa deficīts = piesātināta skābekļa koncentrācija - nomērītā skābekļa koncentrācija) zem haloklīna, kas Baltijas jūrā tipiski atrodas 50-80 m dziļumā. Tā kā Latvijas teritoriālie ūdeņi Baltijas jūrā ietilpst Austrumu Gotlandes baseinā, tad šis dziļūdens skābekļa indikators ir aktuāls arī Latvijai, taču jāatzīmē, ka tas nav piemērojams Rīgas līcim.

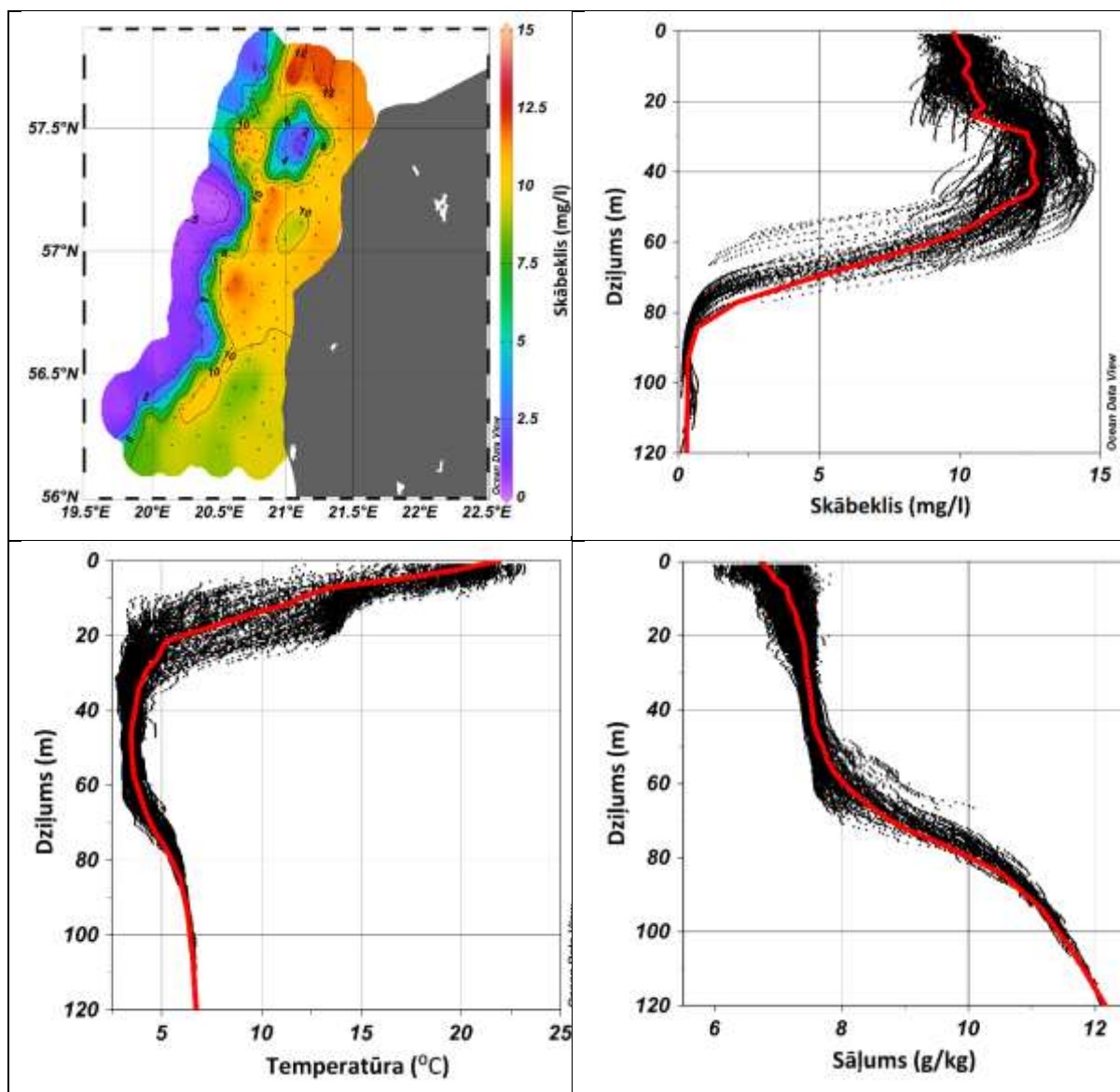
#### 2.1.2. *Pētījuma vispārējs apraksts*

Lai testētu HELCOM dziļūdens skābekļa deficīta indikatoru Latvijas teritoriālajos un EEZ ūdeņos, no 2018.g. 19. līdz 24. jūlijam ar Tallinas Tehnoloģiju Universitātei (TTU) piederošo zinātniski pētniecisko kuģi "Salme" tika ievākti izšķīdušā skābekļa koncentrācijas profili Baltijas jūras atklātajā daļā (Latvijas teritoriālie un EEZ ūdeņi). Kopumā tika apsekotas 182 novērojumu stacijas (2.2. attēls), kurās ar zondi tika nomērīti dažādi ūdeņi raksturojoši parametri (temperatūra, sāļums, blīvums u.c.), t.sk., izšķīdušā skābekļa koncentrācija.

#### 2.1.3. *Rezultātu apraksts*

Balstoties uz iegūtajiem datiem, ir iespējams aplūkot un analizēt ūdens masu īpatnības virsējā un piedibens slānī, kā arī aplūkot ūdens masu vertikālā sadalījuma īpatnības. Kā tas bija sagaidāms, vismazākā (< 2.0 mg/l) izšķīdušā skābekļa koncentrācija Baltijas jūras atklātās daļas piedibens slānī tika novērota reģionos, kur ūdens dziļums ir vislielākais (2.1. attēls). Praktiski visās novērojumu stacijās, kuru dziļums bija lielāks par 80 m, izšķīdušā skābekļa koncentrācija bija < 1.0 mg/l, kas nozīmē, ka šajos reģionos skābeklis principā ir izsmelts un vide var tikt uzskatīta par bezskābekļa. Līdz ar to, var diezgan droši apgalvot, ka bezskābekļa vide valda arī tajos Latvijas teritoriālajos ūdeņos Baltijas jūrā, kur ūdens dziļums pārsniedz 100 m. No iegūtajiem ūdens vertikālajiem profiliem varam secināt, ka visintensīvākā skābekļa samazināšanās notiek aptuveni 50-80 m dziļumā (2.1. attēls), kad vidēji izšķīdušā skābekļa koncentrācija samazinās no aptuveni 11 mg/l līdz koncentrācijai, kas ir tuvu nullei. Šāda skābekļa koncentrācijas samazināšanās skaidrojama arī ar to, ka aptuveni 60-80 m dziļumā var novērot haloklīnu jeb sāļuma lēcienslāni (atbilst iepriekš veiktajiem pētījumiem par Baltijas jūru), kas Baltijas jūrā iezīmē robežu starp ūdens virsējiem slāņiem un piedibens slāņiem, starp kuriem ir salīdzinoši maza ūdens apmaiņa. Jūlijā haloklīna slānī sāļums Baltijas jūrā pieauga aptuveni no 8.0-10.0 g/kg. Zem haloklīna esošās ūdens masas nevar brīvi sajaukties/samaisīties ar ūdens virsējiem slāņiem, kuros ir lielāks skābekļa daudzums, un līdz ar to, skābeklis zem haloklīna tiek lēnām izsmelts un var iestāties bezskābekļa vide. Aplūkojot izšķīdušā skābekļa koncentrācijas (piedibens slānī) telpisko sadalījumu, varam redzēt, ka pazeminātas skābekļa koncentrācijas (< 4.0 mg/l, arī zem 2.0 mg/l) tika novērotas atsevišķā reģionā aptuveni 35 km uz rietumiem no Ventspils (2.1. attēls). Šāda situācija izskaidrojama

ar to, ka šajā reģionā atrodas padziļinājums jeb ieplaka, kur ūdens dziļums pārsniedz 60 m atzīmi, taču apkārt šai ieplakai dziļums svārstās ap 50 m atzīmi. Ieplakās esošajās stacijās var novērot haloklīnu un līdz ar to, arī pazeminātu skābekļa daudzumu piedibens slānī. Pārējā teritorijā, kur ūdens dziļums nepārsniedz 50 m atzīmi, skābekļa daudzums piedibens slānī svārstās ap 10 mg/l, vietām tas ir arī lielāks (> 12.0 mg/l) vai nedaudz mazāks par 10 mg/l.

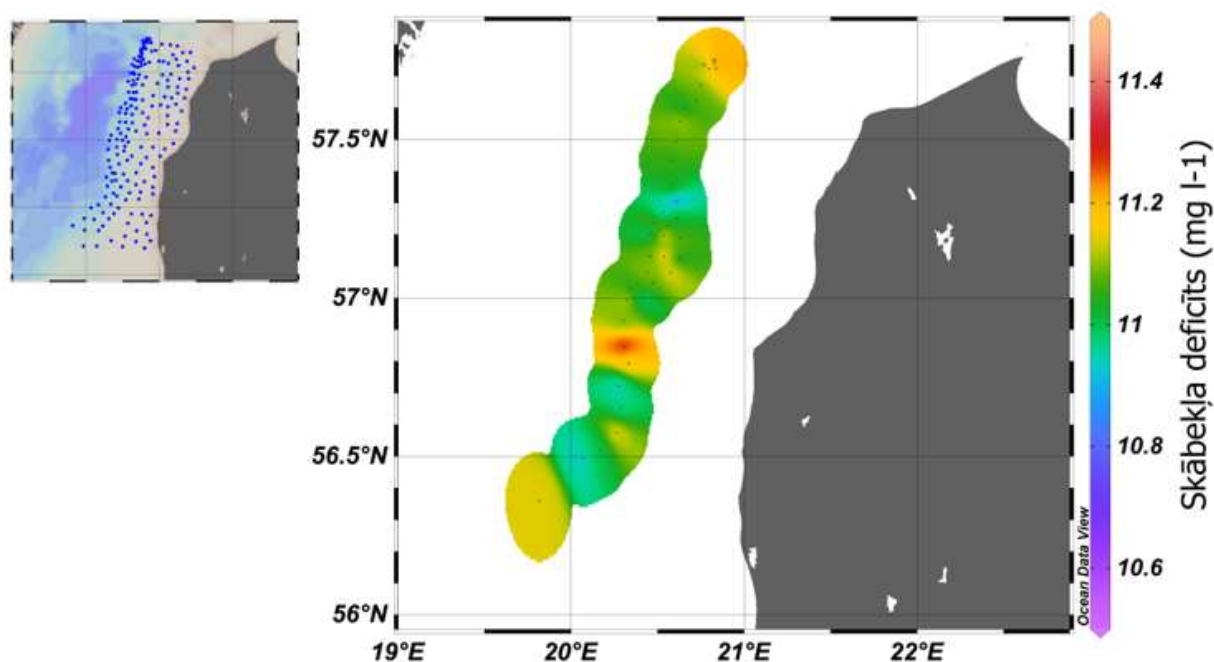


2.1. attēls. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas telpiskais sadalījums piedibens slānī (augšā pa kreisi), un iegūtie izšķīdušā skābekļa koncentrācijas (augšā pa labi), temperatūras (lejā pa kreisi) un sāļuma (lejā pa labi) profili Baltijas jūras atklātajā daļā (ar sarkanu līniju atspoguļota konkrēta parametra vidējā profila dinamika).

#### 2.1.4. Skābekļa deficīta raksturojums

No 2018. gadā Baltijas jūrā veiktajiem mērījumiem 39 no 182 stacijām varēja aprēķināt skābekļa deficītu zem haloklīna (2.2. attēls), jo šīs stacijas bija pietiekami dziļas (>80 m), un atbilda tiem kritērijiem, pēc kuriem tika noteikts HELCOM CORE šobrīd izstrādātais dziļūdens skābekļa indikators (8.66 mg/l). Pārējās apsekotās stacijas uz krasta pusi bija seklākas un tajās nav iespējams korekti aprēķināt skābekļa deficītu zem haloklīna. Līdz ar to, varam secināt, ka krasta līnijai vistuvākās stacijas, kurās ir iespējams aprēķināt skābekļa deficītu zem haloklīna, ir arī uzskatāmas par robežu, kur esošais HELCOM indikators ir piemērojams. Atlikušajai teritorijai līdz piekrastei piemērot esošo HELCOM indikatoru, kā tas tika darīts HOLAS ziņojumā, nebūtu korekti, un tas kvalitatīvi neatspoguļotu reālo situāciju dabā.

Runājot par pašām skābekļa deficīta vērtībām Latvijas teritoriālajos ūdeņos, Baltijas jūrā, varam redzēt (2.2. attēls), ka skābekļa deficīts paralēli Kurzemes piekrastei svārstās robežās no 10.9-11.3 mg/l, kas ievērojami pārsniedz HELCOM noteikto skābekļa deficīta mērķa jeb indikatora vērtību Austrumu Gotlandes baseinam (8.66 mg/l). Tāpat 2018. gadā novērotās skābekļa deficīta vērtības pārsniedz skābekļa deficīta vidējo vērtību (10.5 mg/l) 2007.-2011. gadam (pēc HELCOM datiem).



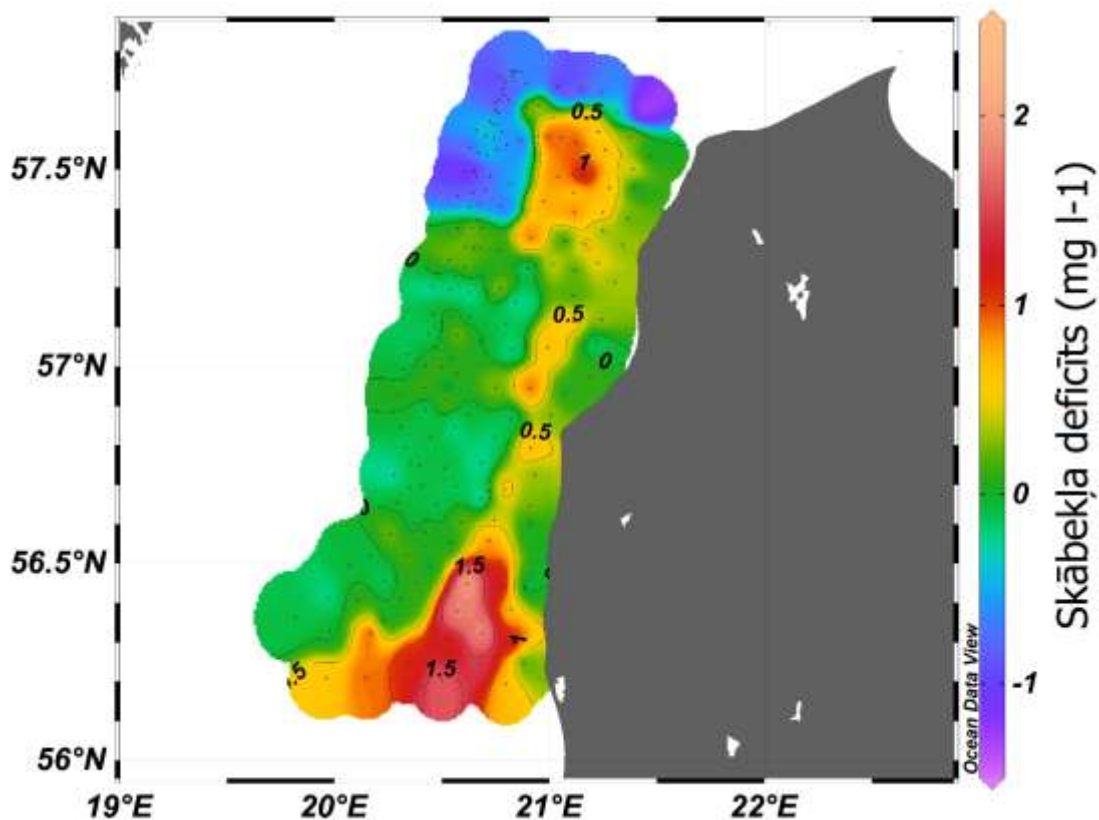
2.2. attēls. Veikto mērījumu vietas 2018. gada jūlijā (kreisajā pusē, atzīmētas ar ziliem punktiem), un aprēķinātās skābekļa deficīta vērtības stacijās, kuras ir dziļākas par 80 m (labajā pusē)

Neskatoties uz to, ir pieejami dati no stacijām Austrumu Gotlandes baseinā, kurās ilgstoši ir veikti mērījumi – piemēram, BY10 un BY15 stacijas, kurās dati ir pieejami jau no 1960. gadiem. Abās šajās stacijās kopš 1963. gada skābekļa deficīta vērtības pārsvarā visos gados ir bijušas virs HELCOM noteiktās mērķa indikatora vērtības. Līdz ar to varam secināt, ka lielākajā daļā Austrumu Gotlandes baseina arī vēsturiski dziļūdens skābekļa deficīts ir bijis virs HELCOM noteiktās mērķa vērtības, kas nozīmē, ka šajā teritorijā ilgstoši nav ticis sasniegts labs vides stāvoklis, un esošais HELCOM CORE dziļūdens skābekļa deficīta indikators ir piemērojams teritorijām, kur ūdens dziļums pārsniedz 80 m.

Taču vienlaicīgi tika arī nodemonstrēts, ka liela daļa Latvijas teritoriālo ūdeņu (Austrumu Gotlandes baseina daļā) nav dziļāki par šiem 80 m ([2.2. attēls](#)), t.i., visa teritorija, kas atrodas krasta virzienā no kartē attēlotajiem mērījumiem. Neskatoties uz to, HELCOM, runājot par skābekļa deficīta indikatoriem, norāda, ka arī šīs teritorijas (kuras vairs neatbilst dziļūdens indikatora nosacījumiem) nav sasniegušas labu vides stāvokli. Turklāt, šie reģioni tiek iezīmēti kā reģioni, kur dziļūdens skābekļa deficīta indikatora ticamības līmenis tiek norādīts kā augsts.

Lai korekti atspoguļotu vides stāvokli šajos apgabalos, kas ir seklāki par 80 m, ir jāveic datu analīze par esošo skābekļa deficītu šajos reģionos, turklāt tas ir jādara 0-50 m slānim, jo 50-80 m dziļumā atrodas jau iepriekš minētais haloklīna slānis. 2018. g. veiktie mērījumi parāda, ka skābekļa deficīts Austrumu Gotlandes baseina daļā svārstās -1.4-2.0 mg/l robežās ([2.3. attēls](#)). Acīmredzami, skābekļa deficīts virsējā ūdens slānī ievērojami atšķiras no tā, kas tika novērots zem haloklīna ([2.2. attēls](#)). Tas ir daudz mazāks, kas principā nozīmē, ka skābekļa koncentrācija šajā laikā un teritorijā ir salīdzinoši tuva 100% skābekļa piesātinājumam. Nedaudz lielāks skābekļa deficīts tika novērots Kurzemes piekrastes dienvidu daļā, kur tas pārsniedza 1.5 mg/l, atsevišķās teritorijās tas bija lielāks par 0.5 mg/l, taču lielākajā daļā teritorijas skābekļa deficīts bija mazāks par 0.5 mg/l. Salīdzinoši lielā teritorijā skābekļa deficīts bija arī negatīvs, it īpaši Kurzemes piekrastes ziemeļu daļā, tālāk prom no krasta, kur skābekļa deficīts bija pat zem -1.0 mg/l, kas norāda, ka šajos reģionos ūdens virsējā slānī skābeklis nav trūcis un ir bijis pat pārsātināts (>100%).

Lai iegūtu priekšstatu par skābekļa deficīta dinamiku virsējos slāņos ilgākā laika periodā, tika izmantoti dati no jau iepriekš minētajām BY10 un BY15 novērojumu stacijām, kurās novērojumi veikti visilgāk un kuras, turklāt, atrodas dziļāk Baltijas jūras teritorijā (tālāk prom no krasta) nekā reģions, kas tiek aplūkots [2.3. attēls](#). Vidējais skābekļa deficīts kopš 1963. gada abās stacijās ir praktiski identisks un ir ap 0.8 mg/l. Arī diapazons, kurā svārstās skābekļa deficīts atbilst tam, kas tika novērots 2018. gada mērījumos. Līdz ar to, no iegūtajiem rezultātiem varam secināt, ka, vismaz šobrīd, skābekļa deficīts 0-50 m slānī (definētais seklūdens jeb virsējā slāņa robežas) nav izteikts un skābekļa koncentrācijas ir salīdzinoši tuvu 100 % piesātinājumam. Tas nozīmē, ka šajā reģionā (attēlotais apgabals [2.3. attēls](#)) vides stāvoklis 0-50 m slānī (definētais seklūdens) tiks klasificēts kā labs neatkarīgi no tā vai eitrofikācija pastiprināsies vai samazināsies. Līdz ar to, šobrīd nav pamata šīs teritorijas novērtēšanai izmantot skābekļa koncentrāciju vai deficītu kā laba vides stāvokļa indikatoru. Savukārt esošais HELCOM CORE norādītais dziļūdens skābekļa deficīta indikators šai teritorijai nav piemērojams, jo šī teritorija neatbilst šī indikatora aprēķināšanas metodikai. Neatkarīgi no iepriekš izdarītā secinājuma, skābekļa koncentrāciju mērījumi Baltijas jūras seklūdens (0-50 m) daļā ir jāturpina lai sekotu līdzi skābekļa koncentrāciju izmaiņām mainīgā klimata apstākļos.



2.3. attēls. Aprēķinātās skābekļa deficīta vērtības virsējā slānī (0-50 m) 2018. g. jūlijā

## 2.2. SEKLŪDENS SKĀBEKĻA INDIKATORS

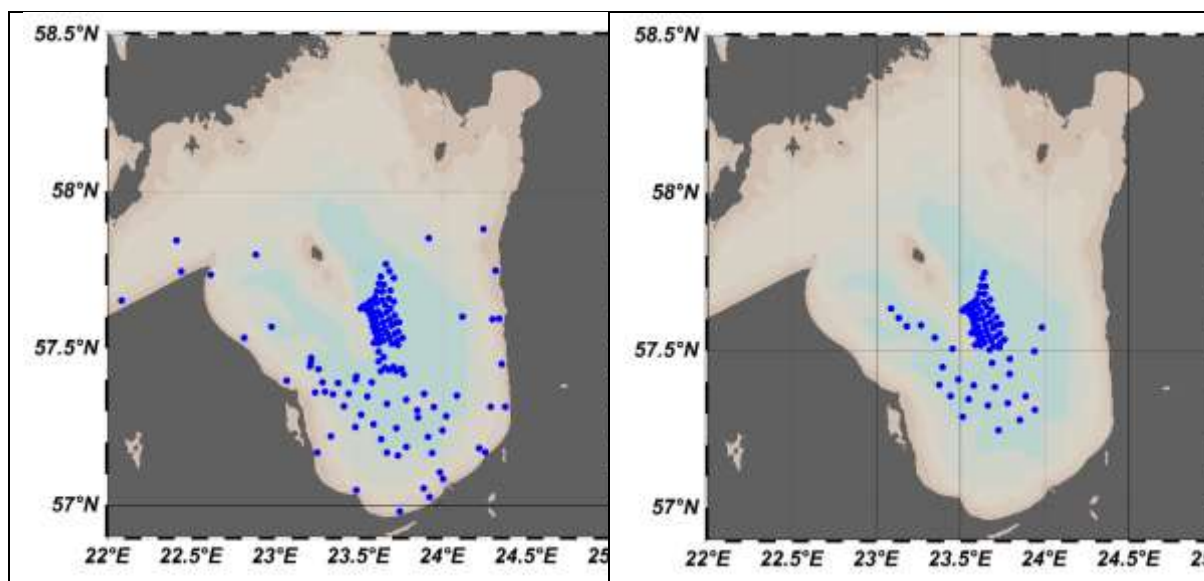
### 2.2.1. Ievads

Rīgas līcis, savu fizikāl-ģeogrāfisko īpatnību dēļ, būtiski atšķiras no citiem Baltijas jūras reģioniem. Attiecīgi, Rīgas līcim ir vajadzīga specifiska pieeja kā noteikt piegrunts ūdens slāņa skābekļa deficīta indikatoru. Lai to izdarītu, pirmkārt, ir vajadzīgs definēt līča seklūdenu daļu, un aprēķināt skābekļa koncentrāciju šajos reģionos.

### 2.2.2. Pētījuma vispārējs apraksts

Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas profili Rīgas līcī (pārsvarā līča dziļajā daļā, Latvijas teritoriālie ūdeņi) tika ievākti divas reizes - 2018.g. 9.-12. augustā un 2018.g. 19.-20. septembrī ar Tallinas Tehnoloģiju Universitātei (TTU) piederošo zinātniski pētniecisko kuģi "Salme". Kopumā tika apsektas attiecīgi 90 (augustā) un 76 (septembrī) novērojumu stacijas (2.4. attēls), kurās ar zondi tika nomērīti dažādi ūdeņi raksturojoši parametri (temperatūra, sāļums, blīvums u.c.), t.sk., izšķīdušā skābekļa koncentrācija. Balstoties uz iegūtajiem datiem, ir iespējams aplūkot un analizēt ūdens masu īpatnības virsējā un piedibens slānī, kā arī aplūkot ūdens masu vertikālā sadalījuma īpatnības. Kā tas bija sagaidāms un

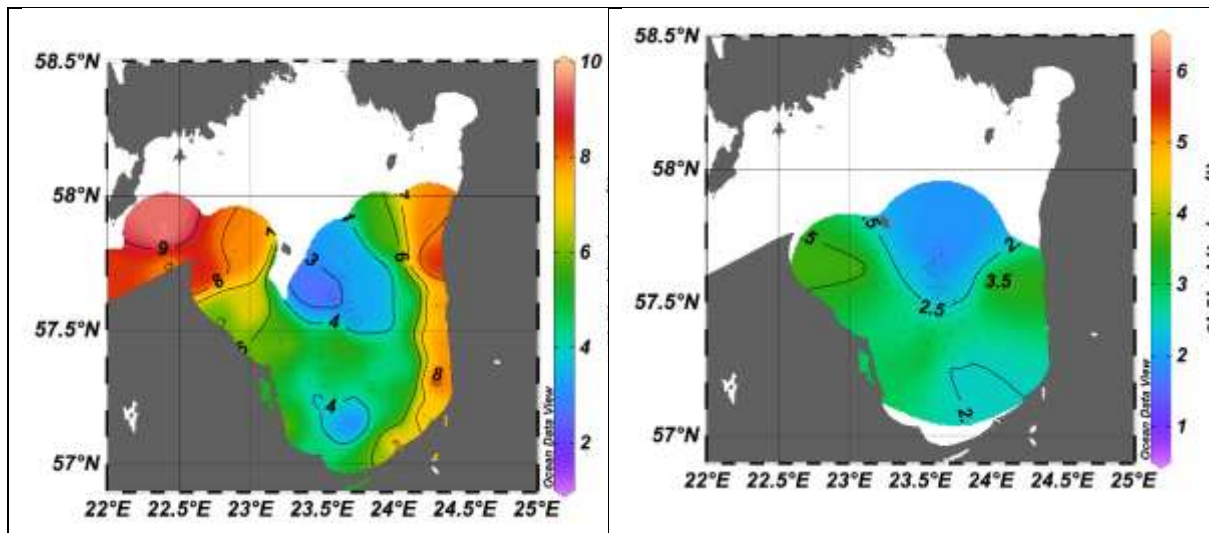
līdzīgi kā Baltijas jūras atklātajā daļā, arī Rīgas līcī izšķīdušā skābekļa koncentrācija piedibens slānī vismazākā ir tieši līča dziļākajos reģionos jeb centrālajā daļā (2.5. attēls).



2.4. attēls. Iegūtie izšķīdušā skābekļa koncentrācijas profili Rīgas līcī augustā (pa kreisi) un septembrī (pa labi, stacijas atzīmētas ar ziliem punktiem)

Augustā līča centrālajā daļā skābekļa koncentrācija pārsvarā ir zem 4.0 mg/l, vietām arī mazāka par 3.0 mg/l, savukārt septembrī skābekļa koncentrācija līča centrālajā daļā ir jau zemāka par 2.5 mg/l, kas skaidrojams ar to, ka šajā reģionā esošās ūdens masas (piedibens) ir bijušas ilgāk pakļautas stratifikācijas apstākļiem, un, līdz ar to, skābeklis pakāpeniski tiek izsmelts no piedibens slāņiem. Jāatzīmē, ka gan augustā, gan septembrī pastiprināta izšķīdušā skābekļa koncentrācijas samazināšanās sākas aptuveni no 30 m dziļuma (2.6. attēls), kas arī iezīmē šo robežšķirtni starp ūdens virsējiem un apakšējiem slāņiem. Lai gan ar rudens iestāšanos sākas pakāpeniska virsējo slāņu atdzišana, kad septembrī ūdens temperatūra virsējā slānī ir zemāka (ap 17.0 °C) nekā augustā, kad tā ir ap 22.0 °C (2.6. attēls), tomēr septembrī pāreja starp ūdens virsējiem un piedibens slāņiem ir ļoti izteikta un termoklīns (temperatūras lēcienlānis) saglabājas (10 m ietvaros temperatūra var nokrist par aptuveni 10.0 °C). Un kamēr ar rudens ūdens masu konvektīvo (temperatūras ietekmē) samaisīšanos, ūdens kolonna nav pilnībā samaisījusies līdz ūdens apakšējiem slāņiem, tikmēr ir sagaidāms, ka skābekļa koncentrācija piedibens slānī turpinās samazināties, kas arī tika novērots līča dziļākajos reģionos.

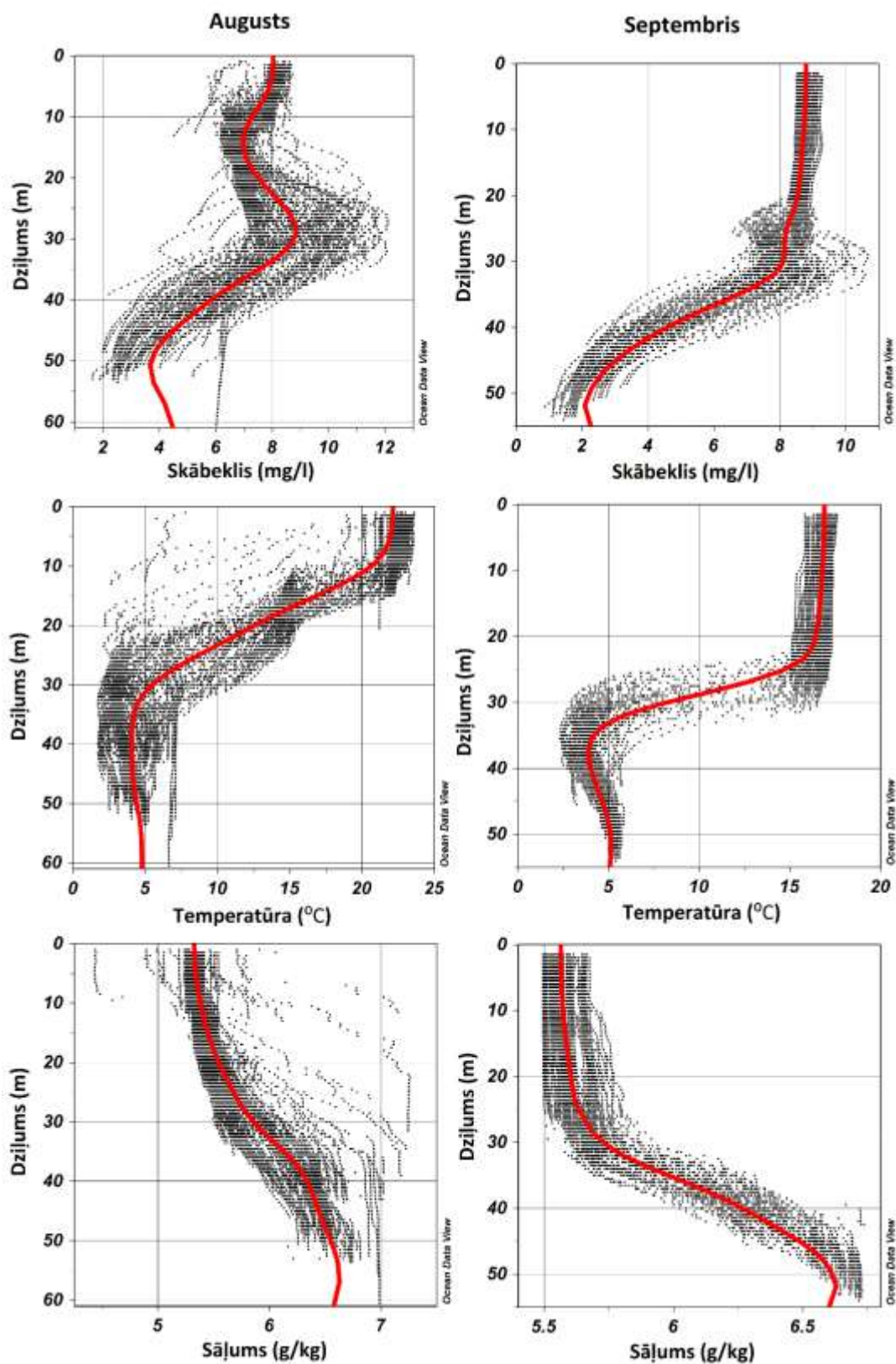




2.5. attēls. *Izšķīdušā skābekļa koncentrācija piedibens slāni augustā (pa kreisi) un septembrī (pa labi) Rīgas līcī*

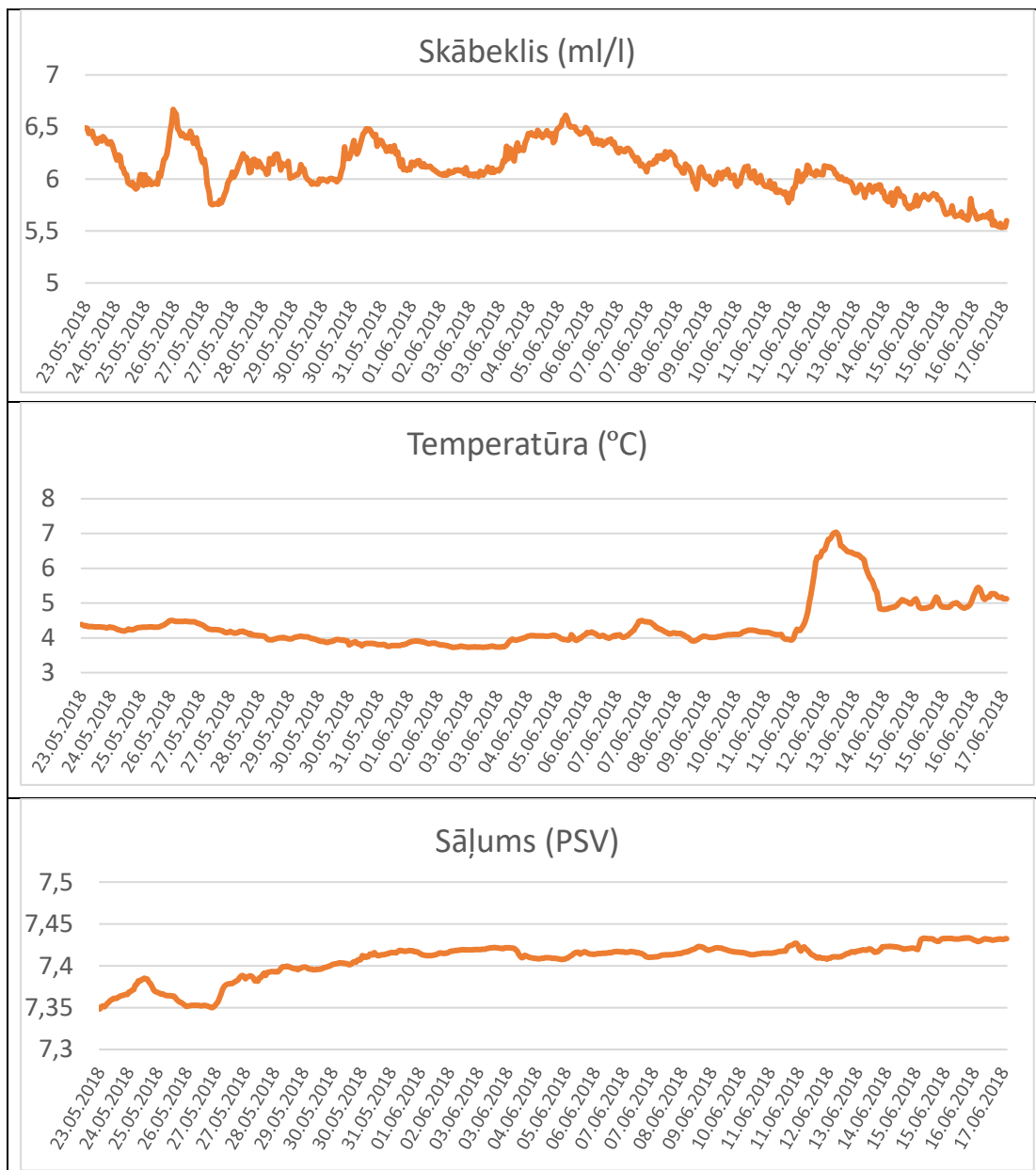
Iepriekš tika aplūkoti un aprakstīti izšķīdušā skābekļa koncentrācijas profili pārsvarā Baltijas jūras un Rīgas līča dziļajos reģionos, savukārt piekrastē skābekļa dinamika ievērojami atšķiras no tās, kas novērojama dziļūdens daļā. Lai iegūtu priekšstatu par skābekļa dinamiku piekrastē, netālu no Pāvilostas, 20 m dziļumā, tika izvietota zonde, kas pastāvīgi veica mērījumus ar stundas intervālu no 2018.g. 23. maija līdz 2018.g. 17. jūnijam. Ar zondi tika nomērīti vairāki ūdens raksturojoši parametri (temperatūra, sāļums, blīvums u.c.), t.sk., izšķīdušā skābekļa koncentrācija, un kopumā tika iegūti 592 zondes ieraksti. Rezultātā tika iegūti dati par piedibens slāni (20 m dziļumā) ar labu laika izšķirtspēju, kas ļauj detalizētāk aplūkot atsevišķu ūdens parametru dinamiku laikā.

Lai gan dati iegūti ik pēc stundai, tomēr redzam, ka ūdens masām konkrētā vietā (šajā gadījumā 20 m dziļumā netālu no Pāvilostas) ir sava dinamika. Ja temperatūra un sāļums lielāko daļu no aplūkotā perioda ir salīdzinoši viendabīgi (temperatūra pārsvarā ap 4.0 °C, bet sāļums ap 7,4 PSV), tad izšķīdušā skābekļa koncentrācijai ir daudz izteiktāka mainība jeb dinamika, un skābekļa koncentrācija aplūkotajā laika periodā pārsvarā svārstījās 5.5-6.5 ml/l robežās, ar atsevišķiem periodiem, kad skābekļa koncentrācija samazinās vai palielinās (2.7. attēls).



2.6. attēls. Iegūtie izšķīdušā skābekļa koncentrācijas (augšā), temperatūras (pa vidu) un sāļuma (lejā) profili augustā un septembrī Rīgas līcī (ar sarkanu līniju atspoguļota konkrēta parametra vidējā profila dinamika)





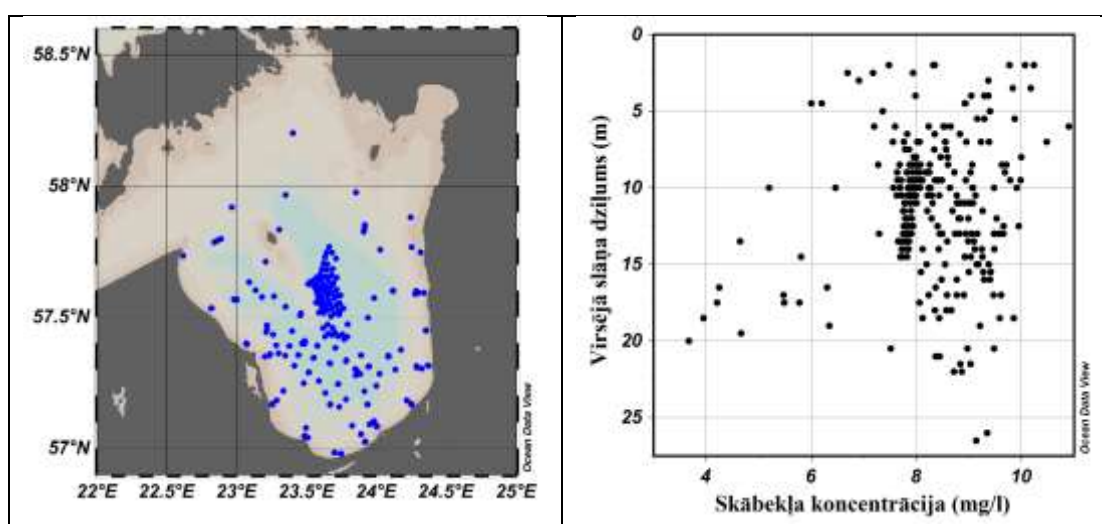
**2.7. attēls. Iegūtie izšķīdušā skābekļa koncentrācijas, temperatūras un sāļuma dati ar augstu laika izšķirtspēju (1 h), kas iegūti 20 m dziļumā netālu no Pāvilstas**

Aplūkotā perioda pirmajā pusē skābekļa koncentrācijai nav konsekventu izmaiņu, bet ir raksturīga mainība, savukārt perioda otrajai pusei tomēr raksturīga pakāpeniska skābekļa koncentrācijas samazināšanās, kad skābekļa koncentrācija aptuveni no 6.6 ml/l (5. jūnijā) samazinās līdz 5.5 ml/l perioda beigās (17. jūnijā). Šāda pakāpeniska skābekļa koncentrācijas samazināšanās varētu liecināt par salīdzinoši mierīgiem laikapstākļiem (mazs vēja ātrums) šajās divās nedēļās. Interessants artefakts novērojams temperatūras dinamikā, kad aptuveni 1 dienas laikā (aptuveni no 11. līdz 12. jūnijam) temperatūra 20 m dziļumā palielinājās no aptuveni 4.0 °C līdz 7.0 °C (2.7. attēls), taču pēc tam, aptuveni pēc tāda paša laika, temperatūra atkal samazinājās (zem 5.0 °C). Šāda parādība, visticamāk, skaidrojama ar ūdens masu advektīvajām plūsmām, kad kāda siltāka ūdens masa ir šķērsojusi vietu, kur veikti mērījumi.

### 2.2.3. Rīgas līča virsējā slāņa definēšanas metodikas apraksts

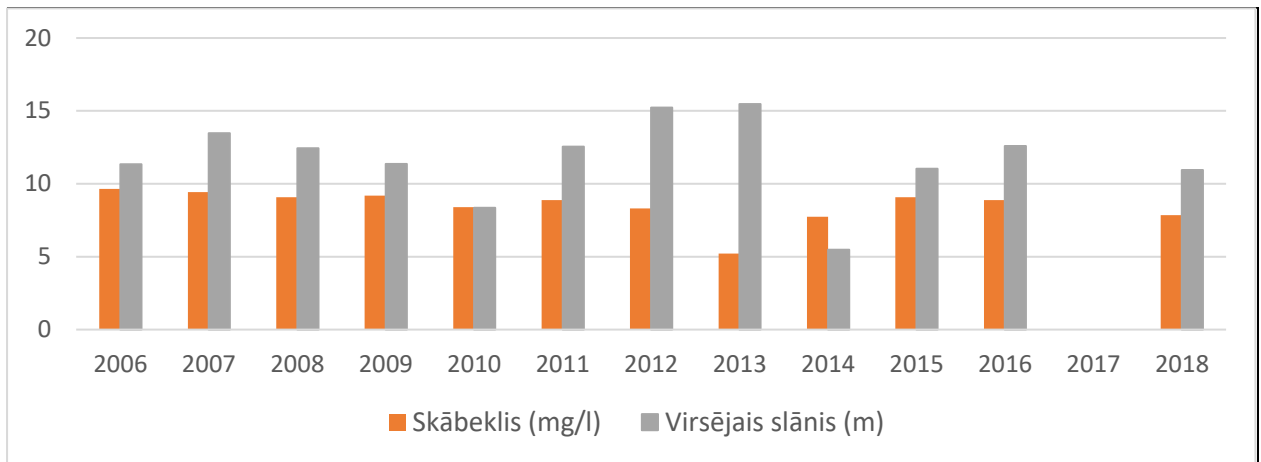
Lai definētu Rīgas līča virsējo slāni, vispirms tika atlasīti visi zondes (CTD) profili, kas pieejami par Rīgas līci no 2006. g. līdz 2018. g. ieskaitot, laika posmā, no 25. jūlija līdz 30. septembrim, kas vislabāk raksturo vasaras periodu, kura laikā skābekļa koncentrācijas Rīgas līcī ir viszemākās. Pēc šādiem kritērijiem kopumā tika atlasīti 472 zondes profili (2.8A. attēls). Virsējā slāņa dziļums tika aprēķināts, izmantojot ūdens blīvuma profilus (2,5 m slīdošais vidējais) – virsējais slānis tika definēts pie seklākā dziļuma, kurā ūdens blīvums starp divām dziļuma atzīmēm (profils ar 0,5 m soli) ir vai pārsniedz 0,05 kg/m<sup>3</sup>. Pēc šādas metodikas katram profilam tika noteikts virsējā slāņa dziļums, kurā attiecīgi pēc tam tika aprēķināta vidējā skābekļa koncentrācija.

Ņemot vērā to, ka piekrastes novērojumu stacijas ir salīdzinoši sekas, tad tālākajā analīzē tika izmantotas tikai tās stacijas, kuras ir dziļākas par 20 m. 273 stacijās, kas bija dziļākas par 20 m, aprēķinātais virsējā slāņa dziļums svārstījās robežās no 2-26 m, savukārt skābekļa koncentrācija attiecīgajos profilos bija robežās no 3.7-10.9 mg/l (2.8B. attēls).



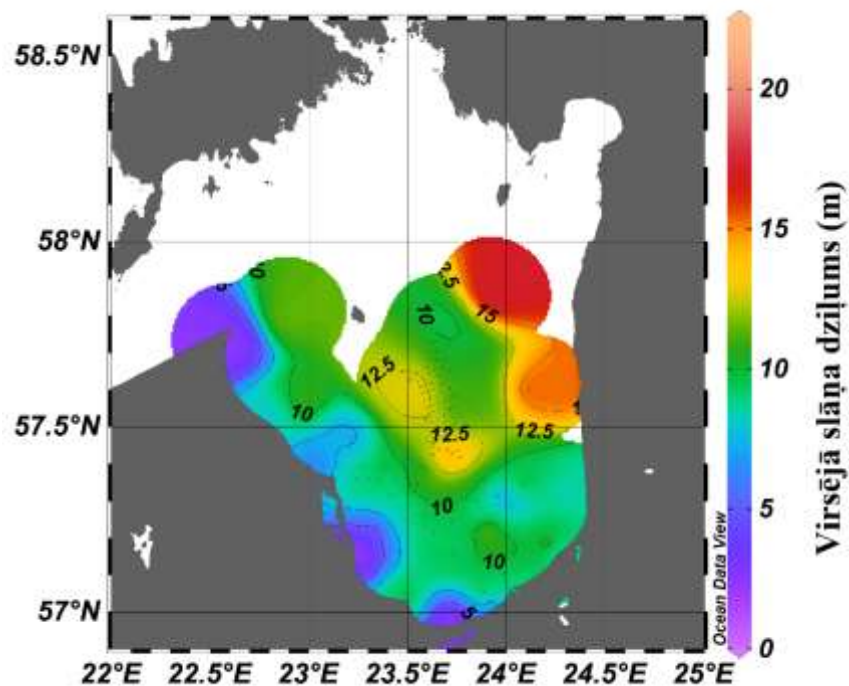
2.8. attēls. a) Analīzei nepieciešamo CTD profilu izvietojums Rīgas līcī no 2006.-2018. gadam laika posmā no 25. jūlija līdz 30. septembrim; b) Virsējā slāņa dziļuma un skābekļa koncentrācijas šajā slānī attiecība novērojumu stacijās ar dziļumu  $\geq 20$  m

Aprēķinātajam virsējā slāņa dziļumam un vidējai skābekļa koncentrācijai šajā slānī ir raksturīga starpgadu mainība (2.9. attēls). Vislielākais virsējā slāņa dziļums tika novērots 2012. un 2013. g., kad tas bija virs 15 m (attiecīgi 15.2 un 15.5 m), savukārt vismazākais tas bija 2014. g. (5.5 m). Aprēķinātā skābekļa koncentrācija attiecīgajos virsējo slāņu dziļumos svārstījās 5-10 mg/l robežās laika posmā no 2006.-2018. gadam (2.9. attēls). Vidējais virsējā slāņa dziļums šajā laika periodā bija 11.7 m, kas ir par aptuveni 2.0 m mazāks nekā tas tika aprēķināts (Skudra and Lips, 2017) Rīgas līcim laika posmā no 1993.-2012. gadam, augustā (13.7 m). Savukārt vidējā skābekļa koncentrācija no 2006.-2018. g. virsējā slānī bija 8.48 mg/l, kas ir tikai nedaudz zemāka nekā pie attiecīgā 100% piesātinājuma (8.89 mg/l pie vidējās temperatūras 19.6 °C un vidējā sāļuma 5.23 PSV).



2.9. attēls. Aprēķinātais viršējā slāņa dziļums un vidējā skābekļa koncentrācija pa gadiem laika posmā no 2006.-2018. gadam novērojumu stacijās ar dziļumu  $\geq 20$  m

Viršējā slāņa dziļuma un attiecīgās skābekļa koncentrācijas starpgadu mainību galvenokārt nosaka Rīgas līča uzbūve un īpatnības (ūdens apmaiņa, straumes, termoklīna dziļums, bioloģiskā aktivitāte u.c.), meteoroloģiskie apstākļi kā arī upju notece. Līča piekrastes reģionos, kur ir salīdzinoši sekls, viršējā slāņa dziļums, loģiski, būs mazāks nekā līča centrālajos, dziļākajos reģionos (2.10. attēls), turklāt, bieži vien sekļajās novērojumu stacijās viršējā slāņa dziļumu nav iespējams definēt pēc iepriekš aprakstītās metodoloģijas.

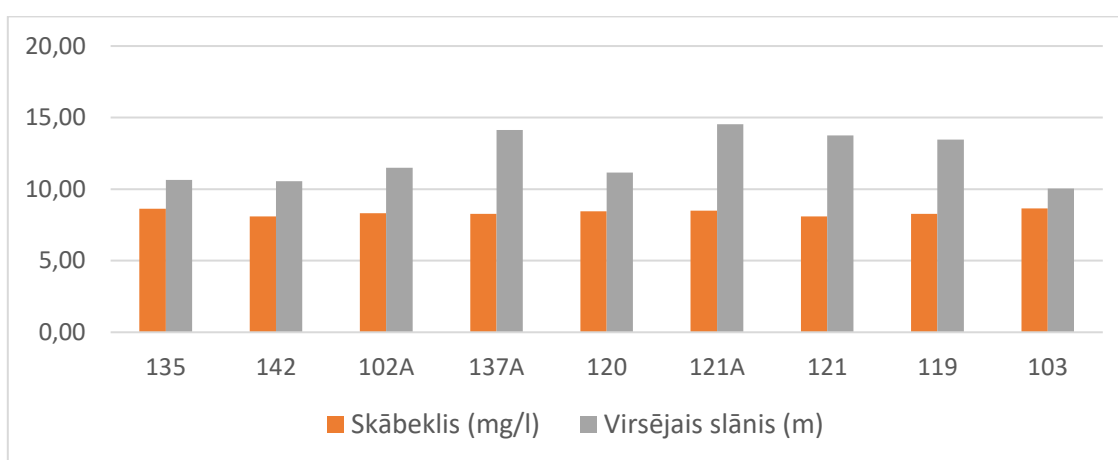


2.10. attēls. Aprēķinātais viršējā slāņa dziļuma sadalījums Rīgas līcī 2018. gada augustā

Kā redzams (2.10. attēls), tad 2018. g. augustā viršējā slāņa dziļums piekrastes sekļajās (12 m) novērojumu stacijās ir pārsvarā zem 5 m, taču, piemēram, līča austrumu piekrastē viršējo slāni nebija

iespējams definēt. Dziļāk līča teritorijā (virs 20 m) virsējā slāņa dziļums ir ap 10 m, savukārt līča centrālajā, dziļūdens daļā virsējā slāņa dziļums pārsvarā svārstās 10-15 m robežās. Divās novērojumu stacijās līča austrumu daļā virsējā slāņa dziļums pārsniedza 15 m.

Aplūkojot ciešāk aprēķināto virsējā slāņa dziļumu un vidējo skābekļa koncentrāciju 9 Rīgas līča dziļūdens novērojumu stacijās (*2.11. attēls*), var secināt, ka izšķīdušā skābekļa koncentrācija visās novērojumu stacijās (attiecīgajā virsējā slānī) ir salīdzinoši līdzīga, un skābekļa koncentrācija svārstās 8.1-8.7 mg/l robežās atkarībā no konkrētās novērojumu stacijas. Savukārt aprēķinātais virsējā slāņa dziļums atšķiras nedaudz vairāk starp dažādām līča daļām. Tas svārstās 10.1-14.5 m robežās, vislielākais tas ir līča austrumu daļā (137A un 121A stacija; attiecīgi 14.1 un 14.5 m) un līča centrālajā daļā (121. stacija, 13.8 m), savukārt nedaudz mazāks tas ir līča rietumu daļā – 135. un 142. novērojumu stacijā, attiecīgi 10.6 un 10.5 m.



#### *2.11. attēls. Aprēķinātais virsējā slāņa dziļums un vidējā skābekļa koncentrācija 9 nozīmīgākajās dziļūdens novērojumu stacijās (dziļums $\geq 35$ m) laika posmā no 2006.-2018. gadam*

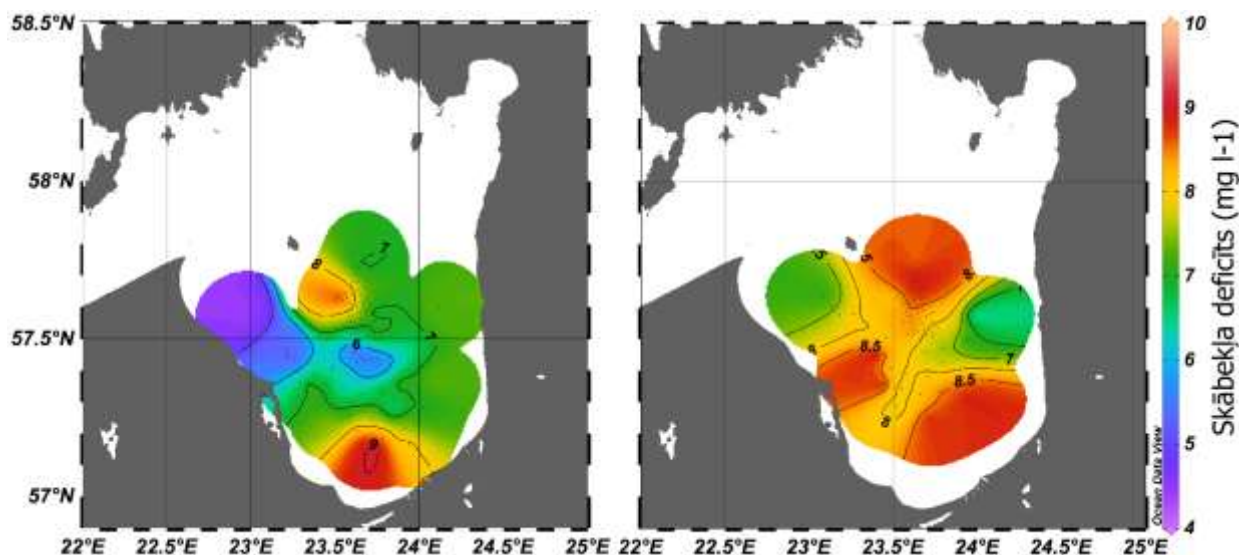
Balstoties uz jau iepriekš aprēķinātajiem skābekļa deficīta datiem (t.sk. vēsturiskajiem) par Baltijas jūru un Rīgas līča dziļūdens daļu un ņemot vērā jauniegūtos aprēķinātos datus par Rīgas līča seklūdeni raksturojošajiem parametriem, tika izstrādāti kritēriji, lai varētu Rīgas līča un Baltijas jūras dziļūdens un seklūdens zonai noteikt robežvērtības, kas reprezentatīvi atspoguļotu laba vides stāvokļa sasniegšanu.

#### *2.2.4. Rīgas līča piegrunts ūdens slāņa skābekļa deficīta aprēķināšana*

Kā jau tika minēts iepriekš, tad esošais HELCOM izstrādātais skābekļa deficīta indikators nav piemērojams Rīgas līcim. Līdz ar to, Rīgas līcim bija vajadzīga atsevišķa pieeja kā noteikt šāda skābekļa deficīta indikatoru. Lai to izdarītu, pirmkārt, tika definēta līča dziļūdens un seklūdens daļa, un tika aprēķināts skābekļa deficīts šajos reģionos. Šī darba ietvaros Rīgas līča dziļūdens daļa tiek definēta kā teritorija, kur ūdens dziļums pārsniedz 35 m.

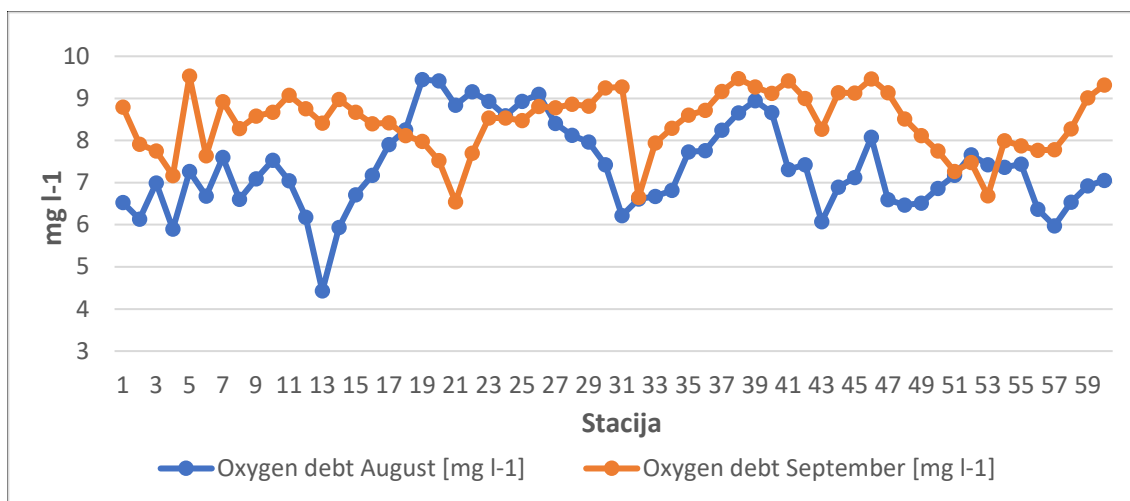
Rīgas līcī aprēķinātais skābekļa deficīts dziļūdens daļā 2018. gada augustā un septembrī atšķiras. Augustā, kas ir tradicionāli vasaras monitoringa reisa mēnesis, skābekļa deficīts zem 35 m svārstās

robežās no 4.2-9.6 mg/l (2.12. attēls), vidējā skābekļa deficīta koncentrācija bija 7.1 mg/l, maksimālās vērtības tika novērotas līča dienvidu daļā (>9.0 mg/l) un pašā līča centrālajā daļā (netālu no Roņu salas), kur skābekļa deficīts bija ap 9.0 mg/l. Savukārt septembrī aprēķinātais skābekļa deficīts svārstījās 5.6-9.6 mg/l robežās (2.12. attēls), vidējā skābekļa deficīta koncentrācija bija 8.3 mg/l. Jāatzīmē gan, ka tikai vienā novērojumu stacijā (līča austrumu daļā) skābekļa deficīts bija zem 6.0 mg/l, taču lielākajā daļā līča teritorijas skābekļa deficīts zem 35 m bija 8.0-8.5 mg/l robežās un >8.5 mg/l, un šis deficīts, kopumā ņemot, bija lielāks jeb aptvēra lielāku teritoriju nekā augustā novērotais.



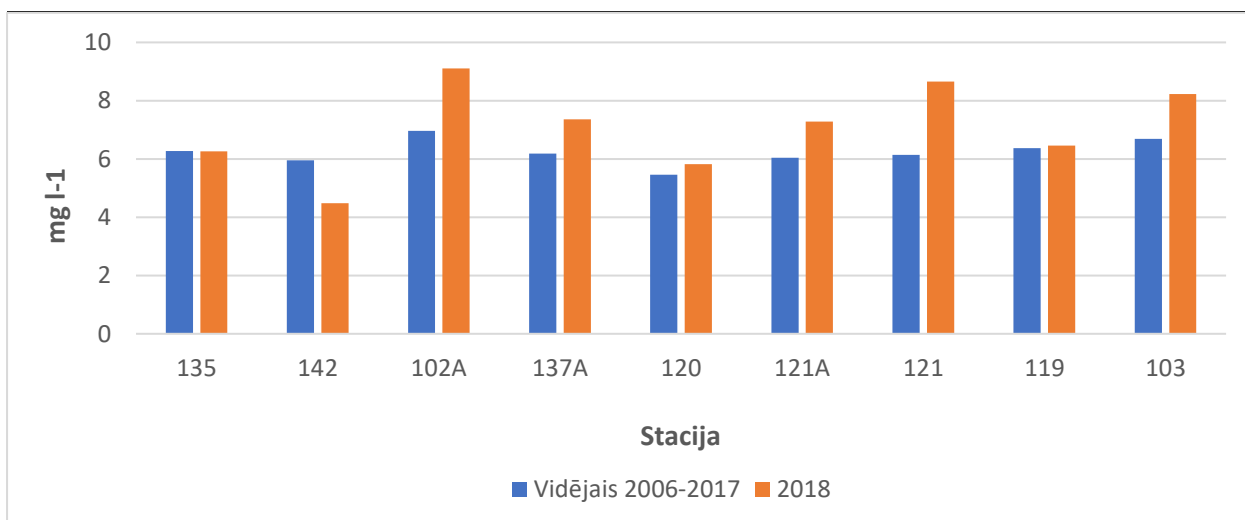
2.12. attēls. Rīgas līča dziļūdens skābekļa deficīts (mg/l, >35 m) 2018. gada augustā (pa kreisi) un septembrī (pa labi)

Ciešāk paanalizējot tās stacijas, kuru ņemšanas vieta sakrita gan augustā, gan septembrī, arī varam redzēt, ka septembrī skābekļa deficīts ir bijis lielāks (2.13. attēls). Tikai atsevišķās stacijās (ap 10) dziļūdens skābekļa deficīts Rīgas līcī bija lielāks augustā nevis septembrī. Kopumā ņemot, šajās izvēlētajās 60 stacijās vidējais skābekļa deficīts augustā bija 7.4 mg/l, savukārt septembrī – 8.4 mg/l. Līdz ar to skābekļa deficīts septembrī ir vidēji par 1.0 mg/l lielāks nekā augustā.



2.13. attēls. Rīgas līča dziļūdens skābekļa deficīts (mg/l, >35 m) 2018. gada augustā un septembrī noteiktos stacijās

Vēsturiskie dati par Rīgas līci, no kuriem var aprēķināt skābekļa deficītu zem 35 m dziļuma, pārsvarā ir pieejami par augusta mēnesi. Šeit par pamatu tika ņemtas 9 galvenās dziļūdens novērojumu stacijas, kas atrodas Rīgas līcī – 135., 142. 102A, 137A, 120., 121A, 121., 119. un 103. stacija. Aprēķinātais skābekļa deficīts parāda, ka 2018. gadā skābekļa deficīts augustā (izņemot 135. un 142. novērojumu staciju) ir bijis lielāks nekā vidējais skābekļa deficīts laika posmā no 2006.-2017. gadam (2.14. attēls). Vidējais skābekļa deficīts 2018. gadā šajās deviņās stacijās bija 7.1 mg/l, savukārt laika posmā no 2006.-2017. gadam vidējais skābekļa deficīts bija 6.2 mg/l.



2.14. attēls. Rīgas līča dziļūdens skābekļa deficīts (mg/l, >35 m) 2018. gada augustā (ar oranžu) un vidējais skābekļa deficīts no 2006-2017. gadam (ar zilu) deviņās dziļūdens novērojumu stacijās

Balstoties uz iepriekš minētajiem rezultātiem un ekspertu slēdzienu, Rīgas līča dziļūdens skābekļa deficīta indikators tiek noteikts kā 6.2 mg/l augusta mēnesim, savukārt septembrī šī indikatora vērtība tiek noteikta par 1 mg/l lielāka jeb respektīvi 7.2 mg/l

Ņemot vērā iepriekš aplūkotos rezultātus par Rīgas līča virsējā slāņa īpatnībām - vidējo skābekļa koncentrāciju no 2006.-2018. g. (8.48 mg/l), kas ir tikai nedaudz zemāka nekā pie attiecīgā 100% piesātinājuma, un vidējo skābekļa koncentrāciju dziļūdens novērojumu stacijās no 2006.-2018. g. (8.1-8.7 mg/l robežās) – kā arī faktu, ka katru gadu, sākot ar rudeni, Rīgas līcī ūdens samaisās visā ūdens kolonnā, Rīgas līča virsējā ūdens slānī (virs piknoklīna) vides stāvoklis var tikt uzskatīts par labu, un pagaidām nav iemesla šai teritorijai noteikt kādu atsevišķu laba vides stāvokļa indikatoru.

---

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

---

1. Ansper, A.; Alikas, K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sens.* 2019, 11, 64. <https://doi.org/10.3390/rs11010064>
2. Binding, C.E.; Greenberg, T.A.; Jerome, J.H.; Bukata, R.P.; Letourneau, G. An assessment of MERIS algal products during an intense bloom in Lake of the Woods. *J. Plankton Res.* 2010, 33, 793–806
3. Fleming, V. & Kaitala, S., 2006. Phytoplankton spring bloom intensity index for the Baltic Sea estimated for the years 1992 to 2004. *Hydrobiologia*, 554, 57–65
4. Grendaite, D.; Stonevicius, E. Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. *Geol. Geogr.* 2018, 4, 15–28.
5. Groetsch, P.M.M., Simis, S.G.H., Eleveld M.A. & Peters S. W.M., 2016. Spring blooms in the Baltic Sea have weakened but lengthened from 2000 to 2014. *Biogeosciences*, 13, 4959–4973.
6. Gross, L.; Thiria, S.; Frouin, R.; Mitchell, B.G. Artificial neural networks for modeling the transfer function between marine reflectance and phytoplankton pigment concentration. *J. Geophys. Res. Oceans* 2000, 105, 3483–3495.
7. Kowalczuk, P.; Olszewski, J.; Darecki, M.; Kaczmarek, S. Empirical relationships between Coloured Dissolved Organic Matter (CDOM) absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters. *Int. J. Remote Sens.* 2005, 26, 345–370.
8. Kratzer, S., Moore, G. Inherent Optical Properties of the Baltic Sea in Comparison to Other Seas and Oceans. *Remote Sens.* 2018, 10, 418
9. Ligi, M.; Kutser, T.; Paavel, B.; Uudeberg, K.; Reinart, A.; Soomets, T.; Vahtmäe, E. 2017 Variability of the optical properties of the Baltic Sea coastal waters. *Boreal Environ. Res.*
10. Lips, I., Lips, U., 2017. The Importance of *Mesodinium rubrum* at Post-Spring Bloom Nutrient and Phytoplankton Dynamics in the Vertically Stratified Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00407>
11. Moore, G.F.; Aiken, J.; Lavender, S.J. The atmospheric correction of water colour and the quantitative retrieval of suspended particulate matter in Case II waters: Application to MERIS. *Int. J. Remote Sens.* 1999, 20, 1713–1733.
12. Purina, I., Labucis, A., Barda, I., Jurgensone, I., Aigars J., 2018. Primary productivity in the Gulf of Riga (Baltic Sea) in relation to phytoplankton species and nutrient variability. *Oceanologia*, 60, 544-552
13. Reinart, A.; Kutser, T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. *Remote Sens. Environ.* 2006, 102, 74–85.
14. Simis, S.G.H.; Ylöstalo, P.; Kallio, K.; Spilling, K.; Kutser, T. Contrasting seasonality in optical-biogeochemical properties of the Baltic Sea. *PLoS ONE* 2017, 12, e0173357.
15. Skudra M., Lips U. (2016). Characteristics and inter-annual changes in temperature, salinity and density distribution in the Gulf of Riga. *Oceanologia* 59, 37-48. doi:10.1016/j.oceano.2016.07.001
16. Soomets, T.; Uudeberg, K.; Jakovels, D.; Brauns, A.; Zagars, M.; Kutser, T. Validation and Comparison of Water Quality Products in Baltic Lakes Using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI Data. *Sensors* 2020, 20, 742. <https://doi.org/10.3390/s20030742>.



17. Toming, K.; Kutser, T.; Uiboupin, R.; Arikas, A.; Vahter, K.; Paavel, B. Mapping Water Quality Parameters with Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument imagery in the Baltic Sea. *Remote Sens.* 2017, 9, 1070.
18. Wasmund, N. Phytoplankton periodicity in a eutrophic coastal water of the Baltic Sea. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 1994, 79, 259–285