

Klimata pārmaiņu ietekme uz jūras vidi:

Klimata pārmaiņu radīto izmaiņu Rīgas līča
ūdeņu termālas stratifikācijas perioda ilgumā
ietekmes uz dziļūdens skābekļa režīmu
raksturojums

**Eiropas Savienības Eiropas Jūrlietu, zvejniecības un
akvakultūras fonda finansēts projekts “Pētījumi
zināšanu uzlabošanai par jūras vides stāvokli integrētās
jūrlietu politikas ieviešanai” (NR 24-00-U1010801-000001)**

Līguma Nr. IL/58/2024 (12.06.2024)



Zemkopības ministrija



Lauku atbalsta dienests



Klimata un enerģētikas
ministrija

Izpildītājs: **Latvijas Hidroekoloģijas institūts**

Rīga, 2025

Saturs

Saturs	1
1. Ievads	2
2. Metodes	2
2.1. Vēsturisko datu atlase un izmantošana	2
2.2. Nākotnes prognožu izvērtēšana	2
3. Skābekļa koncentrāciju ietekmējošo faktoru un procesu vispārējs raksturojums.....	3
4. Termoklīna ietekmes uz piegrunts skābekļa krājumu raksturojums	5
5. Sezonālā skābekļa koncentrācijas dinamika	7
6. Klimata prognoze	9
7. Piegrunts skābekļa koncentrāciju prognoze.....	10
8. Kopsavilkums	11

1. Ievads

Baltijas jūrai ir raksturīga pastāvīga vertikālā ūdens slāņa stratifikācija, ko nosaka atšķirības ūdenī izšķīdušo sāļu (sāļums) koncentrācijās. Vienlaicīgi Baltijas jūrā veidojas sezonāla vertikālā ūdens slāņa stratifikācija, ko nosaka ūdens virsējā slāņa un dziļūdens temperatūras atšķirības – termiskā stratifikācija. Īpaši būtiska termiskā stratifikācija ir Rīgas līcim, jo Rīgas līcī praktiski neveidojas sāļuma atšķirību izraisītā ūdens vertikālā stratifikācija. Attiecīgi, Rīgas līcī atšķirībā no Baltijas jūras dziļajiem baseiniem piegrunts ūdens slānī sezonāli atjaunojas termiskās stratifikācijas laikā izlietotais skābekļa krājums. Tā kā ir sagaidāms, ka klimata izmaiņas, t.i., gaisa un attiecīgi ūdens virsējā slāņa temperatūras pieaugums, ietekmēs arī piegrunts ūdens slāņa skābekļa dinamiku, šī pētījuma ietvaros ir apzināts iespējamais piegrunts ūdens slāņa skābekļa krājuma izmaiņu scenārijs.

2. Metodes

2.1. Vēsturisko datu atlase un izmantošana

Projekta vajadzībām bija pieejami hidroķīmisko rādītāju novērojumu rezultāti sākot ar 1973.gadu (<https://latmare.lhei.lv/>). Tā kā, sākot ar 2005.gadu būtiski samazinājās novērojumu biežums, t.i., no apmēram 12 reizēm gadā līdz 3-5 reizēm gadā, tad sezonālās dinamikas vajadzībām izveidotā datu kopa tika ierobežota un izmantoti tika tikai dati no 1973.-2004.gadu perioda. Atlasītā datu kopa tika izmantota, lai apzinātu un raksturotu starpgadu sezonālo mainību, kā arī, lai identificētu tos gadus, kas reprezentē šobrīd novērojamo klimatisko apstākļu augšējās un apakšējās robežas, un ar lielu varbūtību varētu reprezentēt nākotnes klimatisko scenāriju.

Papildus, lai novērtētu telpiskās izkliedes ietekmi, tika izmantoti 2018.gadā veiktā pētījuma, kurā divas reizes tika apsekots lielāks staciju skaits, rezultāti.

2.2. Nākotnes prognožu izvērtēšana

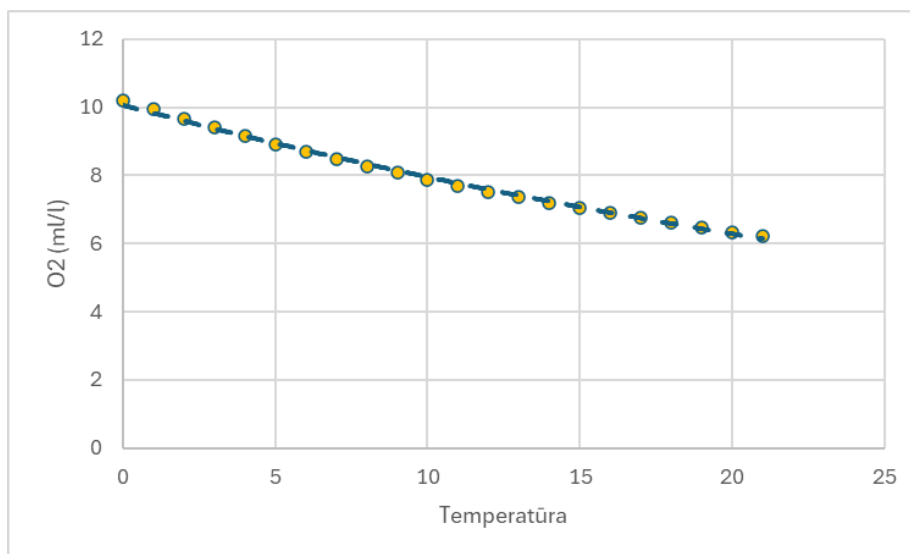
Nākotnes prognožu izvērtēšana tika balstīta uz modelētu un 2023.gadā publicētu datu masīvu (<https://zenodo.org/records/8248943>), kas aptvēra fizikālos parametrus periodam no 2015.gada līdz 2100.gadam. Dati satur 15 dziļuma slāņus – 2 m solis virsējā slānī un 4 m solis dziļākos slāņos. Horizontāli datu šūnas izmērs ir 0.5 jūras jūdzes. Katrai šūnai ir aprēķinātas (modelētas) mēneša vidējās vērtības.

No pieejamiem fizikāliem parametriem projekta vajadzībām bija izmantojama tikai temperatūra. Attiecīgi, tika atlasīti visi dati, kas reprezentē Rīgas līča centrālās daļas (dziļums ap 40 m) piegrunts ūdens slāni visam 2015.-2020.g. periodam. Ņemot vērā lielo datu izkliedi, vizualizācijai tika izmantotas mēneša 10 gadu vidējās vērtības visam Rīgas līča dziļūdens baseinam.

3. Skābekļa koncentrāciju ietekmējošo faktoru un procesu vispārējs raksturojums

Skābekļa koncentrāciju ūdenī ietekmē fizikāli - ķīmiskie apstākļi, kā arī ūdens floras un faunas kontrolēti procesi. Ja netiktu ņemti vērā bioloģiskie procesi, tad skābekļa koncentrācija ūdenī tiktu regulēta tikai ar skābekļa šķīšanu/ izdalīšanos uz ūdens - atmosfēras robežvirsmas, tiecoties saglabāt līdzsvara stāvokli. Šāda scenārija gadījumā ietekme būtu tikai fizikāli - ķīmiskiem parametriem un to sezonālām vai ilgtermiņa izmaiņām.

No fizikāli - ķīmiskajiem parametriem vislielākā ietekme uz skābekļa koncentrāciju ir temperatūrai (*1.Attēls*). Attiecīgi, tipiskā vasarā, uzsilstot ūdens slānim, maksimāli sagaidāmā skābekļa koncentrācija samazinās, Rīgas līča virsējā ūdens slāņa gadījumā par apmēram 40 %.



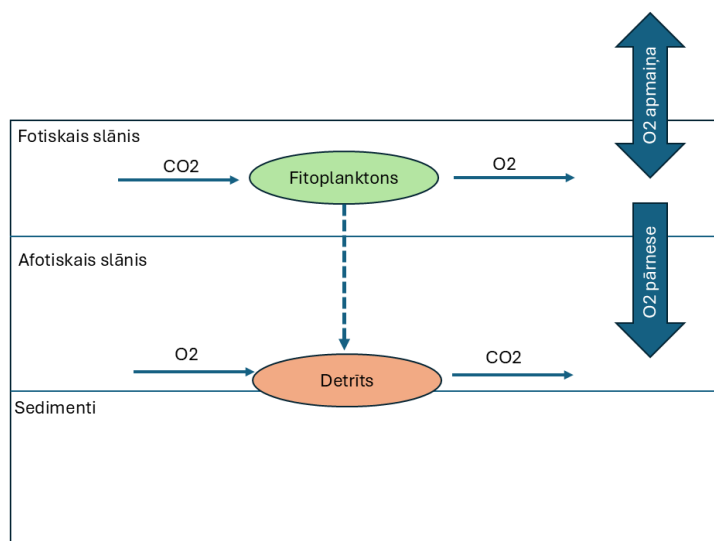
1.Attēls. Skābekļa piesātinājuma koncentrācijas un temperatūras korelācija

Skābekļa koncentrāciju ietekmē arī sāļums, bet izmaiņas, mainoties sāļumam, ir salīdzinoši nelielas. Bez tam sāļums variē nelielā amplitūdā. Attiecīgi, sāļuma faktors ir samērā nenožīmīgs.

Kā jau minēts, skābekļa koncentrāciju ūdens kolonnā būtiski ietekmē arī bioloģiskie organismi. Respektīvi, ūdens kolonnas fotiskajā slānī (slānis, kurā ir pietiekama saules ietekme fotosintēzes nodrošināšanai) autotrofie organismi (fitoplanktons) uzņem ūdenī esošos savienojumus (oglekli,

barības vielas un mikroelementus) un izdala skābekli (*2.Attēls*). Vienlaicīgi notiek organiskā materiāla sadalīšanās mikroorganismu darbības ietekmē. Dominējošais gan ir fotosintēzes process un skābekļa izdalīšanās. Attiecīgi, fotiskajā slānī skābekļa koncentrācija pat var pārsniegt piesātinājuma koncentrācijas līmeni.

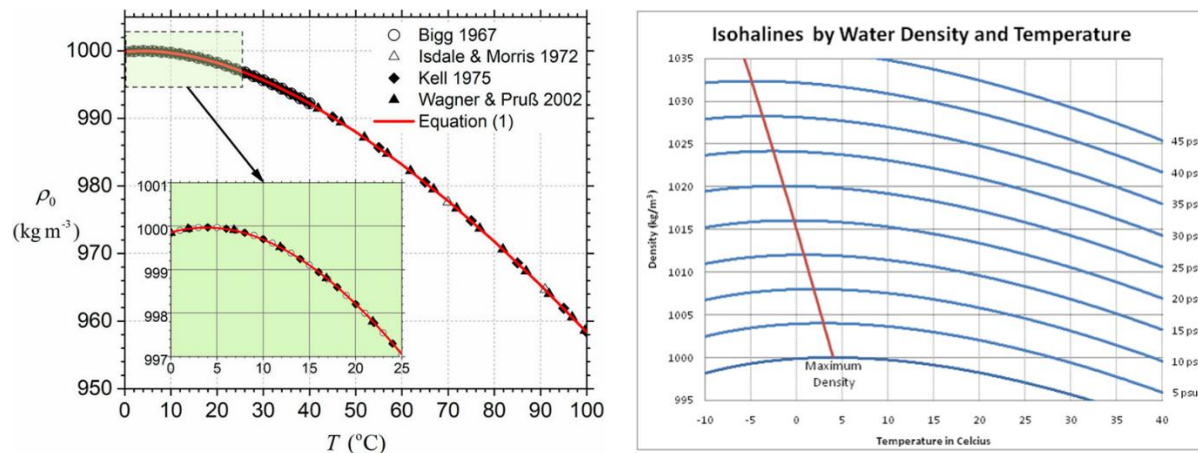
Organismiem atmirstot, tie sāk grimt līdz sasniedz jūras gutni. Gan grimstot, gan uz jūras gultnes notiek mikroorganismu kontrolēta skābekļa piesaistīšana un oglekļa dioksīda izdalīšanās, respektīvi, organiskā materiāla mineralizēšanās process. Faktiski afotiskajā slānī veikto mērījumu laikā reģistrētās skābekļa koncentrācijas kontrolē divi procesi - ar skābekli bagātu ūdeņu pārnese no fotiskā slāņa uz afotisko, tai skaitā uz piegrunts ūdens slāni, un organiskā materiāla mineralizēšanās. Procesu un to ietekmes ir detalizētāk apskatīti nākošajās nodaļās.



2.Attēls. Shematisks skābekļa aprites attēlojums

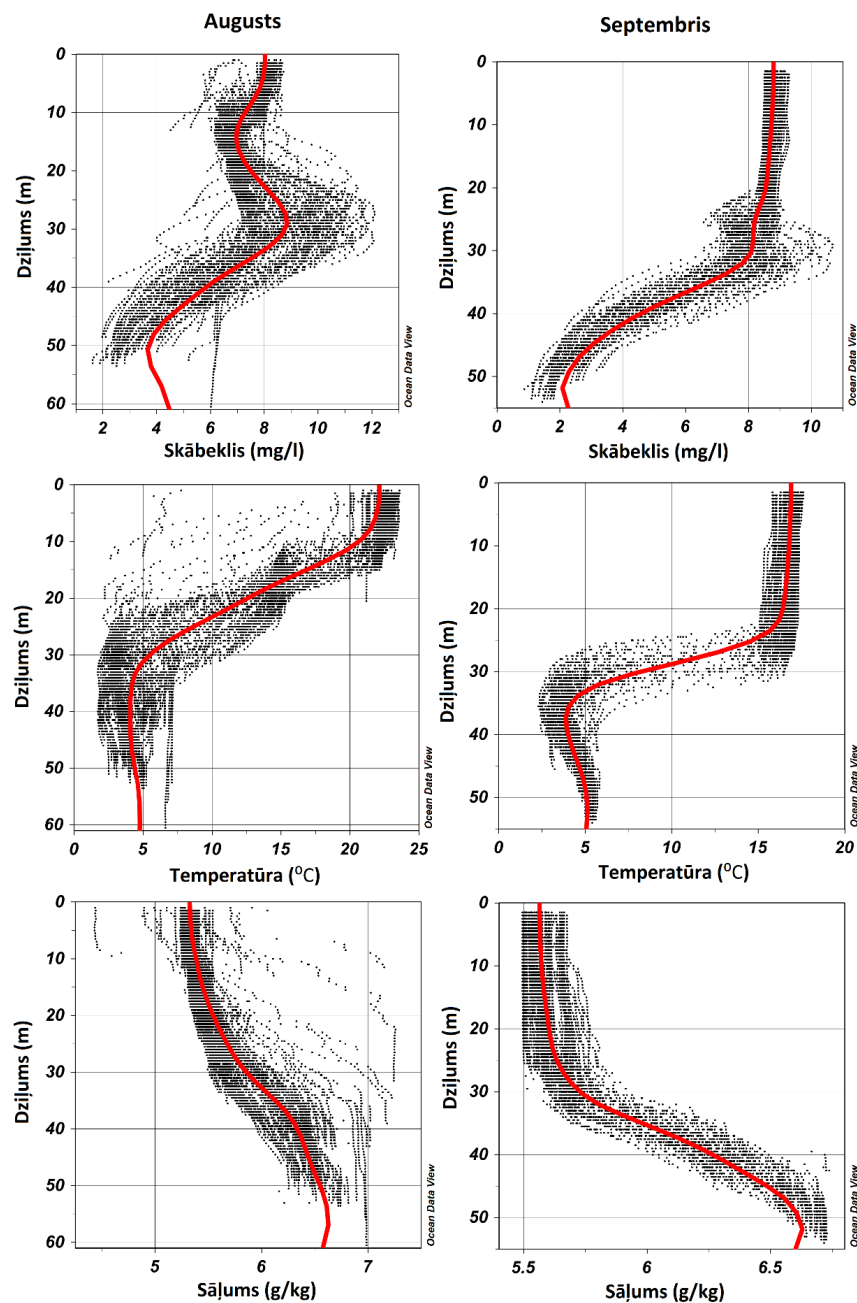
4. Termoklīna ietekmes uz piegrunts skābekļa krājumu raksturojums

Uzsilstot ūdenim, mainās tā blīvums (3.Attēls). Izmaiņas blīvumā ir šķietami nelielas.



3.Attēls. Ūdens temperatūras (attēls pa kreisi) un sāļuma (attēls pa labi) ietekme uz ūdens blīvumu

Tomēr atšķirības ūdens blīvumā ir pietiekamas, lai apturētu vai vismaz ierobežotu ūdens slāņu vertikālo migrāciju. Tā rezultātā veidojas izteikta trīs slāņu struktūra – virsmas samaisītais slānis ar relatīvi vienādu ūdens temperatūru, pārejas ūdens slānis (termoklīns), kurā novērojama temperatūras samazināšanās, un piegrunts ūdens slānis, kurā ir novērojama relatīvi vienāda relatīvi zema ūdens temperatūra (4. Attēls).



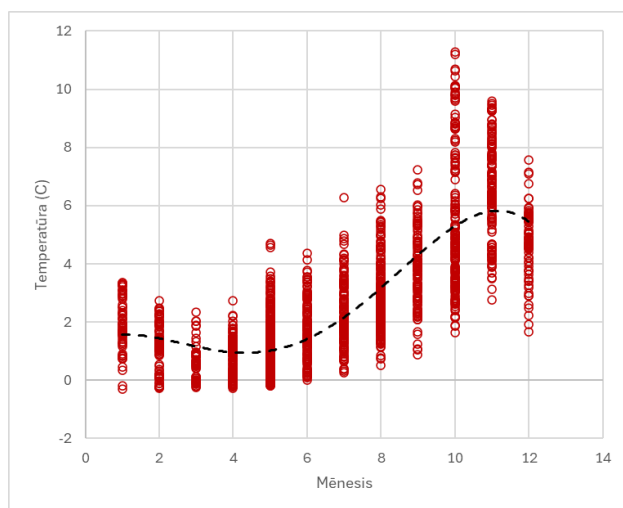
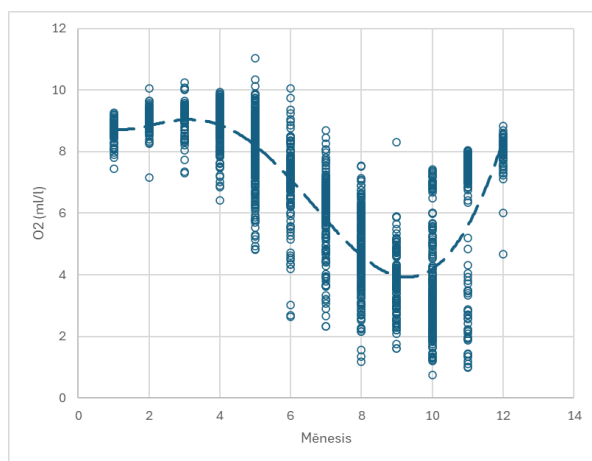
4.Attēls. Izšķīdušā skābekļa koncentrācijas (augšā), temperatūras (pa vidu) un sāļuma (lejā) profili 2018.gada augustā un septembrī Rīgas līcī (ar sarkanu līniju atspoguļota konkrēta parametra vidējā profila dinamika). Adaptēts no Līguma Nr. IL/106/2017 nodevuma

Kā jau minēts iepriekš, virs termoklīna esošā ūdens slānī skābekļa koncentrāciju kontrolē autotrofo organismu aktivitāte – skābekļa izdalīšana un temperatūras (arī sāļuma) noteiktais šķīdības koeficients. Attiecīgi, virsējā ūdens slāņa skābekļa krājums ir salīdzinoši labs. Termoklīna izveidošanās gan ierobežo šī ar skābekli bagātinātā ūdens nonākšanu dziļākos ūdens slāņos, kā

rezultātā ir novērojama skābekļa koncentrācijas samazināšanās, līdz tā sasniedz minimālās vērtības zem termoklīna esošā piegrunts ūdens slānī.

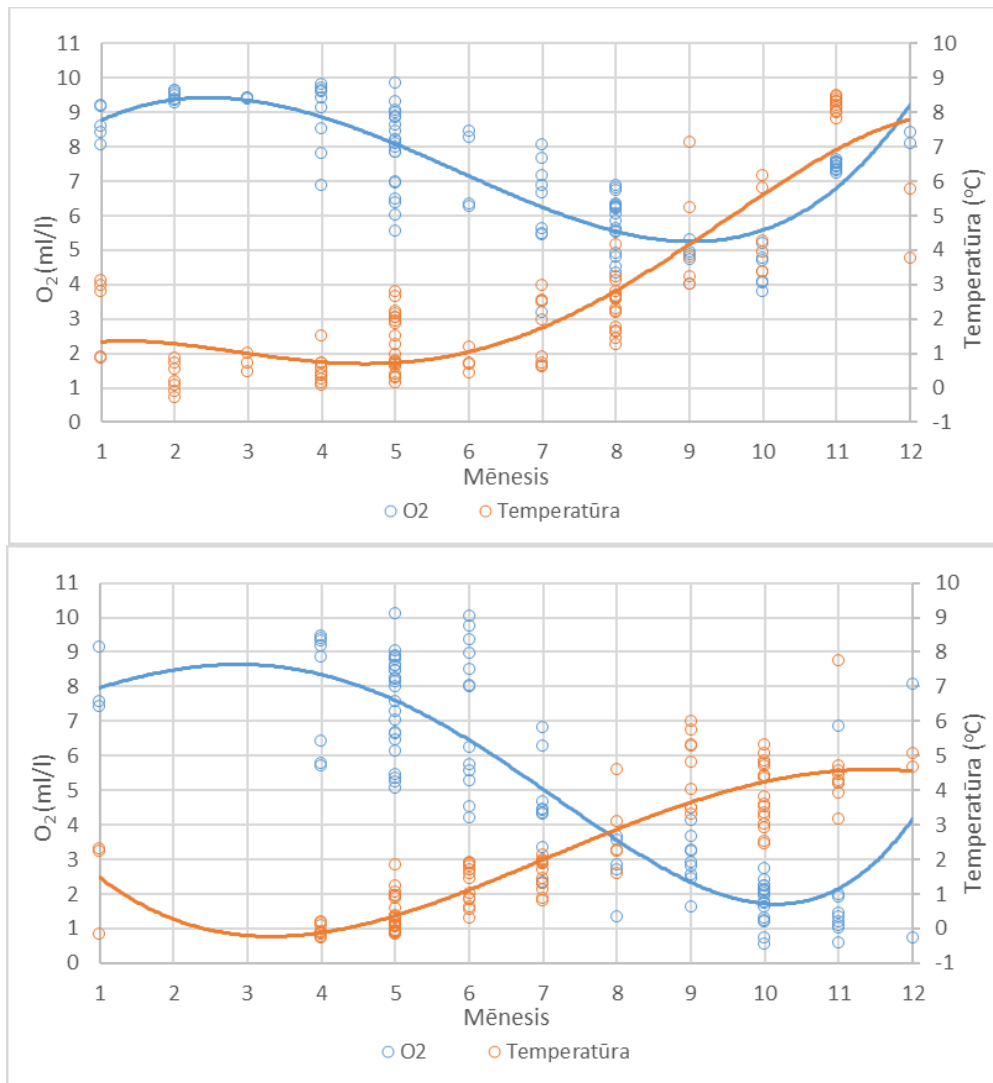
5. Sezonālā skābekļa koncentrācijas dinamika

Ziemas sezonā, kad virsējā ūdens slānī bioloģiskā aktivitāte ir praktiski tuvu nullei un viss vertikālais ūdens stabs Rīgas līcī ir vienmērīgi samaisīts, skābekļa koncentrācija piegrunts ūdens slānī ir visaugstākā (5.Attēls) – svārstās ap 100 % piesātinājumu. Savukārt ūdens temperatūra ziemas mēnešos ir viszemākā – svārstās intervālā no aptuveni – 0.5 °C līdz 3.4 °C, atkarībā no ziemas. Tā kā ūdens temperatūra ir salīdzinoši zema, tad arī bentisko organismu aktivitāte ir zema, un ūdens vertikālās samaisīšanās rezultātā ienestais skābekļa krājums ir pietiekams, lai kompensētu patērēto



5.Attēls. Sezonālas skābekļa koncentrācijas un temperatūras izmaiņas Rīgas līča piegrunts ūdens slānī 1973.-2004.g. periodā

Pirmās izmaiņas piegrunts skābekļa koncentrācijā ir konstatējamas maijā - jūnijā, kad sedimentus ir sasniegusi pavasara ziedēšanas laikā izveidotā fitoplanktona biomasa. Neskatoties uz zemo temperatūru, augstvērtīga barības krājuma nonākšana uz sedimentu virsmas iniciē bentisko organismu aktivitāti un attiecīgi skābekļa patēriņu. Eksperimentāli ir noskaidrots, ka bentisko organismu aktivitātes rezultātā skābekļa patēriņš uz grunts - ūdens robežvirsmas sastāda 1.5-2 mmol m⁻²h⁻¹ (Aigars et al./Continental Shelf Research 105 (2015)112–120). Vasaras otrā pusē un rudenī, kad liela daļa no pavasarī sedimentētā materiāla ir demineralizēta un bentisko organismu uztur vasarā sedimentētais, skābekļa patēriņš samazinās uz apmēram 0.5 mmol m⁻²h⁻¹ (Aigars et al./Continental Shelf Research 105 (2015)112–120). Tā kā ūdens virsējā slāņa sasilšana arī sākas aprīlī, tad sāk veidoties termoklīns, kas ierobežo piegrunts ūdens slāņa skābekļa krājuma atjaunošanos. Abu šo procesu rezultātā skābekļa krājums samazinās līdz sasniedz minimumu.

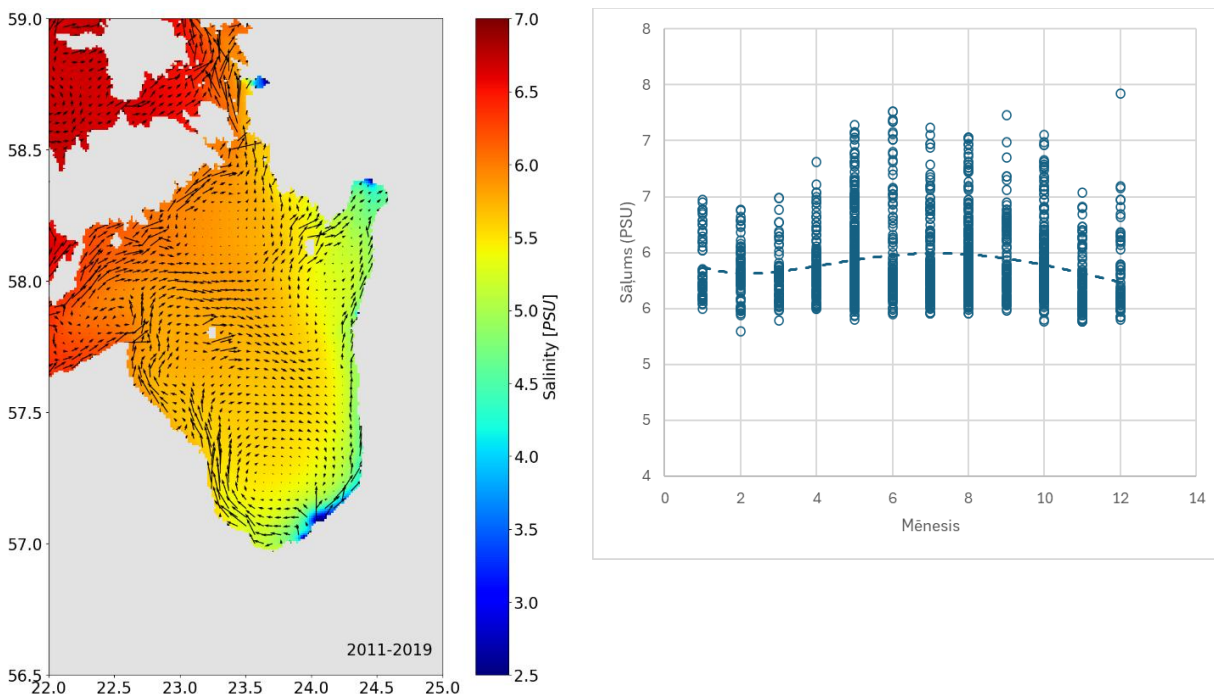


6.Attēls. *Skābekļa un temperatūras sezonālās dinamikas piemēri. Augšējais attēls – 1988.un 1995.gads. Apakšējais attēls – 1980.un 2003.gads*

Ilgttermiņa novērojumi liecina, ka minimālās vērtības parasti tiek sasniegtas septembrī, kad ūdens virsējais slānis sāk atdzist (5.Attēls), bet ūdens temperatūra vēl nav pietiekama lai pilnībā izjauktu termoklīnu. Savukārt jau oktobrī ūdens virsējais slānis ir pietiekami atdzisis, lai, kombinācijā ar vējainākiem, rudenim raksturīgiem, laika apstākļiem, izjauktu termoklīnu un ienestu piegrunts slānī jaunus skābekļa krājumus. Tai pašā laikā jāatzīmē, ka ilgtermiņa novērojumu rezultāti uzskatāmi parāda, ka periodiski atkārtojas gadi, kad relatīvi siltais laiks, kas turpinās arī rudens sezonā, nobīda skābekļa minimuma iestāšanos uz oktobri vai pat atsevišķos gados uz novembri (6.Attēls).

Vienkāršoti aprēķini parāda, ka skābekļa krājums jūras gultnei vistuvākajā 1 m ūdens slānī pie eksperimentāli noteiktā skābekļa patēriņa intensitātes tiktu izlietots apmēram 20 dienu laikā.

Faktiski, skābekļa krājums piegrunts ūdens slānī tiek papildināts zem termoklīna esošā ūdens slāņa ūdens kustības ietekmē, kas nosaka novērojamo skābekļa koncentrācijas gradientu (*4.Attēls*). Zem termoklīna esošā ūdens slāņa kustība, zemūdens straumes, ir salīdzinoši maz pētītas un, attiecīgi, nepietiekami labi aprakstītas. Relatīvi liela ietekme ir salīdzinoši labi aprakstītai sāļāka ūdens ienesei Rīgas līcī no Baltijas jūras caur jūras šaurumiem – Irbes un Muhu.



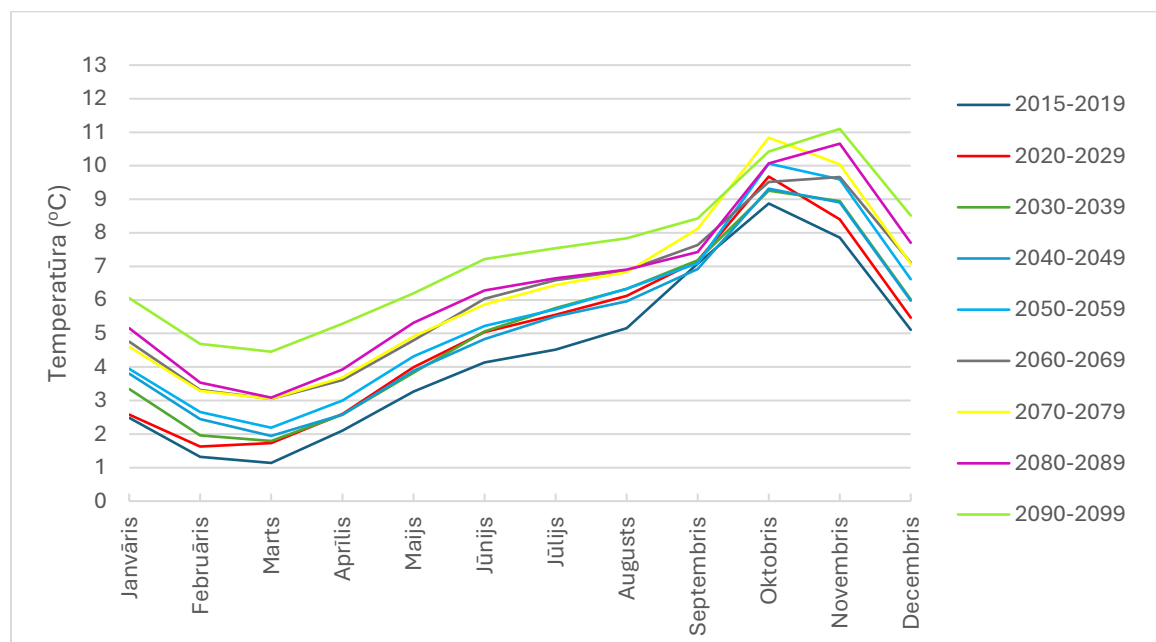
7.Attēls. Rīgas līča ūdeņu sāļuma horizontālais gradients (visas sezonas) (attēls pa kreisi) un sāļuma sezonālās izmaiņas piegrunts slānī (periods 1973.-2004.g.)

Respektīvi, ir novērojams kopējais sāļuma horizontālais gradients, kur Rīgas līča dienvidu daļu ietekmē upju ienestais saldūdens un ziemeļu daļu sālsūdens ieplūde no Baltijas jūras (*7.Attēls*). Tai pašā laikā piegrunts ūdens slānī ir novērojamas sezonālas sāļuma izmaiņas, kur periodā no maija līdz augustam caur šaurumiem ienestais sālsūdens akumulējas zem termoklīna, vienlaicīgi papildinot piegrunts ūdens slāņa skābekļa krājumu un pastiprinot vertikālo stratifikāciju, kā arī paaugstina šī slāņa ūdens temperatūru. Rudenī, kad tiek izjaukts termoklīns, šis sāļākais ūdens slānis tiek izklaidēts visā ūdens kolonnā.

6. Klimata prognoze

Modeļaprēķini liecina, ka klimata izmaiņas turpināsies arī nākamajās dekādēs. JPI projekta CE2COAST ietvaros veiktā Rīgas līča fizikāli - ķīmiskā parametru stāvokļa reanalīze un nākotnes

prognoze (<https://zenodo.org/records/8248943>) liecina, ka arī Rīgas līča ūdens temperatūra turpmākajās dekādēs pieaugs. Šī pārskata vajadzībām no modeļaprēķina rezultātiem ir atlasīti visi ūdens temperatūras dati, kas reprezentē 40 m ūdens slāni (8.Attēls).



8.Attēls. Prognozētās ūdens slāņa (40 m) temperatūras sezonālās dinamikas izmaiņas līdz 2100.gadam

Kā var uzskatāmi redzēt (8.Attēls), prognozētās temperatūras sezonālā dinamika saglabās šobrīd novērotās temperatūras sezonālās dinamikas iezīmes, t.i., ziemas sezonā ūdens atdzīsīs un sāks pieaugt aprīlī. Ir sagaidāms, ka maksimālās temperatūras no oktobra pārvirzīsies uz novembri, pagarinot siltā perioda ilgumu. Bez tam kopējā tendence uzrāda temperatūras pieaugumu visos mēnešos.

7. Piegrunts skābekļa koncentrāciju prognoze

Līdz 2000-šajiem gadiem Rīgas līča virsējā slāņa ūdens temperatūra ziemā regulāri sasniedza ūdens sasaldšanas robežu, un Rīgas līcis vismaz daļēji aizsala. Attiecīgi veidojās situācija, kad ūdens virsējā slāņa temperatūra bija būtiski zemāka kā piegrunts ūdens slāņa temperatūra, kas veidoja ūdens blīvuma atšķirības. Respektīvi, ar skābekli bagātais ūdens no virsmas bija blīvāks, kā ar skābekli nabadzīgais piegrunts ūdens slānis, un, šim ūdenim grimstot, atjaunojās piegrunts ūdens slāņa skābekļa krājums.

Modeļaprēķini (https://lhei.lv/wp-content/uploads/2023/11/Ce2Coast_report.pdf) liecina, ka ledus veidošanās varbūtība tuvākajās dekādēs būtiski samazināsies. Ūdens virsējam slānim atdziestot, joprojām veidosies temperatūras starpība starp virsējo ūdens slāni un piegrunts ūdens slāni, kas nodrošinās vertikālo ūdens apmaiņu. Bet ir sagaidāms, ka grimstošā virsmas ūdens skābekļa koncentrācija ziemas sezonā būs par 10-20 % zemāka kā līdz 2000-šajiem. Respektīvi, skābekļa krājums, kas būs pieejams bentiskajiem organismiem pavasara ziedēšanas laikā radītās biomasas mineralizācijai, būs mazāks. Attiecīgi, esošais skābekļa krājums tiks izsmelts ātrāk. Vasaras termiskā stratifikācija saglabāsies, kā rezultātā vertikālā ūdens masu sajaukšanās vasaras sezonā būs ierobežota kā līdz šim. Tāpat nav sagaidāms, ka ūdens apmaiņa starp Rīgas līci un Austrumgotlandes baseinu kļūs intensīvāka, t.i., ienestā sāļākā ūdens apjoms no Austrumgotlandes baseina caur Irbes šaurumu saglabāsies līdzšinējā līmenī.

Trīsdesmit gadu (5.Attēls) vidējā skābekļa vērtība piegrunts ūdens slānī svārstās ap 4 ml/l un tiek sasniegta septembrī. Pie nemainīgām slāpekļa un fosfora slodzēm ir sagadāms, ka turpmāko dekāžu vidējā minimālā skābekļa vērtība noslīdēs līdz 2 ml/l un tiks sasniegta jau jūlijā - augustā, kā tas ir noticis atsevišķos, par ekstremāliem uzskatāmos, gados (6.Attēls). Pagarinoties termālās stratifikācijas periodam, ir sagaidāms, ka ļoti zemas skābekļa koncentrācijas regulāri saglabāsies ilgāku laiku – līdzšinējo 1-2 mēnešu vietā sagaidāmi 3-4 mēneši.

8. Kopsavilkums

Uzsākot Projekta aktivitātes īstenošanu 2024.gada jūlijā, tika veikts pirmais vēsturisko datu apskats, kā rezultātā tika konstatēts, ka “ekstremāli” klimatiskie apstākļi, t.i., klimatiskie apstākļi, kas būtiski atšķiras no vidējā, atkārtojas reizi 10-20 gados. Attiecīgi, sākotnēji plānotie novērojumi jūrā, kas aptvertu nepilnu 2025.gadu, būtisku ieguldījumu pētījuma sadaļas mērķa sasniegšanā nesniegtu. Tādēļ pētījums tika balstīts uz vēsturiskajiem un modelētajiem datu masīviem.

Vēsturiskos datus projekta aktivitātes vajadzībām varēja izmantot tikai par periodu no 1973.gadam līdz 2004.gadam, jo pēc 2004.gada būtiski samazinājās novērojumu biežums. Neskatoties uz to, pētījuma vajadzībām varēja atlasīt pagātnes klimatiskos apstākļus, kas arvien biežāk atkārtosies arī nākotnē. Attiecīgi, varēja iegūt ticamu nākotnes apstākļu prognozi. Respektīvi, ja piepildīsies prognozētais klimatisko apstākļu scenārijs un netiks veiktas papildus aktivitātes slāpekļa un fosfora slodžu samazināšanā, tad jau vasaras mēnešos piegrunts ūdens slāņa vidējā skābekļa koncentrācija svārstīsies ap 2 ml/l. Šādu koncentrāciju sasniedzot, bentiskie organismi (gan zoobentoss, gan bentiskās zivis) atrodas skābekļa deficīta apstākļu izraisītā stresa stāvoklī. Šeit gan jāņem vērā, ka 2 ml/l ir sagaidāmā vidējā vērtība. Respektīvi - periodiski ir sagaidāms, ka skābekļa koncentrācija būs zemāka par vidējo un būtiski pasliktinās bentisko organismu dzīves vidi.