



Downscaling Climate and Ocean Change to Services: Thresholds and Opportunities

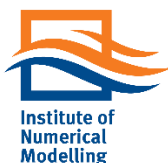
NOSLĒGUMA ATSKAITE

Latvijas Universitāte, Skaitliskās modelēšanas institūts

Latvijas Hidroekoloģijas institūts

Novembris, 2023

Project CE2COAST is funded by ANR (FR), BELSPO (BE), FCT (PT), IZM (LV), MI (IE), MIUR (IT), Rannis (IS) and RCN (NO) through the 2019 "Joint Transnational Call on Next Generation Climate Science in Europe for Oceans" initiated by JPI Climate and JPI Oceans.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Līguma Nr. 23-11.17e/20/246

Projekta nosaukums: Downscaling Climate and Ocean Change to Services: Thresholds and Opportunities

Projekta akronīms: CE2COAST

Projekta līguma numurs: 23-11.17e/20/246 un 23-11.17e/20/176

Projekta koordinators: Professor Richard Garth James Bellerby, Norwegian Institute for Water Research, e-pasts Richard.Bellerby@niva.no

Projekta partneri:

1. Norwegian Institute for Water Research, Norwegian Research Centre (Norvēģija)
2. Universitè de Liège (Beļģija)
3. Laboratoire d'études en géophysique océanographie spatiales (Francija)
4. Marine Institute, National University of Ireland Galway (Īrija)
5. Marine and Freshwater Research Institute (Islande)
6. Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Itālija)
7. Latvijas Universitāte (Latvija)
8. Latvijas Hidroekoloģijas institūts (Latvija)
9. IST University Lisbon, Associação para o desenvolvimento do Atlantic International Research centre (Portugāle)

SATURS

Projekta Ce2Coast populārzinātnisks pārskats	4
1. Stāvoklis, izkliede un trendi (WP1)	6
1.1. Datu pārvaldības plāns (T1.1)	6
1.2. Datu pievienošana (T1.2)	6
1.3. Pagātnē novērotā klimata stāvokļa, izkļedes un trendu analīze (T1.3)	6
1.4. Datu kvalitātes un reģionālā pārklājuma izvērtēšana (T1.4)	11
2. Zemes sistēmas modeļu reģionalizācija (WP2).....	13
2.1. Modelēšanas pieeja	13
2.2. Reanalīzes aprēķins.....	14
2.3. Nākotnes projekciju aprēķins.....	15
2.4. Mērogošana un sistemātisko kļūdu korekcija.....	16
3. Reģionālie jūras klimata modeļaprēķini Rīgas līcim (WP3).....	17
3.1. Modeļaprēķini.....	17
3.2. Temperatūra	17
3.3. Sāļums	19

3.4. Straumes	20
3.5. Ledus	21
3.6. Viļņi	22
3.7. Ūdenslīmenis.....	24
3.8. Indikatori	25
3.9. Dabiskās mainības un trendu analīze.....	28
4. Klimata maiņas ietekme uz Rīgas jūras līci (WP4).....	35
4.1. Modeļreģiona identificēšana (T4.1).....	35
4.2. Svarīgāko robežu un pakalpojumu tolerances identificēšana (T4.2)	36
4.3. Karstie punkti un patvēruma vietas (T4.3).....	38
4.4. Iespējas (T4.4)	38
4.5. Brīdināšanas sistēma (T4.5)	39
4.6. Tālākizglītības modulis (T4.6).....	39
5. Zinātne un sabiedrība (WP5)	41
5.1. Interesu koordinācija (T5.1).....	41
5.2. Koprades stratēģija (T5.2).....	41
5.3. Produkti izplatīšanai (T5.3)	41
5.4. Zinātības nodošana (T5.4).....	43
5.5. Starptautisks darbseminārs (T5.5)	45
5.6. Trūkumu analīze un turpmākie pētījumi (T5.6)	45
Literatūras atsauces.....	47
Pielikumi.....	48

Projekta Ce2Coast populārzinātnisks pārskats

KPI “Klimats” un KPI “Okeāns” projekts “Ce2Coast - Downscaling Climate and Ocean Change to Services: Thresholds and Opportunities” 2020-2023.gados pētīja jūras sistēmu reakciju uz globālajām pārmaiņām, prognozēja nākotnes jūras stāvokļus, to kritiskos elementus, riskus, izaicinājumus un iespējas.

Latviju 8 valstu realizētajā projektā pārstāvēja Latvijas Universitātes Skaitliskas modelēšanas institūts (LU SMI) un Latvijas Hidroekoloģijas institūts (LHEI), fokusējoties uz pilotteritoriju – Rīgas jūras līcis. LU SMI ir nozīmīga jūras modelēšanas pieredze – kopš 2004.g. jūras prognozes tiek piegādātas NBS, bet modelēšanas rezultāti atspoguļoti www.water.lv. LHEI veic jūras ekosistēmas pētījumus un vides monitoringu, tā novērojumi publiski pieejami www.latmare.lhei.lv.

Projekta mērķi Latvijas partneriem bija izvērtēt Rīgas līča fizikālo parametru ilglaicīgās izmaiņas, sagatavot skaitliskās okeanogrāfijas modeļaprēķinu rezultātus 1993-2100.gadiem un analizēt novērotās ūdens caurspīdības un krāsas likumsakarības Rīgas līcī, sasaistot tās ar klimata pārmaiņu radītām slodzēm, lai apzinātu šo slodžu visvairāk ietekmētos Rīgas līča apgabalus (karstos punktus), kā arī piekrastes apgabalus, kuros neskatoties uz klimata pārmaiņām saglabājas labvēlīgi apstākļi jūras dzīvotnēm (patvēruma vietas).

Projekta ietvaros analizētā fizikālo parametru datu rinda deva iespēju identificēt ūdens caurspīdības un sāļuma “lūzuma punktu” 1990-tajos, t.i., straujas izmaiņas īsā laikā, un sasaistīt šīs izmaiņas ar klimata izmaiņu ietekmē notikušajām izmaiņām ūdens apmaiņas starp Ziemeļjūru un Baltijas jūru režīmā.

Projekta laikā tika arī sagatavota Rīgas līča fizikālo stāvokļa parametru vēsturiska rekonstrukcija – Rīgas līča ilgtermiņa okeanogrāfiskā reanalīze 1993.-2021. gadam. Tā izveidota, izmantojot LU SMI veidotu skaitliskās okeanogrāfijas modeli LU HBM, kas balstīts uz Eiropas pētnieciskajā telpā pazīstamo okeanogrāfisko modeli HIROMB-BOOS. Modeļaprēķini validēti ar mērījumu datiem reanalīzes laika posmā. Tie raksturo līdzšinējā jūras stāvokļa klimatiskās vērtības, sezonālo gaitu un dabisko mainību. Mērogojot CMIP6 nākotnes klimata projekciju RCP8.5 veikts augstas izšķirtspējas ilgtermiņa Rīgas jūras līča nākotnes klimatiskais aprēķins. Tā rezultāti ir fizikālo parametru datu rindas līdz 2100. gadam. Visiem aprēķiniem izšķirtspēja ir 1 kvadrātkilometrs pa jūras virsmu, 2-4 m pa dziļumu, un 1 stunda – laikā. Reanalīzē un nākotnes klimata aprēķinā ietverti sāļums, temperatūra, straumes ātrums un virziens, ūdenslīmenis, ledus apstākļi, viļņu raksturojums – augstums, virziens un enerģijas plūsma.

Aprēķinātas iesaistītām pusēm vajadzīgas (ekosistēmai un dzīvīem organismiem nozīmīgas) indikatoru izmaiņas līdz 2100. gadam, raksturotas un vizualizētas iespējamās klimata

pārmaiņu slodžu ietekmes, kā arī izmaiņas jūras pakalpojumos piekrastē. Apzinātas fizikālo parametru robežvērtības, kas ir kritiski nozīmīgas piekrastes organismiem, kā arī, izmantojot gan šī projekta ietvaros modelētos, gan publiski pieejamos attālinātas izpētes datus, izstrādāts fizikālo parametru telpiskais gradients. Izstrādātais fizikālo parametru gradients ir izmantots gan lai novērtētu klimata izmaiņu ietekmi uz piekrastes ūdeņu apakš-baseiniem, identificējot ietekmētākās un mazāk ietekmētās teritorijas, gan lai sasaistītu novēroto ietekmi ar nozīmīgāko sugu telpisko izplatību.

Projekta ietvaros Latvijā rīkots seminārs, individuālas tikšanās ar ieinteresētām pusēm; tā rezultāti vairākkārt prezentēti VARAM Jūras telpiskās plānošanas darba grupai. Darba rezultāti iesniegti publicēšanai zinātniskā periodikā (2 raksti), prezentēti zinātniskās konferencēs, vides politikas stratēģijas darba grupās un plašākai sabiedrībai. Modeļaprēķinu rezultāti deponēti publiskai pieejai datu krātuvē Zenodo: <https://zenodo.org/record/8248943> un <https://zenodo.org/records/10069092>. Klimatisko aprēķinu vizualizācija brīvi pieejama kā Rīgas jūras līča fizikālo parametru animētas kartes LU SMI vietnē apskatītajam laika periodam pieejamas Latvijas Universitātes uzturētās vietnēs: Rīgas līča fizikālo parametru dati 1993-2100: <http://www.modlab.lv/Meteo/FimarWeb/ce2coast/index.htm>.

Kontakti un papildinformācija:

LU SMI www.modinst.lv, uldis.bethers@lu.lv ; LHEI www.lhei.lv, juris.aigars@lhei.lv

1. Stāvoklis, izkliede un trendi (WP1)

1.1. Datu pārvaldības plāns (T1.1)

Projekta datu pārvaldības plāns (D 1.1). Projekta ietvaros apmaiņa ar datiem notika, izmantojot publiskas datu krātuves, kas nodrošina datu pieejamību ilgā laika posmā. Darba starprezultātu apmaiņai tika izmantota arī datu apmaiņa īstermiņa serveros – piemēram, failiem.lv un wetransfer. Projekta partneriem kopējs projekta datu pārvaldības plāns (nav publiskojams).

1.2. Datu pievienošana (T1.2)

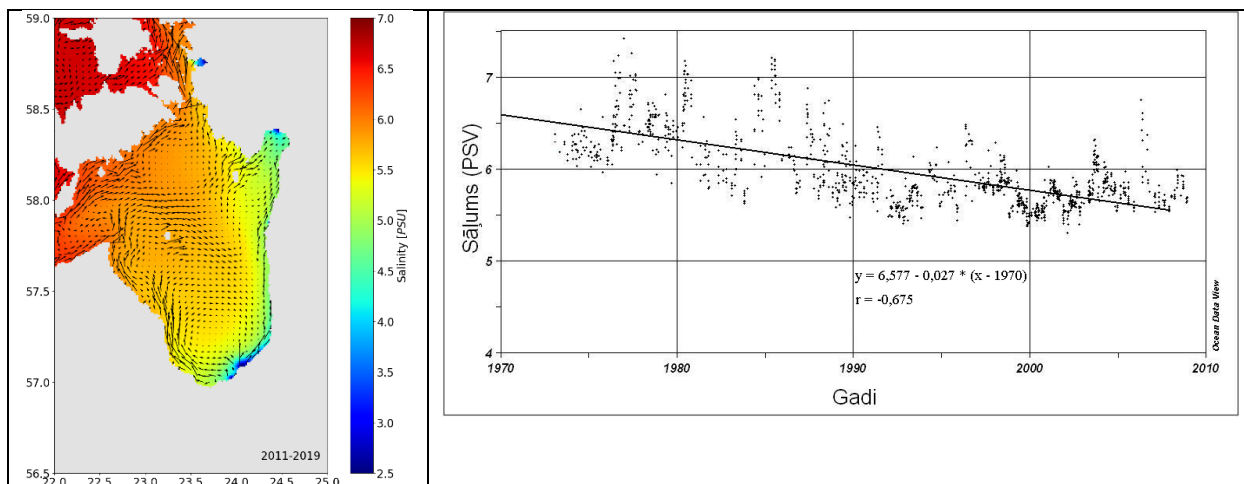
Datu pievienošana publiskās datu bāzēs (D1.2). Pieejamie dati pēc projekta noslēguma:

- 1) Monitoringa dati Latvijas jūras monitoringa stacijās: www.latmare.lhei.lv
- 2) Rīgas jūras līča reanalīzes un nākotnes projekciju modeļaprēķini 1993-2100 gadiem ZENODO platformā: <https://zenodo.org/record/8248943> un <https://zenodo.org/records/10069092>

1.3. Pagātnē novērotā klimata stāvokļa, izkriedes un trendu analīze (T1.3)

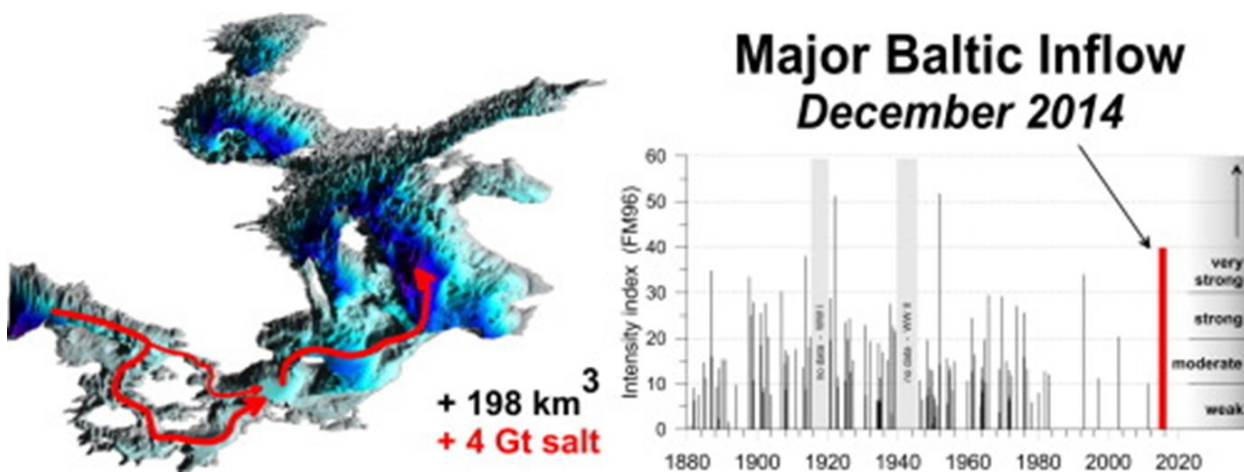
Pagātnē novērotā klimata noteiktā stāvokļa, izkriedes un trendu analīze (D1.3). Baltijas jūrā raksturīgākās izmaiņas, kas tiek asociētas ar klimata izmaiņām, ir ziemas ledus segas samazināšanās (<https://www.eea.europa.eu/ims/arctic-and-baltic-sea-ice>) un izmaiņas hidroloģiskajā režīmā, samazinoties sālsūdens ieplūdēm no Ziemeļjūras (<https://www.io-warnemuende.de/major-baltic-inflow-statistics-7274.html>). Ledus segas samazinājums ir novērojams no 18 gs. beigām/19.gs. sākuma, ar izteiktu paātrinājumu kopš 1980-tajiem. Sālsūdens ieplūžu dati ir pieejami no 19 gs. beigām. Līdz 1980-tajiem tajos nav novērojamas izteiktas izmaiņas. Savukārt pēc 1980-tajiem ieplūžu biežums ir krasi samazinājies.

Ņemot vērā izvēlēto modeļreģiona, Rīgas līča (4.1. nodaļa), īpatnības, kā arī pieejamo parametru, kurus ir ietekmējušas (vai ir potenciāls ietekmēt) klimata izmaiņas, kopumu, šīs aktivitātes ietvaros galvenokārt tika strādāts ar sālsūdens ieplūžu ietekmētajiem parametriem – ūdens sāļums un caurspīdība. Abi parametri ir būtiski bioloģiskās daudzveidības nodrošināšanai un to izmaiņas var atstāt ievērojamu negatīvu ietekmi uz piekrastes sugām un to sabiedrībām. Abiem parametriem dati no Rīgas līča centrālās daļas ir pieejami sākot ar 1973.-1978.gadu. Piekrastes zonā novērojumi ir uzsākti vēlāk un veikti fragmentāri, kas ir būtisks trūkums datu analīzē, jo abiem parametriem ir novērojams izteikts horizontāls gradients (skat. sāļuma attēlu 1.1.), kas ir skaidrojams ar Rīgas līča fizikāli ģeogrāfiskiem faktoriem, t.i., saldūdens ieplūde pamatā ir lokalizēta Rīgas līča dienvidu (Daugava, Lielupe un Gauja) un ziemeļaustrumu (Salaca un Pērnavas upe) daļās. Savukārt, ūdens apmaiņa ar Baltijas jūru (sālsūdens ieplūde) pamatā notiek caur ziemeļrietumos esošo Irbes šaurumu.



Attēls 1.1. Rīgas līča ūdens virsējā slāņa sāļuma telpiskais sadalījums un dominējošās straumes (pa kreisi) un centrālās daļas sāļuma izmaiņas laikā (pa labi).

Šo dabīgi izveidojušos sāļuma horizontālo gradientu vēl pastiprina dominējošo vēju radītās virsējā ūdens slāņa straumes (attēls 1.1), kuru ietekmē mazāk sāļais ūdens tiek “piespiests” pie Rīgas līča austrumu piekrastes. Attiecīgi, pat viena apsekojuma laikā sāļums starp novērojumu stacijām var atšķirties par vairākām praktiskā sāļuma vienībām (PSV). Starpgadu atšķirības nokrišņu režīmā un variācijas dominējošo vēju virzienos rada arī izteiktu sāļuma vērtību starpgadu izkliedi (attēls 1.1). Attiecīgi, lai spriestu par sāļuma vērtību izmaiņu trendiem, ir nepieciešamas relatīvi garas datu rindas. Kā jau minēts, Rīgas līča piekrastes rajonos šādas datu rindas nav pieejamas. Tādējādi, pagātnē notikušās izmaiņas tika analizētas balstoties uz datiem, kas reprezentē Rīgas līča atklāto daļu.

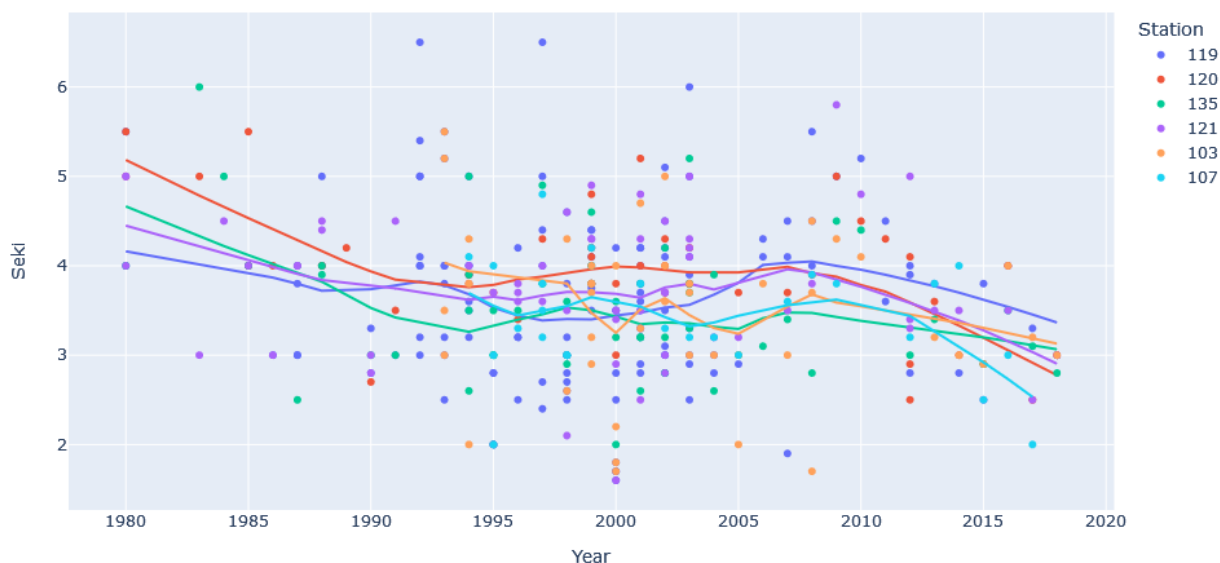


Attēls 1.2. Sālsūdens ieplūdes Baltijas jūrā no Ziemeļjūras dinamika. Avots: Mohrholt et al. (2015) doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.03.005.

Ilgtermiņā, samazinoties sālūdens ieplūžu biežumam un intensitātei Baltijas jūrā (attēls 1.2), ir mainījusies arī sāluma dinamika Rīgas līcī. Sākot ar 1973. gadu, Rīgas līcī var novērot ūdens sāluma samazināšanās trendu (attēls 1.1) sālūdenim samazinoties par aptuveni 1 PSV – no vidēji 6,5 PSV 1970. gadu sākumā līdz aptuveni 5,5 PSV mūsdienās. Pie tam, sāluma samazināšanās faktiski tika novērota tikai līdz 1990-to gadu sākumam. Savukārt, ne novērojumu rezultāti, ne modelētie rezultāti (nodaļa 3) pēdējo 20 gadu laikā sāluma izmaiņas neuzrāda.

Mainoties sālsūdens/saldūdens balancei, izmainījās arī ūdens caurspīdība (attēls 1.3) faktiski visās stacijās, kurās novērojumi tika veikti. Un, līdzīgi kā sāluma gadījumā, Rīgas līča centrālajā daļā caurspīdības samazināšanās pamatā tika novērota līdz 1990-to gadu sākumam.

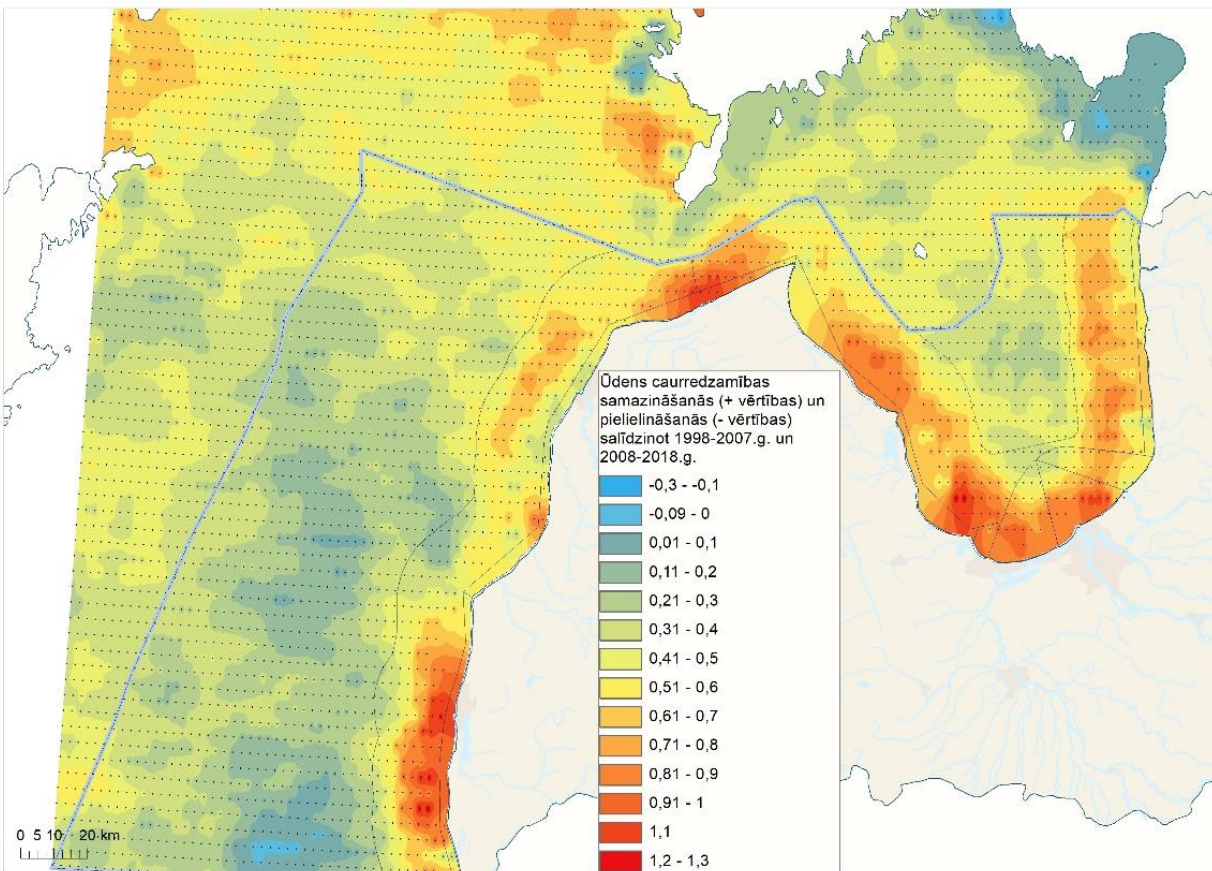
Seki vērtības RL atklātās daļas stacijās izmantojot lowess smoothing



Attēls 1.3. Ūdens caurspīdības (Seki diska dziļums) ilgtermiņa izmaiņas Rīgas līča centrālās daļas stacijās.

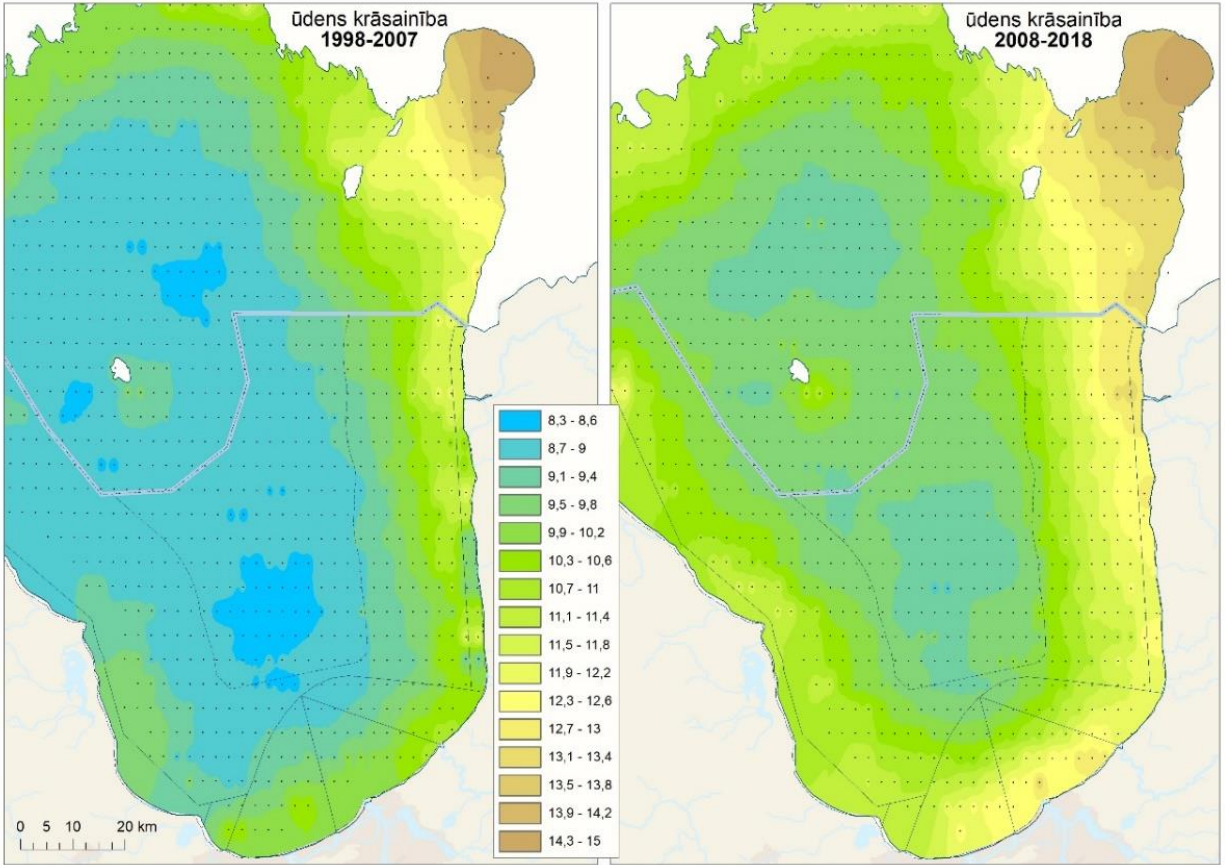
Neskatoties uz to, ka ilgtermiņa novērojumu dati no Rīgas līča centrālās daļas monitoringa stacijām neuzrādīja sāluma vai ūdens caurspīdības konstatējamās izmaiņas pēdējo 20-25 gadu laikā, piekrastes monitoringa dati liecināja par piekrastes biotopu stāvokļa degradācijas turpināšanos arī pēc 1990-tajiem. Kā jau minēts, novērojumi piekrastes zonā ir tikuši veikti samērā fragmentāri un salīdzinoši īsu periodu, kā rezultātā, ņemot vērā lielo datu izkliedi, nedod iespēju konstatēt izmaiņas pat, ja tādas ir. Lai kompensētu lauka mērījumu datu trūkumu tika apzināti alternatīvie informācijas avoti, kā rezultātā tika identificēta satelītnovērojumu datu bāze (Pitarch et al., 2019; PANGAEA, doi: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904266>), kā arī modelēto datu bāze Zenodo (Kristiansen and Butenschön, 2022; Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6524111>). Bez tam, pētījuma vajadzībām bija pieejami Latvijas Universitātes modelētie (Hiromb-BOOS modelis) dati (Zenodo: <https://zenodo.org/record/8248943>). Izmantojot šos augstas izšķirtspējas datus, tika veikta divu periodu (1998-2007 un 2008-2018) salīdzinošā analīze, kuras rezultātā tika konstatēts ūdens

caurspīdības samazinājums vairākās piekrastes zonās (attēls 1.4) gan Rīgas līcī, gan Baltijas jūrā. Visuzskatāmāk ūdens caurspīdības samazināšanās ir novērojama vasaras mēnešos. Tomēr arī citos mēnešos, kuros bija pieejami satelītdati (februāris-novembris), ūdens caurspīdības samazinājums bija nozīmīgs.

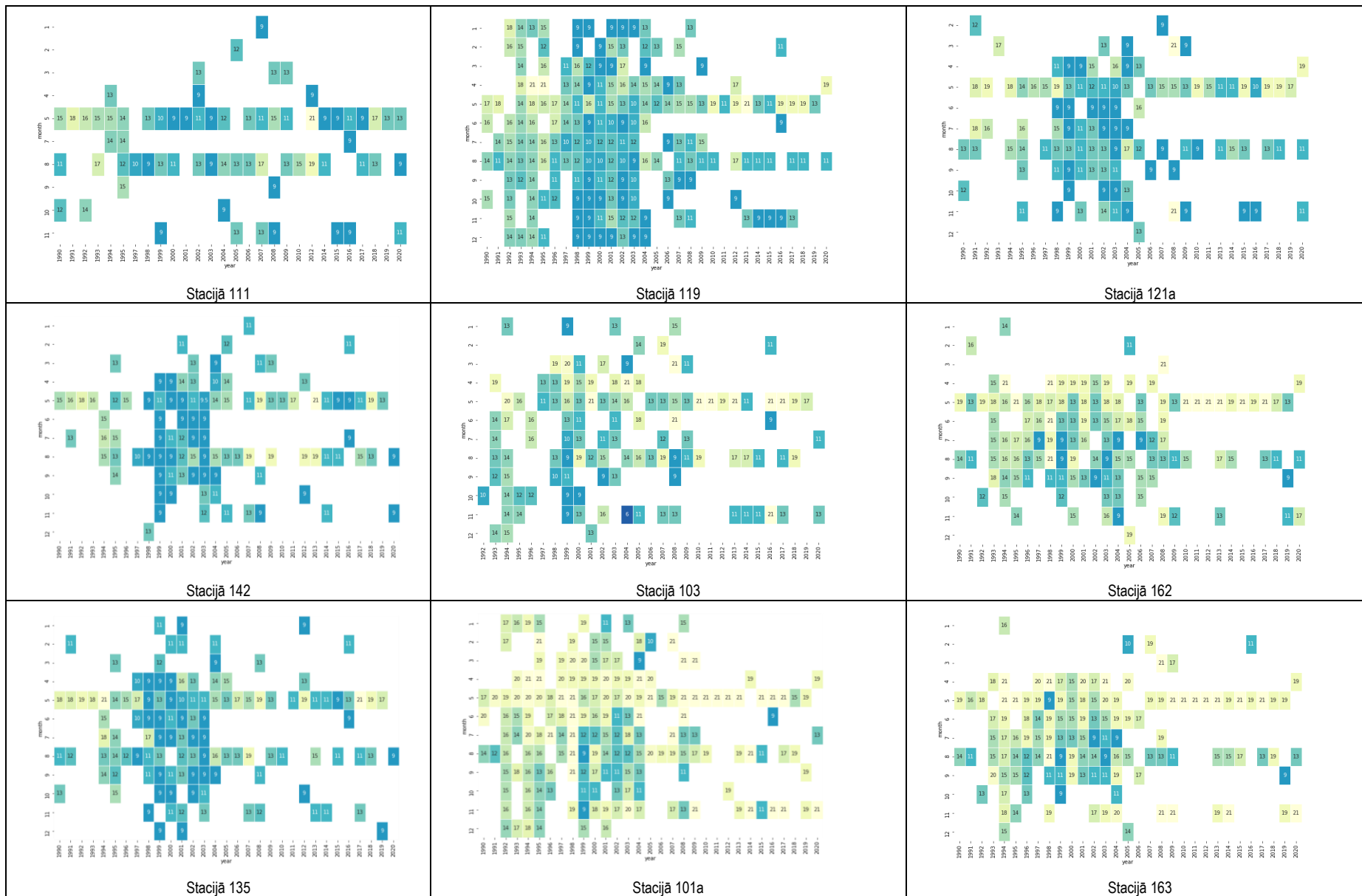


Attēls 1.4. Ūdens caurredzamības samazināšanās Baltijas jūrā un Rīgas līcī.

Tradicionāli ūdens caurspīdības samazināšanās tiek asociēta ar eitrofikācijas efektu – aļģu biomasas pieaugumu. Tomēr, kā to var uzskatāmi redzēt no ūdens krāsas (Attēls 1.5), ūdens krāsainība mainās no ziliem toņiem uz zaļiem (fitoplanktona ietekmē) tikai rajonos, kas ir vismaz 10-12 jūras jūdzes no krasta līnijas. Piekrastes rajonos krāsainība mainās no krāsu skalas zaļajiem toņiem uz brūniem, līdz pat divām krāsu skalas vienībām, kas norāda uz krāsaino organisko savienojumu (CDOM) koncentrācijas pieaugumu, īpaši Rīgas līča austrumu piekrastē. CDOM koncentrācijas pieaugumu jūrā nosaka procesu, kas notiek upju sateces baseinā intensificēšanās klimata izmaiņu rezultātā, tai skaitā temperatūras pieaugums, izmaiņas nokrišņu (attiecīgi upju noteces) režīmā, izmaiņas zemes lietošanā, izmaiņas meliorācijas sistēmā, u.c.



Attēls 1.5. Ūdens krāsa (vidējais jūnijs-augusts mēnešiem) periodiem 1998-2007 un 2008-2018.

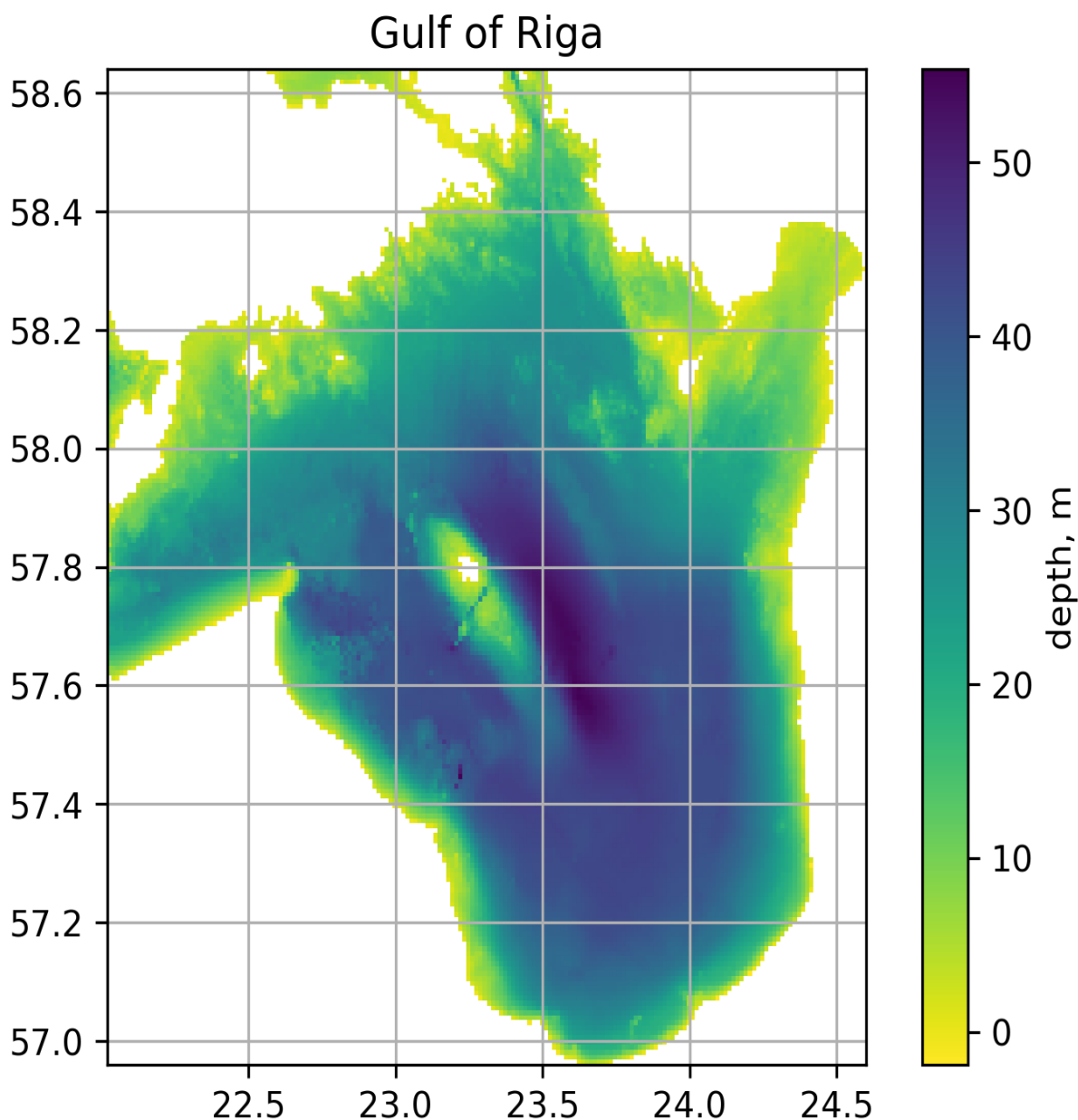


Attēls 1.7. Ūdens krāsa Forel Ule skalā. Novērojumu datu pieejamības sezonālā noseguma vizualizācija 1990-2020. Kreisā kolonna - Stacijas uz līnijas 1 (ZR-R), vidū - Stacijas uz līnijas 2 (D), pa labi - Stacijas uz līnijas 3 (DA-A), saskaņā ar apzīmējumiem attēlā 1.6.

2. Zemes sistēmas modeļu reģionalizācija (WP2)

2.1. Modelēšanas pieeja

Projekta uzstādījums bija veikt klimatiskus jūras stāvokļa modeļaprēķinus Rīgas jūras līcim. Modeļaprēķina veikšanu pamato nepieciešamība pēc ilgtermiņa augstas telpiskās un laika izšķirtspējas jūras stāvokļa datu kopām, kuras tālāk varētu lietot klimata pārmaiņu ietekmes analīzei.



Attēls 2.1. Modeļapgabals, dziļumu sadalījums tajā.

Tāpat, modeļaprēķinam būtu jānodrošina klimatiskas datu rindas pagātnes periodam (reanalīzes periods), kas varētu kalpot par modeļa validācijai – salīdzinājumam ar novērojumiem, kā arī nākotnes periodam (projekcijas periods).

Šajā nodaļā aprakstīsim kopējās pieejas reanalīzes un projekcijas periodiem, bet nodaļās 2.2 un 2.3 – modeļsistēmas konfigurācijas, kas atšķirīgas abu periodu aprēķiniem.

Modeļapgabals. Par modeļapgabalu tika izvēlēts attēlā 2.1 parādītais Rīgas līča apgabals, ko norobežo platuma intervāls 22°-24.6°E, un garuma intervāls 56.96° - 58.64°N.

Matemātisko modeļu sistēmas ģeometrijai – **dziļumu sadalījumam un krasta līnijai** – tika izmantota EMODNET¹ harmonizētā Eiropas jūras batimetrija, 2018.gada versija, skatīt attēlu 2.1.

Programmatūra: tika izmantotas divas modelēšanas programmatūras:

- Okeanogrāfiskajiem hidrodinamikas aprēķiniem tika lietots Hiromb-BOOS (HBM) modelis Weismann Poulsen et al (2014) LU SMI realizācijā Frišfelds et al (2021).
- Viļņu aprēķiniem tika lietots SWAN² spektrālais viļņu modelis.

Telpiskā izšķirtspēja: (1) okeanogrāfiskajam modelim 1 km režģis (187x203 režģa punkti) plāknē, 20 slāņi pa vertikāli; (2) viļņu modelim 2 km režģis.

Laika izšķirtspēja: okeanogrāfiskajam modelim 10 minūtes, viļņu modelim 1 stunda. Aprēķinu rezultāti saglabāti kā ikstundas dati.

Aprēķinātie parametri katrā režģa punktā un katrā laika momentā:

- Okeanogrāfiskajam modelim straumes ātrums un virziens, ūdenslīmenis, temperatūra, sāļums, ledus pārklājuma daļa, ledus biezums.
- Viļņu modelim: nozīmīgais viļņu augstums, virziens un periods, viļņu enerģijas plūsma.

2.2. Reanalīzes aprēķins

Reanalīzes aprēķins veikts 29 gadu laika periodam no 01-Jan-1993 līdz 31-Dec-2021. Aprēķinu ātrums uz LU SMI datorklāstera – 1 aprēķinu gads diennaktī.

Reanalīzes veikšanai izmantoti sekojoši ieejas dati:

- Hidrodinamikas robežnosacījumi uz atklātajām modeļapgabala robežām – Copernicus Marine service klimatiskā reanalīze³, ko veicis Dānijas meteoroloģiskais institūts DMI. Šīs reanalīzes pieejamība noteica modeļaprēķinu sākuma laika momentu.

¹ <https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>

² <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan>

³ https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011/description

- Viļņu robežnosacījumi uz atklātajām modeļapgabala robežām – Copernicus Marine service klimatiskā reanalīze⁴, ko veicis Somijas jūras institūts FMI.
- Upju notece: E-HYPE reanalīze⁵, ko realizējis Zviedrijas hidroloģijas un meteoroloģijas institūts SMHI.
- Atmosfēras (meteoroloģiskie) ieejas dati – Eiropas vidēja termiņa laika prognožu centra (ECMWF) ikstundas reanalīze ERA5⁶.
- Paisumi un bēgumi: astronomiskie aprēķini

2.3. Nākotnes projekciju aprēķins

Nākotnes projekciju aprēķins veikts 84 gadu laika periodam no 01-Jan-2017 līdz 31-Dec-2100. Piecu gadu periodam (2017-2021) reanalīzes un projekciju aprēķini pārklājas. Aprēķinu ātrums uz LU SMI datorklāstera – 1 aprēķinu gads diennaktī.

Nākotnes projekciju veikšanai izmantoti sekojoši ieejas dati:

- Hidrodinamikas robežnosacījumi uz atklātajām modeļapgabala robežām – mērogoti NorESM⁷ zemes sistēmas modeļa modeļaprēķini CMIP6⁸ ietvaros. NorESM modelis tika izvēlēts tādēļ, ka Ce2Coast projekta konsorciā bija tā aprēķinu veicējs. Tas deva iespēju iegūt aprēķinu rezultātus ar 1 dienas izšķirtspēju. Konkrētais aprēķins robežnosacījumiem ir NorESM2-MM_ssp585_r1i1p1f1⁹, kas atbilst SSP5¹⁰ socioekonomiskās attīstības ceļam un paredz klimata izmaiņu scenāriju RCP8.5. Aprēķinu rezultātiem tika veikta sistemātisko kļūdu korekcija, sk. sadaļu 2.4.
- Viļņu robežnosacījumi uz atklātajām modeļapgabala robežām – aprēķināti ar vēja ieskrējiena modeli no atmosfēras modeļa datiem.
- Upju notece: SMHI E-HYPE upju noteces projekcija, kas atbilst Zemes sistēmas modeļaprēķinam SMHI_RCA4_HadGEM2-ES_rcp45.
- Atmosfēras (meteoroloģiskie) ieejas dati – NorESM2-MM_ssp585_r1i1p1f1¹¹. kam veikta mērogošana un sistemātisko kļūdu korekcija.

⁴ https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_REANALYSIS_WAV_003_015/description

⁵ <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/historical-data/>

⁶ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>

⁷ <https://www.noresm.org/>

⁸ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview>

⁹ <https://www.wdc-climate.de/ui/cmip6?input=CMIP6.ScenarioMIP.NCC.NorESM2-MM.ssp585>

¹⁰ <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>

¹¹ <https://www.wdc-climate.de/ui/cmip6?input=CMIP6.ScenarioMIP.NCC.NorESM2-MM.ssp585>

- Paisumi un bēgumi: astronomiskie aprēķini

2.4. Mērogošana un sistemātisko kļūdu korekcija

CMIP6 ietvara globālo Zemes sistēmas modeļu tipiskā telpiskā izšķirtspēja ir 50-100 km. Dinamiskā izšķirtspējas paaugstināšana (mērogošana, jeb *downscaling*) ir plaši veikta un pieejama CMIP5 ietvara globālajiem modeļiem, savukārt praktiski nemaz – CMIP6 modeļiem. Tā, piemēram, NorESM2 modelis, kura rezultāti izmantoti kā nākotnes klimata projekciju aprēķina ieejas dati Rīgas līča modeļapgabalam satur 2.5 aprēķinu punktus un šie rezultāti pieejami kā diennakts vidējās vērtības laika periodam 2015-2100.

Lai iegūtu jēgpilnas ieejas datu rindas mūsu klimatiskā aprēķina veikšanai tika veikti sekojoši mērogošanas un sistemātisko kļūdu korekcijas soļi:

- 1) Laika periodu 2015-2100 sadalījām 7 dienu intervālu.
- 2) Katram šādam 7 dienu intervālam meklējām vislabāko atbilstošo 7 dienu intervālu reanalīzes aprēķinā. Atbilstība tika noteikta, veicot korelāciju vēja ātruma komponentu, gaisa temperatūras, atmosfēras spiediena un mākoņainības laikrindām. Aprēķinot korelāciju tika pieļauta lineāra nobīde katram mainīgajam.
- 3) Atbilstošos reanalīzes laika intervālus un parametru lineārā nobīdes atrodam katram globālā modeļa aprēķinu punktam un katram klimata projekciju laika intervālam.
- 4) Ekstrapolējam un interpolējam datu nobīdes, aizvietojojam zemas telpiskās un laika izšķirtspējas nākotnes projekciju datu rindas ar koriģētām augstas izšķirtspējas reanalīzes perioda datu rindām vējam, gaisa temperatūrai, atmosfēras spiedienam un mākoņainībai.
- 5) Relatīvajam mitrumam un nokrišņiem korekcija netiek veikta, tiek tieši izmantoti reanalīzes dati laika intervālam ar vislabāko korelāciju.
- 6) Ūdenslīmenim NorESM2 pieejamas tikai mēnešu vidējās vērtības, tādēļ punktu 1-4 metode tika veikta laika intervāliem 1 gads.
- 7) Okeanogrāfiskajiem parametriem ir lielāka inerce. Tādēļ šo parametru vērtības robežnosacījumu uzdošanai tika atrastas ar punktu 1-4 metodi, izmantojot 30 dienu laika intervālus.

Tādējādi nākotnes laika periodam iegūti augstas telpiskās un laika izšķirtspējas dati, kas satur nākotnes klimata signālu, kas modulēts ar pagātnes parametru dabisko mainību.

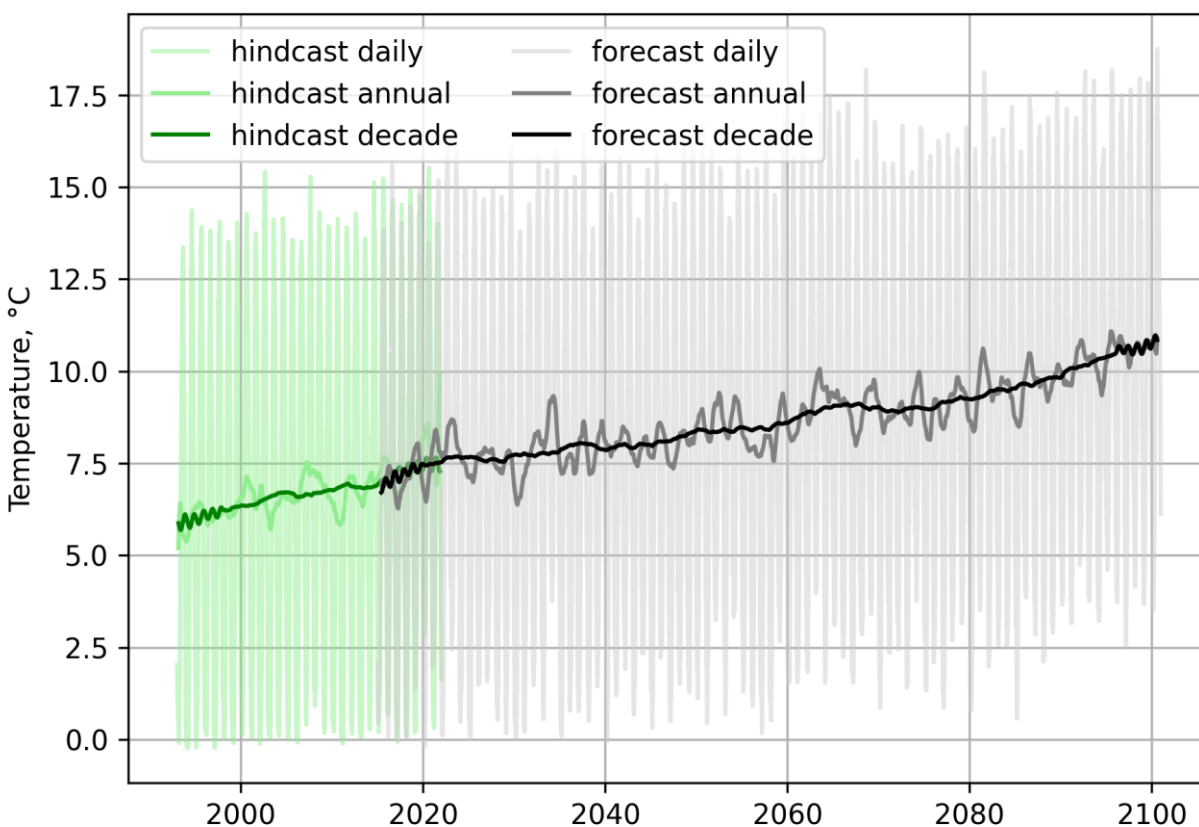
3. Reģionālie jūras klimata modeļaprēķini Rīgas līcim (WP3)

3.1. Modeļaprēķini

2.nodaļā aprakstītie klimatiskie Rīgas līča modeļaprēķini veikti 2021-2022.gadā (reanalīze) un 2022-2023.gadā (nākotnes projekcijas). Reģionālā okeāna modeļaprēķins ir pieejams LU SMI, bet ikdienas un mēneša vidējo vērtību datu rindas fizikāliem parametriem – jūras ūdens temperatūrai, sāļumam, straumes ātrumam un virzienam, ūdenslīmenim, ledus biezumam un pārklājuma daļām, viļņu augstumam, virzienam un enerģijas plūsmai, pieejamas Zenodo: <https://zenodo.org/record/8248943> un <https://zenodo.org/records/10069092>.

3.2. Temperatūra

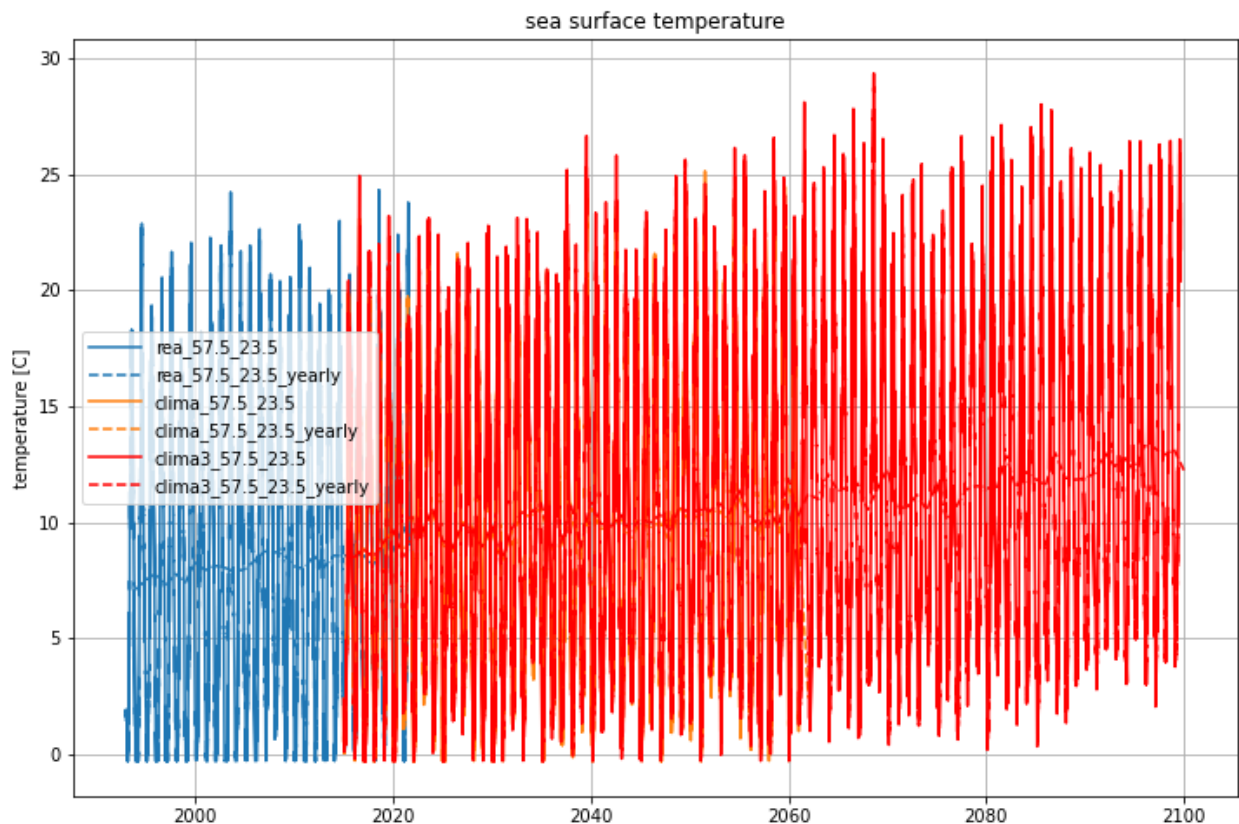
Attēlā 3.1 parādīts Rīgas līča vidējās ikdienas, ikgadējās un desmitgadu ūdens temperatūras laika grafiks. Gadsimta laikā paredzams relatīvi vienmērīgs vidējās Rīgas līča temperatūras pieaugums par 5 grādiem.



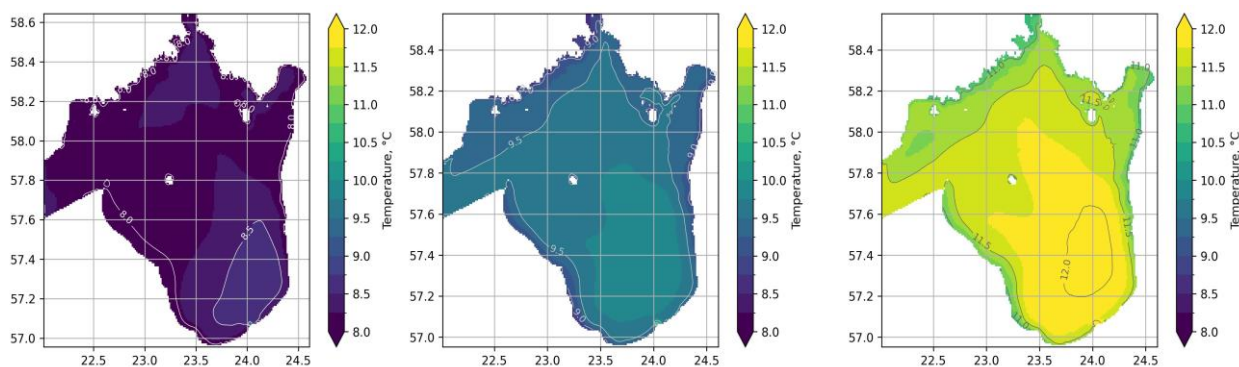
Attēls 3.1. Rīgas līča vidējās ikdienas, ikgadējās un desmitgadu ūdens temperatūras laika grafiks.

Attēlā 3.2 parādīts Rīgas līča virsmas temperatūras laika grafiks atsevišķos punktos. Mūsdienās vasarās temperatūra retumis sasniedz 23-24 grādus, bet sagaidāms, ka jau gadsimta vidū tā regulāri pārsniegs 25 grādus, atsevišķos gados sasniedzot pat 27-28 grādus. Savukārt, ziemās līča virsmas temperatūra katru gadu noslīd līdz 0 grādiem. Gadsimta vidū šādas situācijas būs aptuveni pusē no ziemām, bet gadsimta beigās – vairs nekad.

Klimatiskais Rīgas līča virsmas vidējās temperatūras sadalījums mūsdienās, gadsimta vidū un beigās parādīti attēlā 3.3. Zemākas klimatiskās temperatūras sagaidāmas līča seklākajā daļā, kura straujāk atdziest ziemā, kā arī piekrastes zonās (it īpaši Ziemeļu un Rietumu piekrastē), kur tipiski novērojams apvellingss.



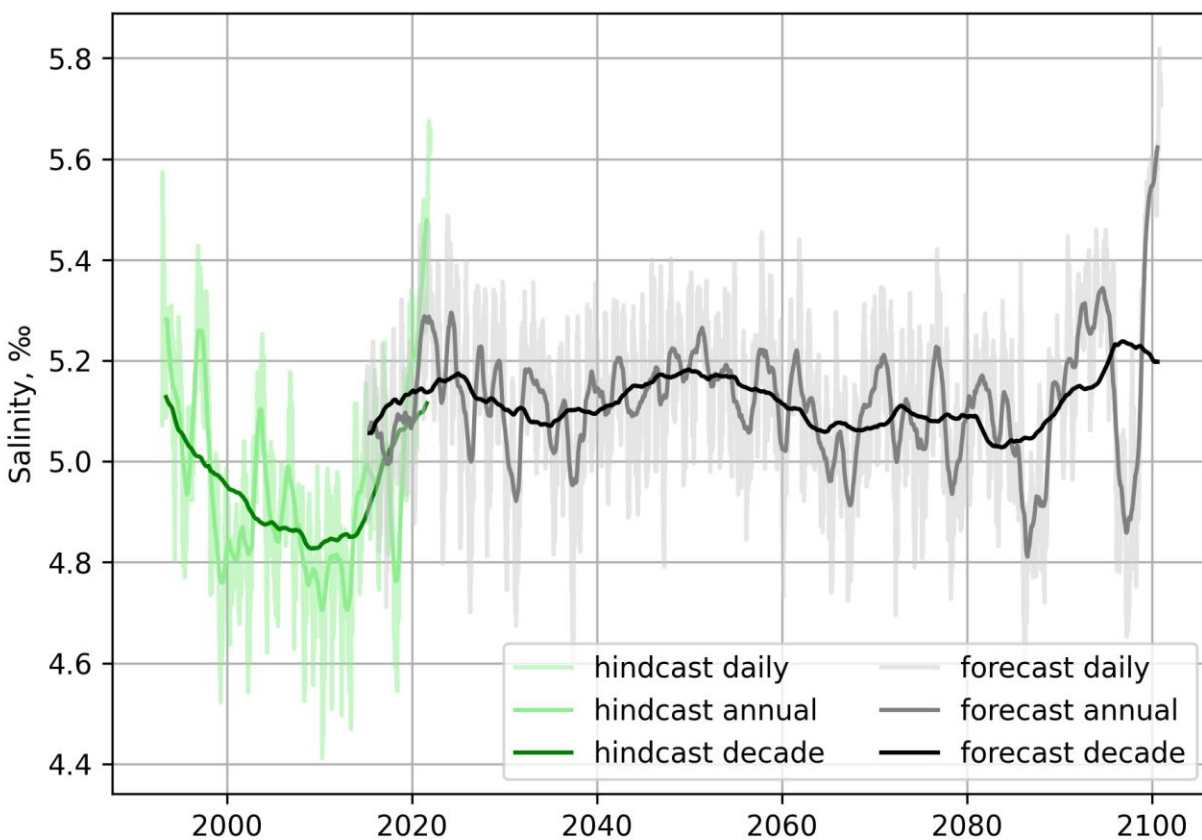
Attēls 3.2 Rīgas līča virsmas temperatūras laika grafiks atsevišķos punktos.



Attēls 3.3. Rīgas līča virsmas temperatūra 1993-2021, 2036-2065 un 2071-2100 gados.

3.3. Sāļums

Attēlā 3.4 parādīts Rīgas līča vidējā ikdienas, ikgadējā un desmitgadu ūdens sāļuma laika grafiks. Gadsimta laikā nav paredzams sāļuma samazināšanās vai palielināšanās. Iespējams, ka šajā gadsimtā turpināsies sāļuma cikliskas maiņas ar aptuveni 20 gadu periodu. Sāļuma izmaiņas nosaka sālsūdens ieplūdes Baltijas jūrā un upju noteces starpgadu mainība.



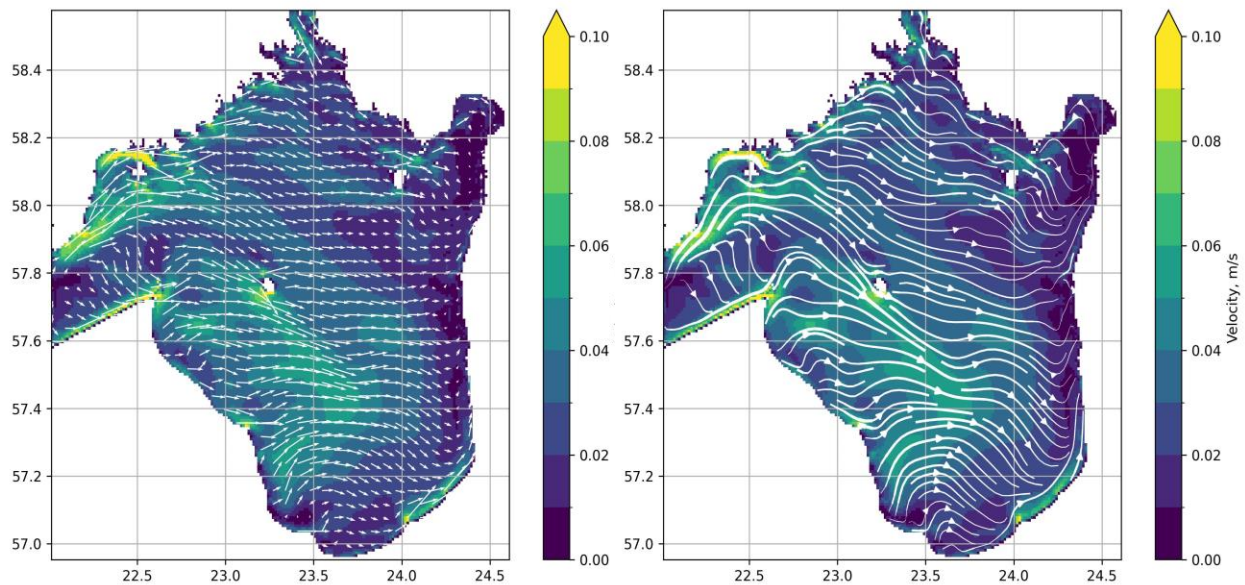
Attēls 3.4. Rīgas līča vidējā ikdienas, ikgadējā un desmitgadu ūdens sāļuma laika grafiks.

3.4. Straumes

Rīgas līcī nav pastāvīgu straumju, to mainību laikā nosaka ūdenslīmenis, vējš, upju notece un ūdens blīvuma sadalījums. Klimatiskie modeļaprēķini neparādīja nozīmīgu izmaiņu Rīgas līča straumju raksturā šajā gadsimtā. Attēlā 3.5 parādītas virsmas straumes – kā virsmas straumju vidējais ātrums un plūsmas līnijas.

Virsmas straumes pamatā nosaka vējš, tādēļ pie valdošajiem R-DR vējiem straumes pamatā vērstas austrumu virzienā. Virsmas straumju sadalījumā vērts atzīmēt:

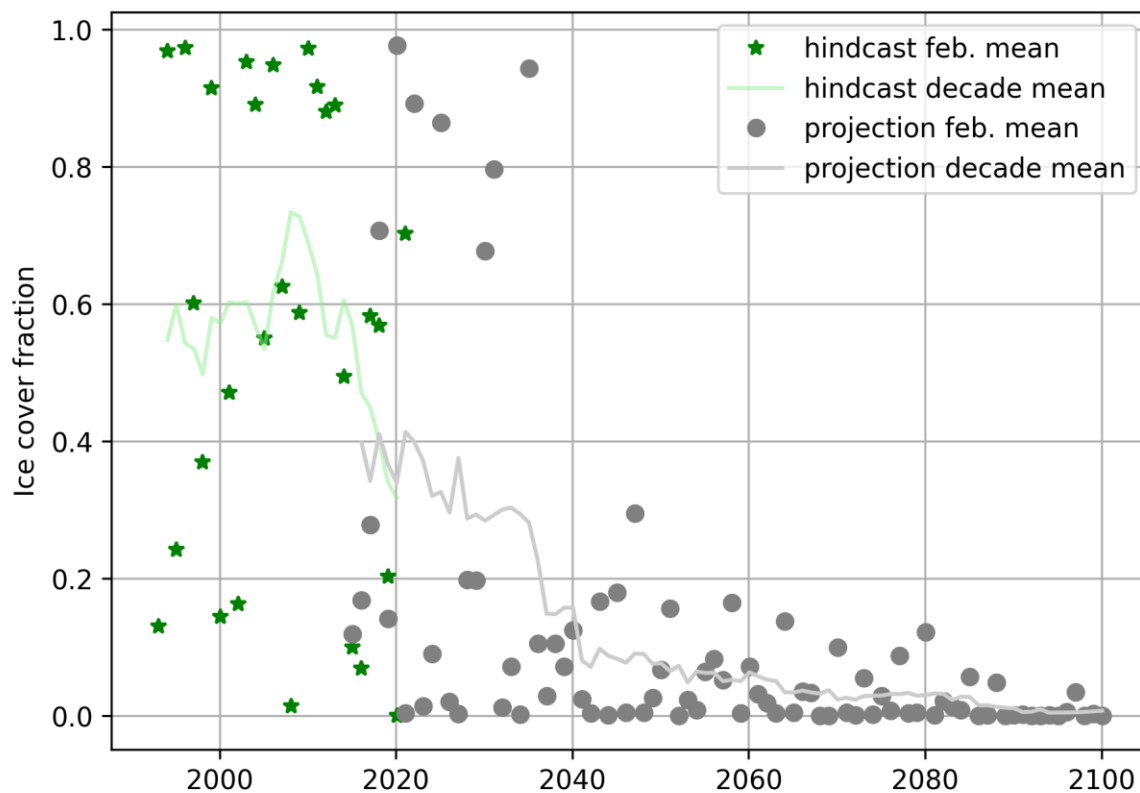
- Līča dienviddaļā ieplūstošo upju ūdens izplatīšanos galvenokārt gar līča austrumu piekrasti.
- Virsmas straumju virzību prom no krasta Kurzemes un Sāmsalas piekrastē, kas norāda uz biežāku apvelingu šajās piekrastēs.



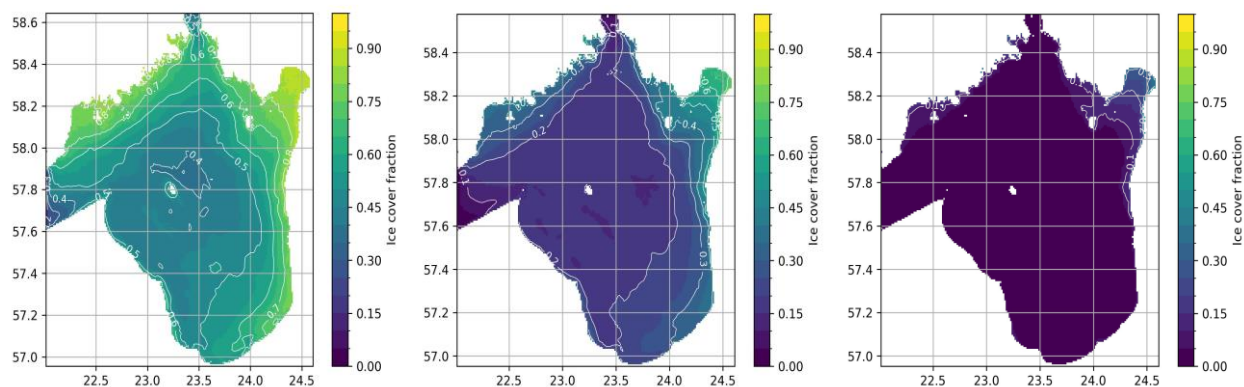
Attēls 3.5. Vidējās virsmas straumes aprēķinu periodā: virsmas straumju vidējais ātrums (pa kreisi) un plūsmas līnijas (pa labi).

3.5. Ledus

Attēlā 3.6 parādīts Rīgas līča ikgadējais un desmitgadu ledus pārklājums mēnesī ar vislielāko ledus pārklājumu – februārī. Klimata pārmaiņu rezultātā sagaidāma būtiska ledus samazināšanās. Ja mūsdienās līcis pilnībā aizsalst gandrīz katru otro ziemu, tad jau gadsimta vidū ledus pārklājums vidēji nepārsniedz 10% no līča, bet gadsimta beigās ledus praktiski izzūd. Ledus pārklājuma sadalījums Rīgas līcī mūsdienās, gadsimta vidū un beigās parādīts attēlā 3.7. Gadsimta vidū ledus sastopas Ziemeļu un Austrumu piekrastēs un Pērnavas līcī, bet gadsimta beigās – vairs tikai sekļajā Pērnavas līcī.



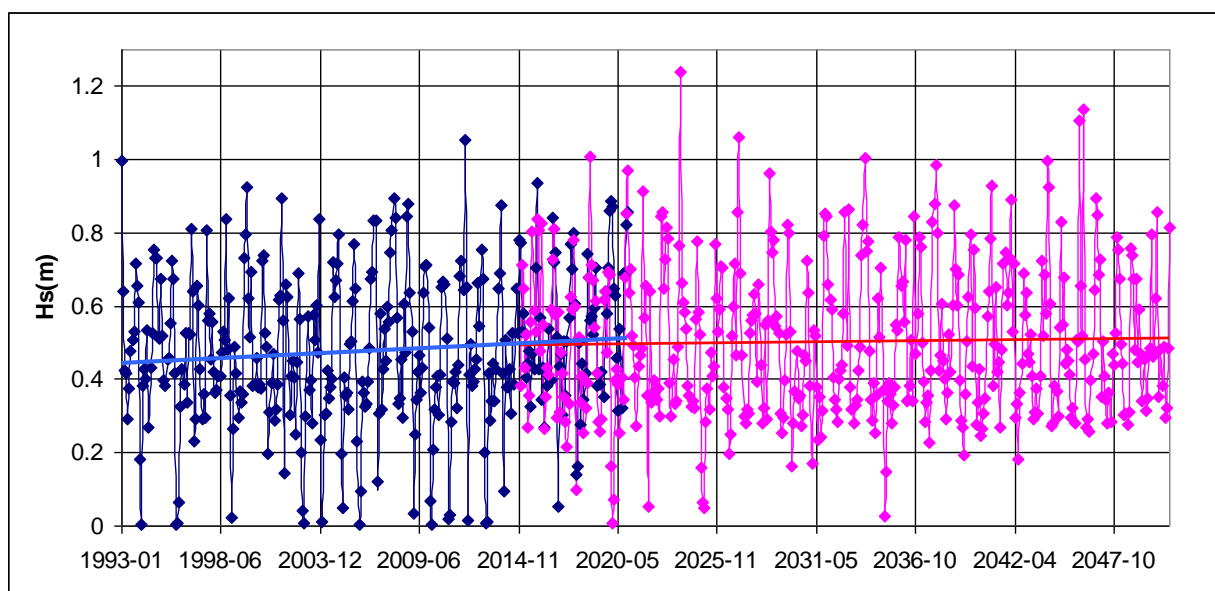
Attēls 3.6. Rīgas līča ikgadējais un vidējais desmitgadu februāra ledus pārklājums.



Attēls 3.7. Rīgas līča februāra ledus pārklājums 1993-2021, 2036-2065 un 2071-2100 gados.

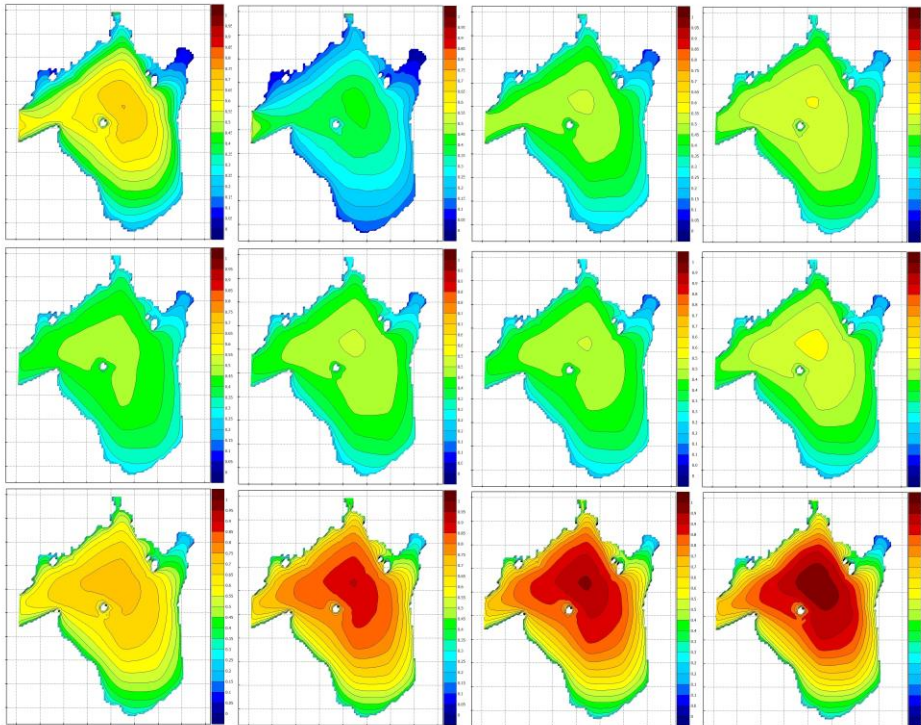
3.6. Viļņi

Attēlā 3.8 parādīts Rīgas līča nozīmīgā viļņu augstuma mēnešu vidējās vērtības un to trendi reanalīzes periodam un laika posmam līdz gadsimta vidum. Viļņu augstumam ir pieauguma trends reanalīzes periodā; to pamatā nosaka ledus pārklājuma samazināšanās, jo ledus apstākļos viļņu nav. Attēlā 3.8 redzama būtiska viļņu vidējā augstuma sezonālitate.

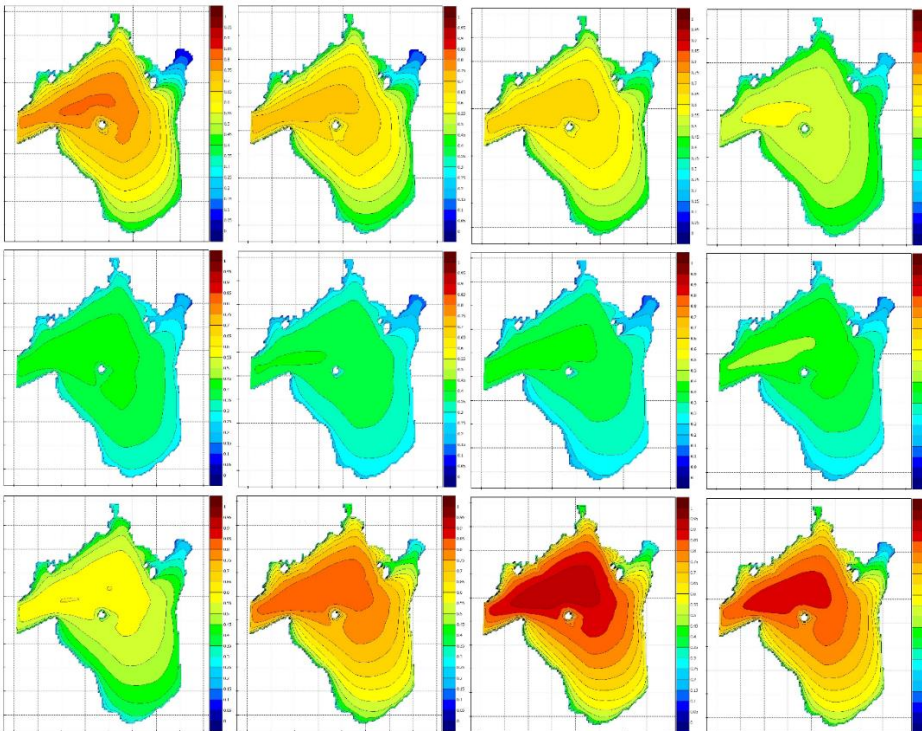


Attēls 3.8. Rīgas līča nozīmīgā viļņu augstuma mēnešu vidējo vērtību laika grafiks 1993-2047.

Attēlos 3.9-3.10 parādīts ikmēneša vidējais nozīmīgais viļņu augstums Rīgas līcī reanalīzes periodam un laika periodam 2022-2047. Redzams, ka visbūtiskāk ledus segas izzušanas dēļ viļņu augstums pieaug ziemas mēnešos (janvāris-marts, skatīt arī attēlu 4.2). Viļņu augstums nedaudz samazinās pārējos mēnešos, jo īpaši vasarā.



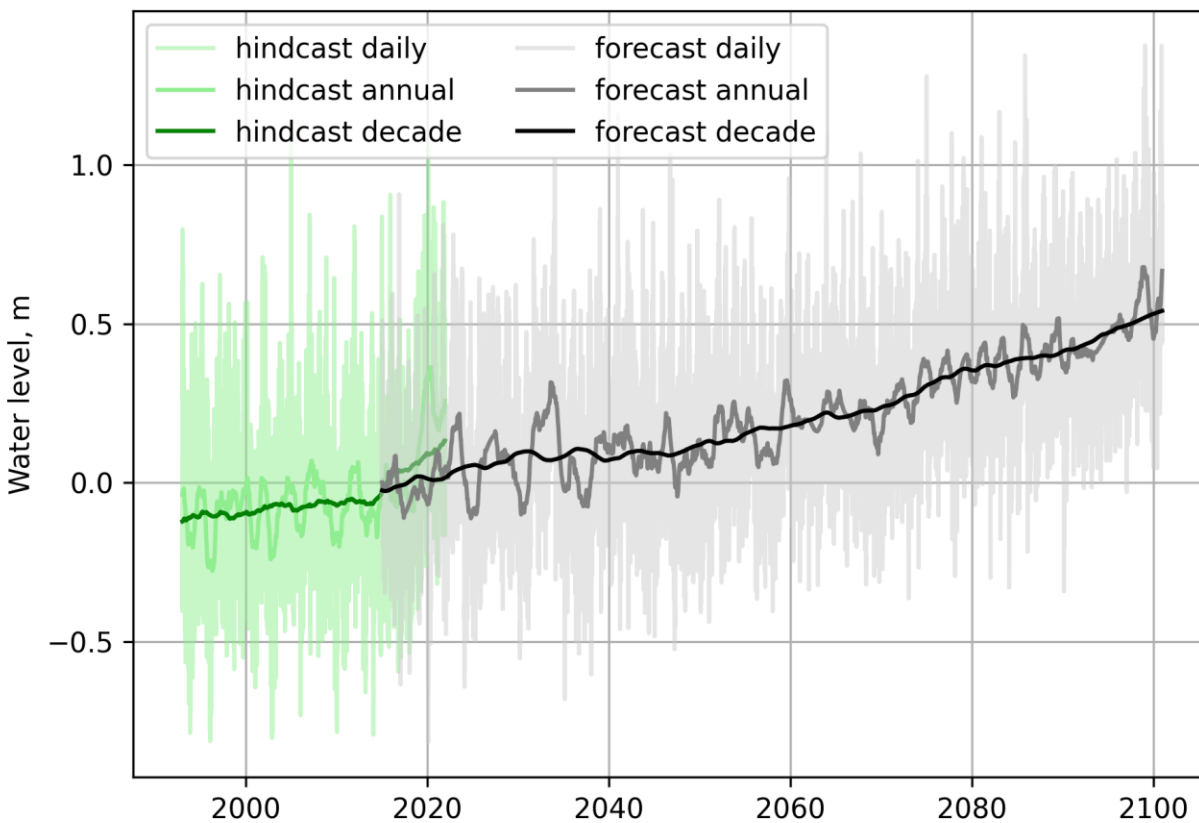
Attēls 3.9. Mēneša vidējais nozīmīgais viļņu augstums (m) Rīgas līcī: janvāris-aprīlis (augšējā); maijs-augusts (vidējā); septembris-decembris (apakšējā), 1993-2021.



Attēls 3.10. Mēneša vidējais nozīmīgais viļņu augstums (m) Rīgas līcī: janvāris-aprīlis (augšējā); maijs-augusts (vidējā); septembris-decembris (apakšējā), 2022-2047.

3.7. Ūdenslīmenis

Attēlā 3.11 parādīts Rīgas līča vidējā ikdienas, ikgadējā un desmitgadu ūdenslīmeņa laika grafiks. Gadsimta gaitā paredzams ūdenslīmeņa pieaugums turpina patreizējo trendu un nedaudz paātrinās gadsimta beigās. Kopuma 100 gadu laikā paredzamais ūdens līmeņa pieaugums nedaudz pārsniedz pusmetru.

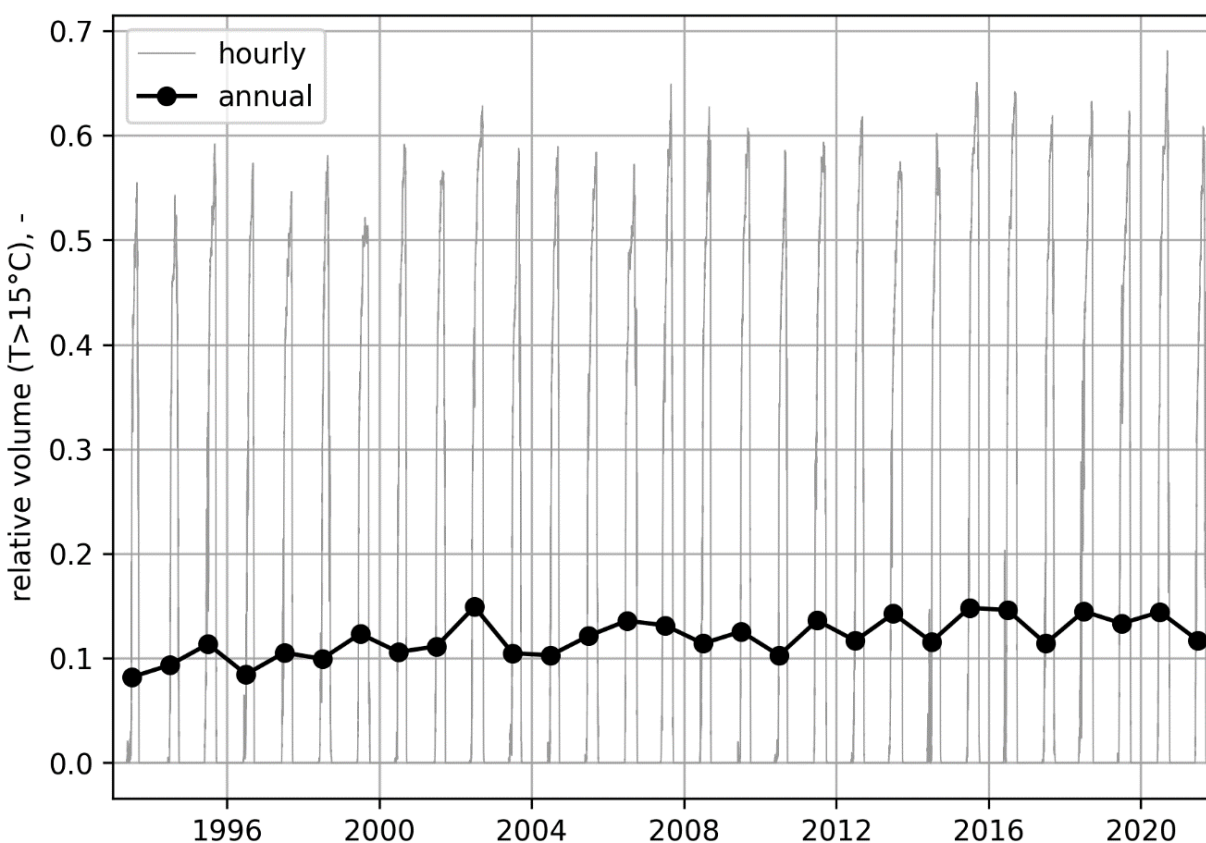


Attēls 3.11. Rīgas līča vidējā ikdienas, ikgadējā un desmitgadu ūdenslīmeņa laika grafiks.

3.8. Indikatori

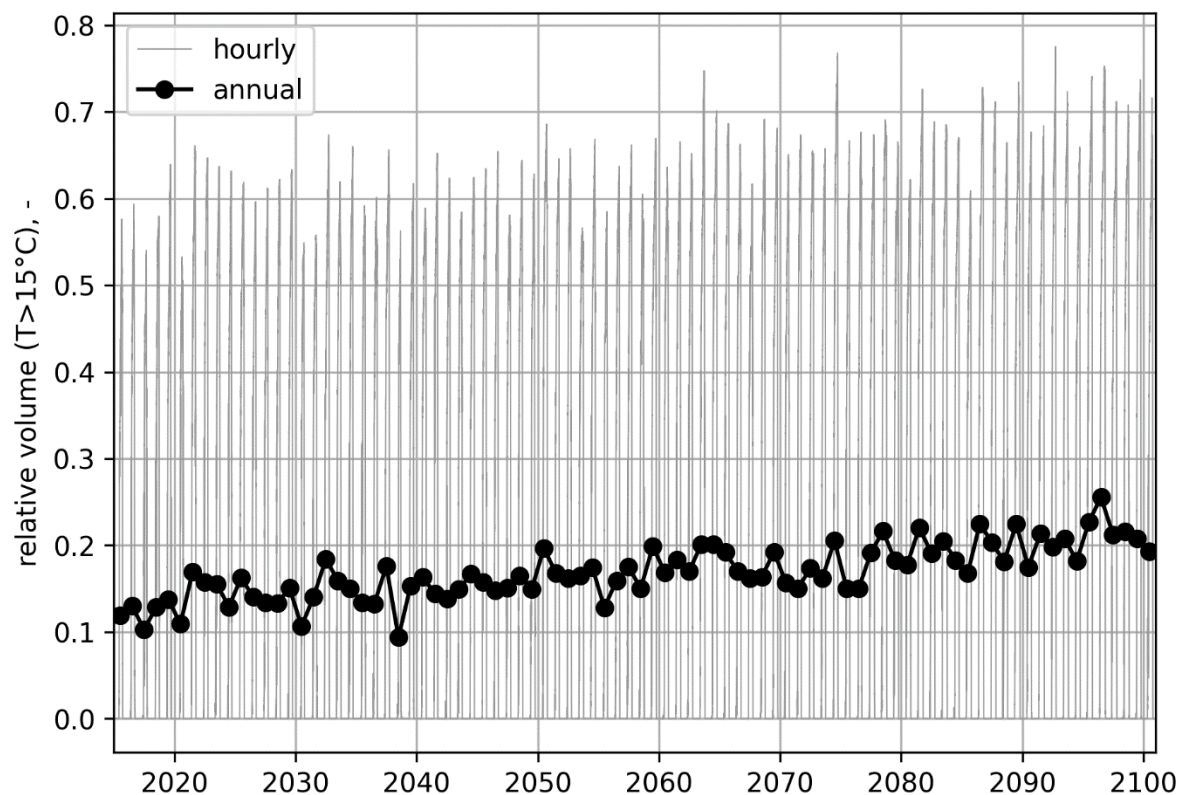
Aplūkosim dažus no modeļaprēķiniem atvasinātus indikatorus, kam var būt nozīmīga loma ekosistēmas stāvokļa izmaiņām.

Līča tilpums ar ūdens temperatūru virs 15°C izvēlēts kā indikators tādēļ, ka šāda temperatūra ir sliekšņa temperatūra vairāku organismu attīstībai. Attēlā 3.12 un 3.13 Rīgas līča tilpuma daļa, kurā ūdens temperatūra pārsniedz 15°C parādīta, attiecīgi reanalīzes un nākotne projekciju aprēķinam kā ikstundas un gada vidējo vērtību laika grafiki. Attēlā 3.14 ikgadējās vidējās sliekšņa temperatūras pārsnieguma tilpuma vērtības parādītas visam aprēķinu periodam.



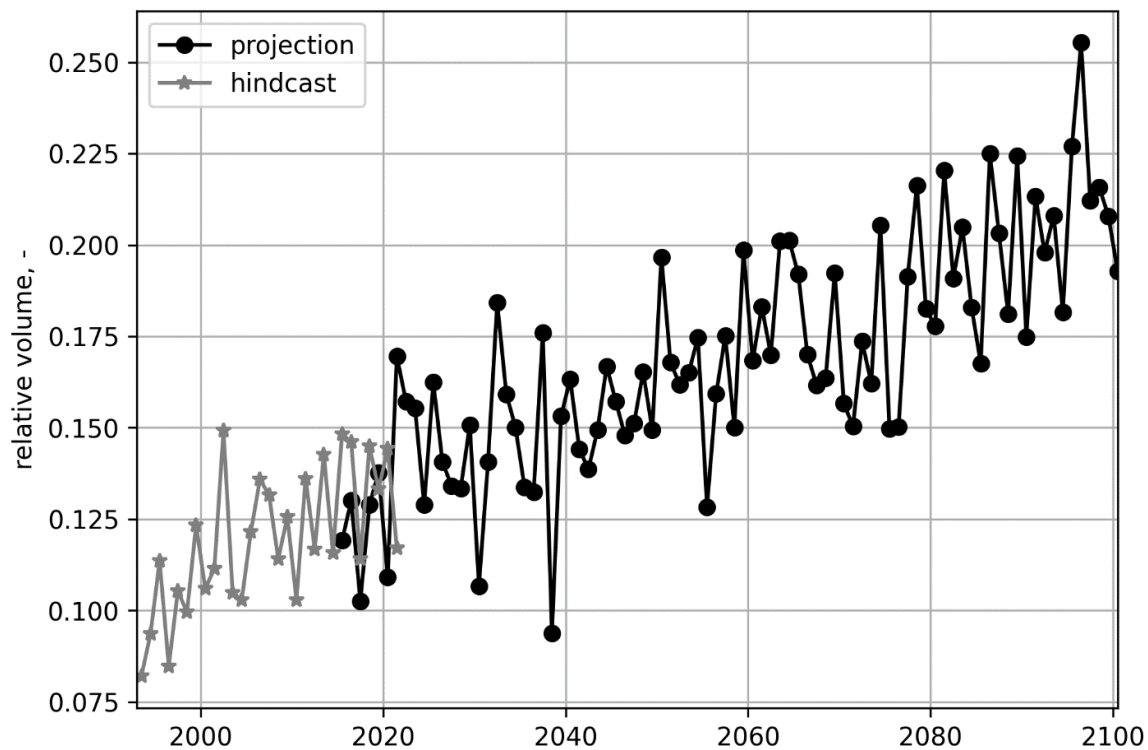
Attēls 3.12. Rīgas līča tilpuma daļa, kurā ūdens temperatūra $T > 15^{\circ}\text{C}$. 1993-2022, reanalīze. Ikstundas un gada vidējo vērtību laika grafiks.

Jau reanalīzes periodā (attēls 12) iezīmējas nelabvēlīgs trends – ja pagājušā gadsimta beigās vasarās līča tilpums ar $T > 15^{\circ}\text{C}$ bija 50-60%, tad tagad tas ik gadu pārsniedz 60% no tilpuma. Sagaidāms, ka gadsimta beigās (attēls 13) ik vasaru virs 70% no līča tilpuma būs ar $T > 15^{\circ}\text{C}$. Savukārt, vidēji gadā pagājušā gadsimtā temperatūras sliekšnis tika pārkāpts zem 8-12% no tilpuma, šī gadsimta vidū 14-18%, bet beigās – jau virs 20% no tilpuma (attēls 14).

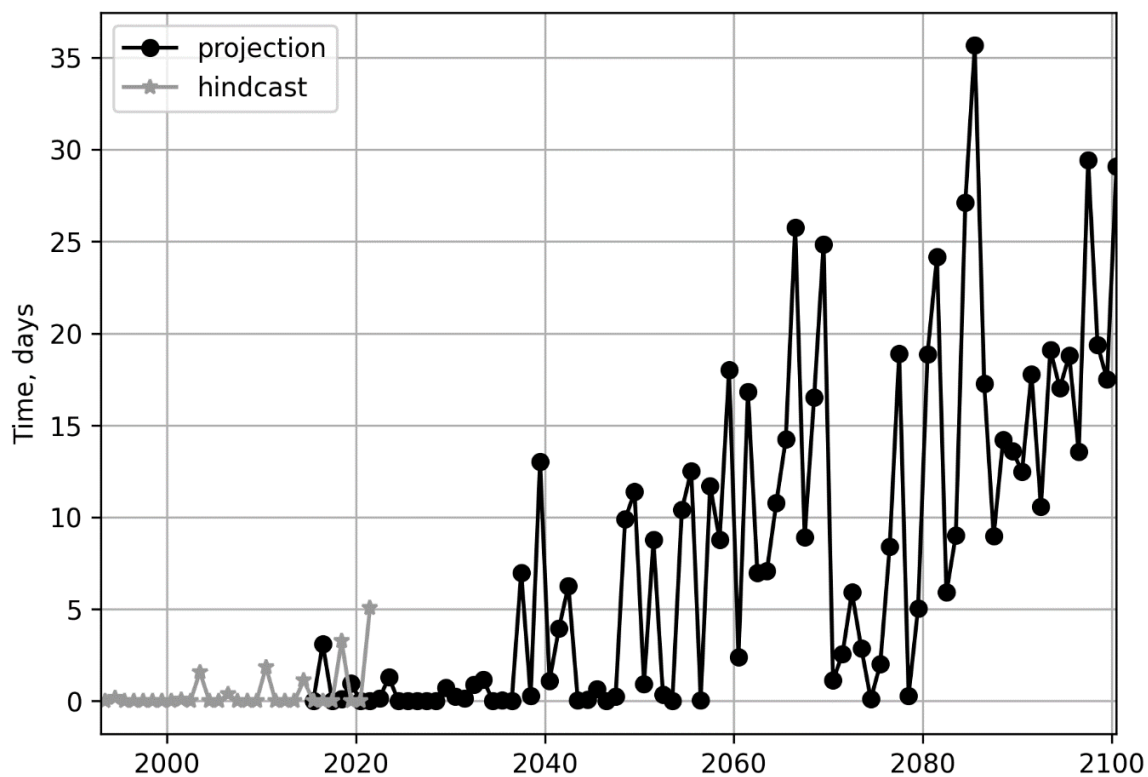


Attēls 3.13. Rīgas līča tilpuma daļa, kurā ūdens temperatūra $T > 15^{\circ}\text{C}$. 2015-2100, nākotnes projekcijas. Ikstundas un gada vidējo vērtību laika grafiks.

Jūras karstuma viļņi ir periodi, kuros virsmas temperatūra pārsniedz noteiktu sliekšņa vērtību. Rīgas līcim par šādu temperatūru izvēlēsimies 23°C . Attēlā 3.15 parādīts laika grafiks ikgadējam karstuma viļņu dienu skaitam. Reanalīzes periodā jūras karstuma viļņi praktiski nebija sastopami, 5 dienas virsmas temperatūra pārsniedza 23°C tikai 2021.gadā. Toties nākotnē sagaidāms straujš jūras karstuma viļņu biežuma un ilguma pieaugums. Jau gadsimta vidū jūras karstuma viļņi atkārtosies katru otro gadu un to ilgums sasniegs 10 dienas. Gadsimta beigās jūrās karstuma viļņi būs katru gadu, to ilgums tipiski būs 10-20 dienas, atsevišķos gados pārsniedzot 1 mēnesi.



Attēls 3.14. Rīgas līča tilpuma daļa, kurā ūdens temperatūra $T > 15^{\circ}\text{C}$. Gada vidējo vērtību laika grafiks.

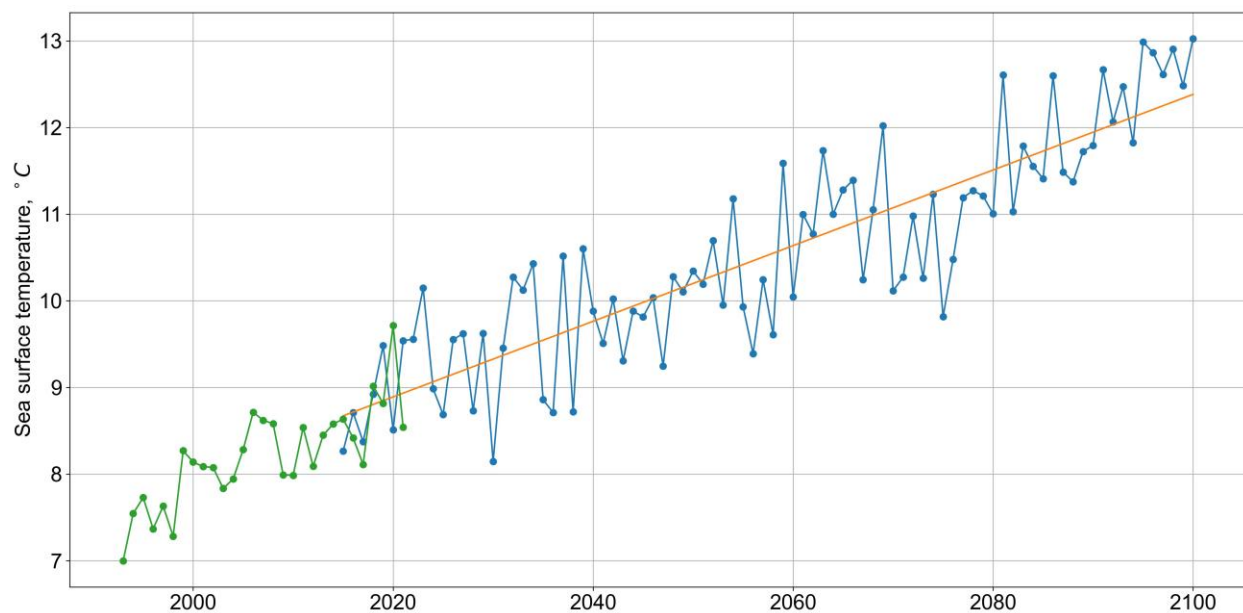


Attēls 3.15. Dienu skaits gadā, kurās Rīgas līča virsmas temperatūra $T > 23^{\circ}\text{C}$.

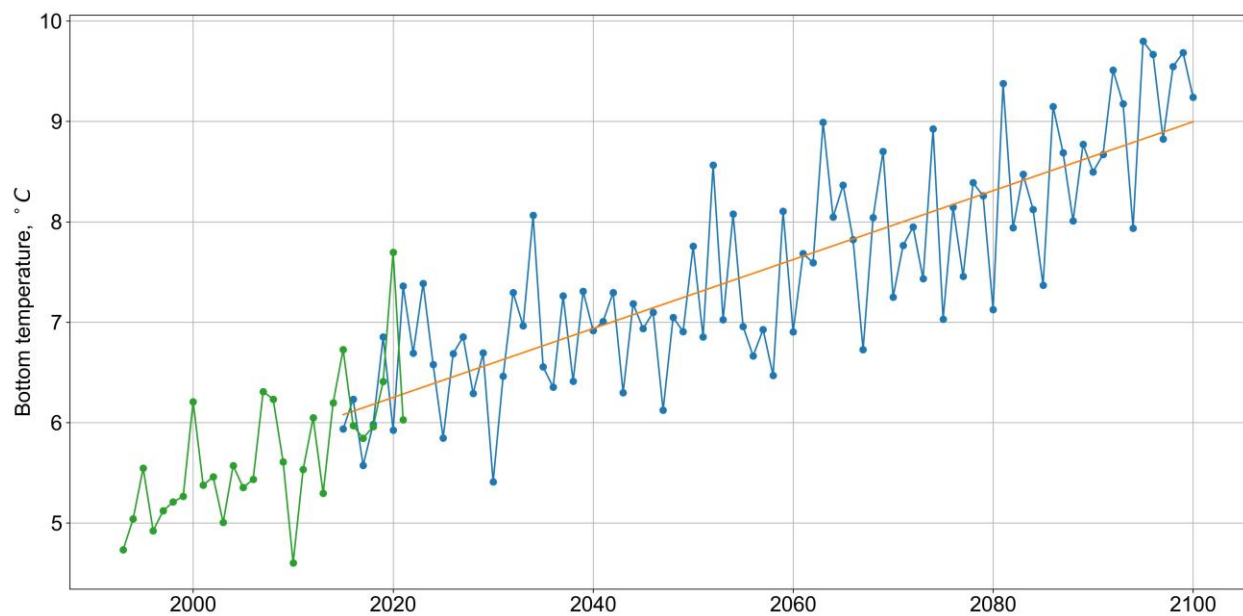
3.9. Dabiskās mainības un trendu analīze

Jūras stāvokļa parametru klimatiskās izmaiņas ir nozīmīgas, ja ekosistēmas elementi nespēj tām pielāgoties. Aplūkosim vairākus klimatiskos parametrus no diviem aspektiem

1. Cik strauji notiek parametra izmaiņas (trends)? Ekosistēmai ir grūtāk pielāgoties straujām izmaiņām.



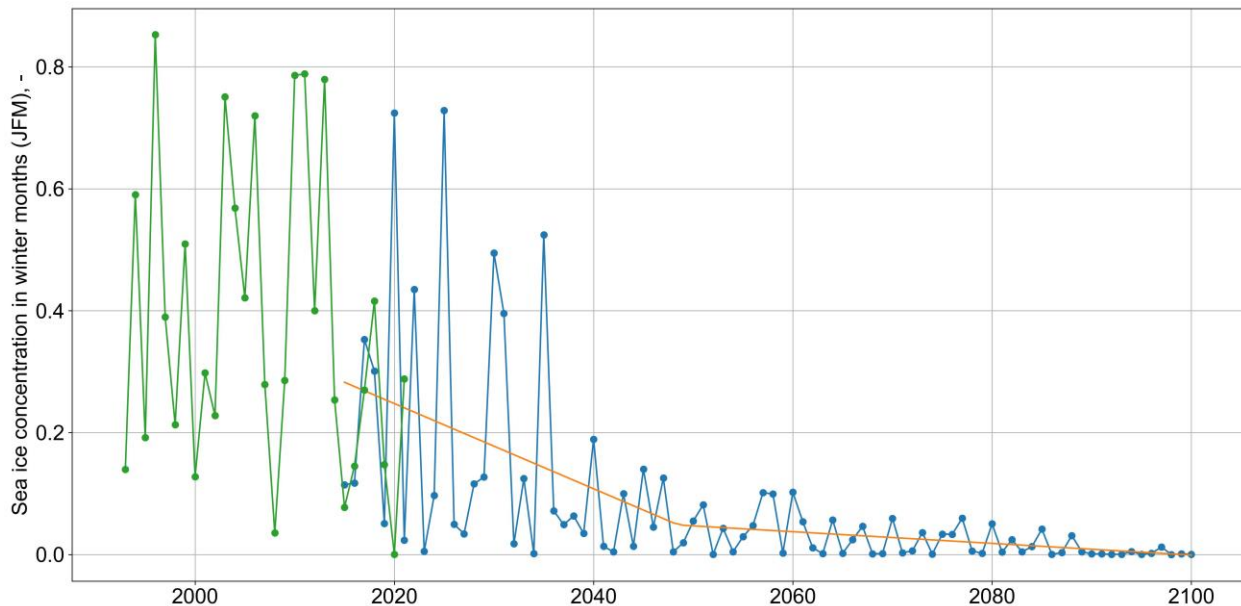
Attēls 3.16. Rīgas līča virsmas temperatūras ikgadējās vērtības un trends.



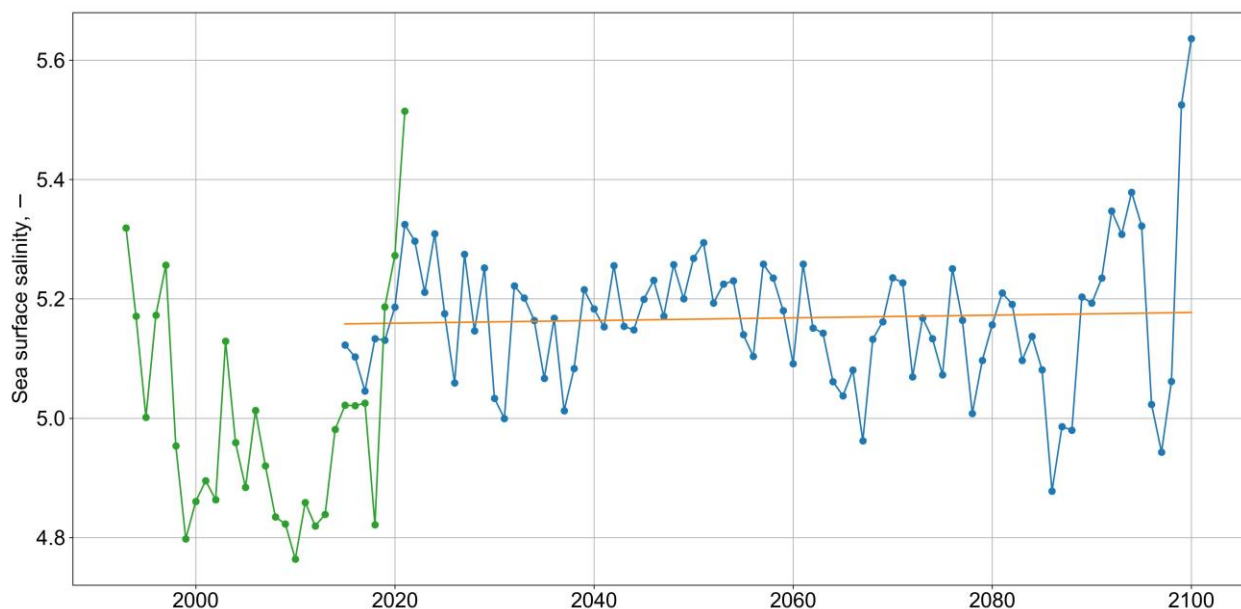
Attēls 3.17. Rīgas līča piegrunts temperatūras ikgadējās vērtības un trends.

2. Kādas ir sagaidāmās parametra izmaiņas, salīdzinājumā ar šī parametra dabisko mainību? Arī straujākām parametra izmaiņām ir vieglāk pielāgoties, ja šīs izmaiņas ir mazākas par parametra starpgadu vai starpsezonu dabisko svārstību diapazonu.

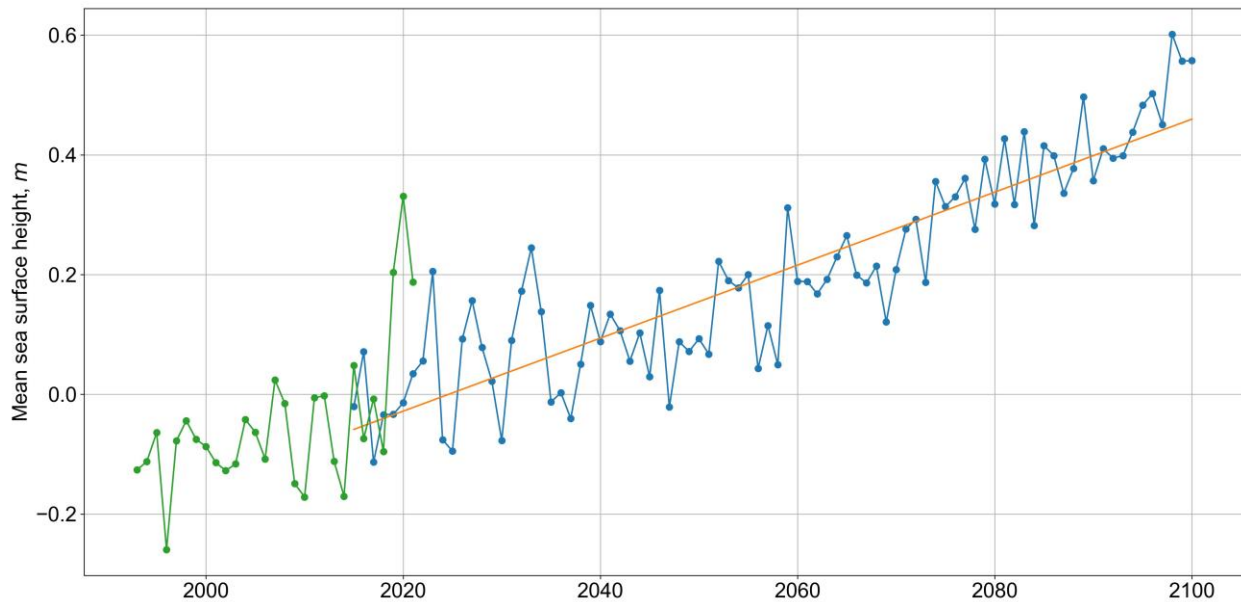
Aplūkosim 6 klimatiskos parametrus Rīgas līcim – gada vidējā virsmas temperatūra, gada vidējā piegrunts temperatūra, ziemas mēnešu (janvāris, februāris, marts) vidējais ledus pārklājums, gada vidējais virsmas sāļums, gada vidējais ūdenslīmenis un gada vidējais nozīmīgo viļņu augstums.



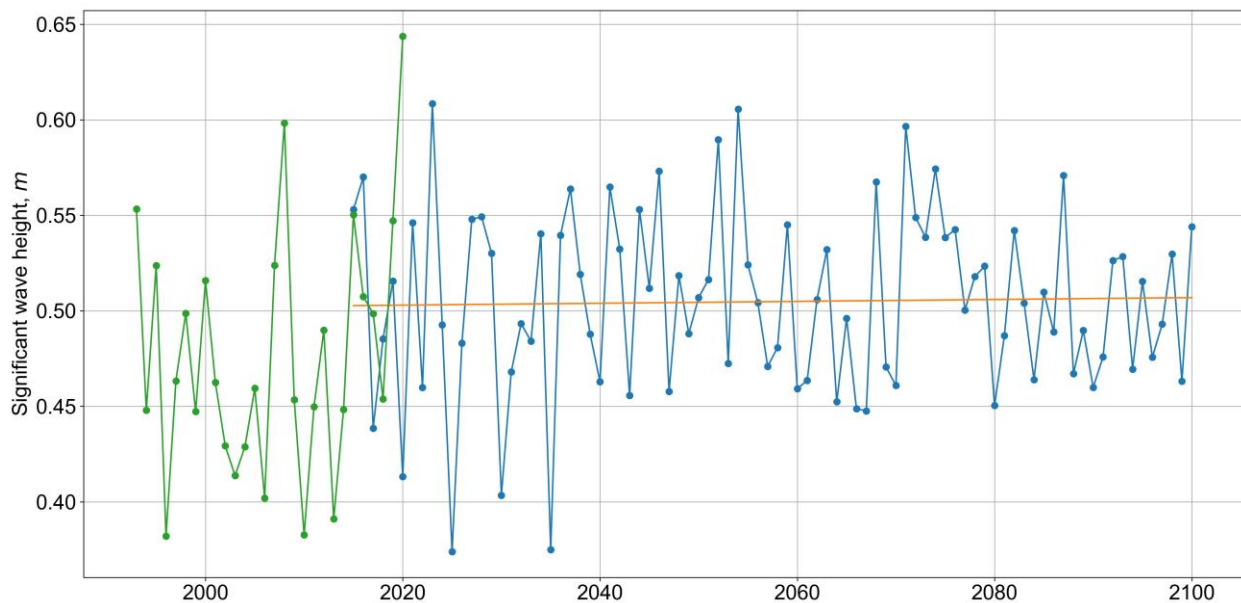
Attēls 3.18. Rīgas līča ziemas (JFM) ledus pārklājuma ikgadējās vērtības un trends.



Attēls 3.19. Rīgas līča virsmas sāļuma ikgadējās vērtības un trends.



Attēls 3.20. Rīgas līča ūdenslīmeņa ikgadējās vidējās vērtības un trends.

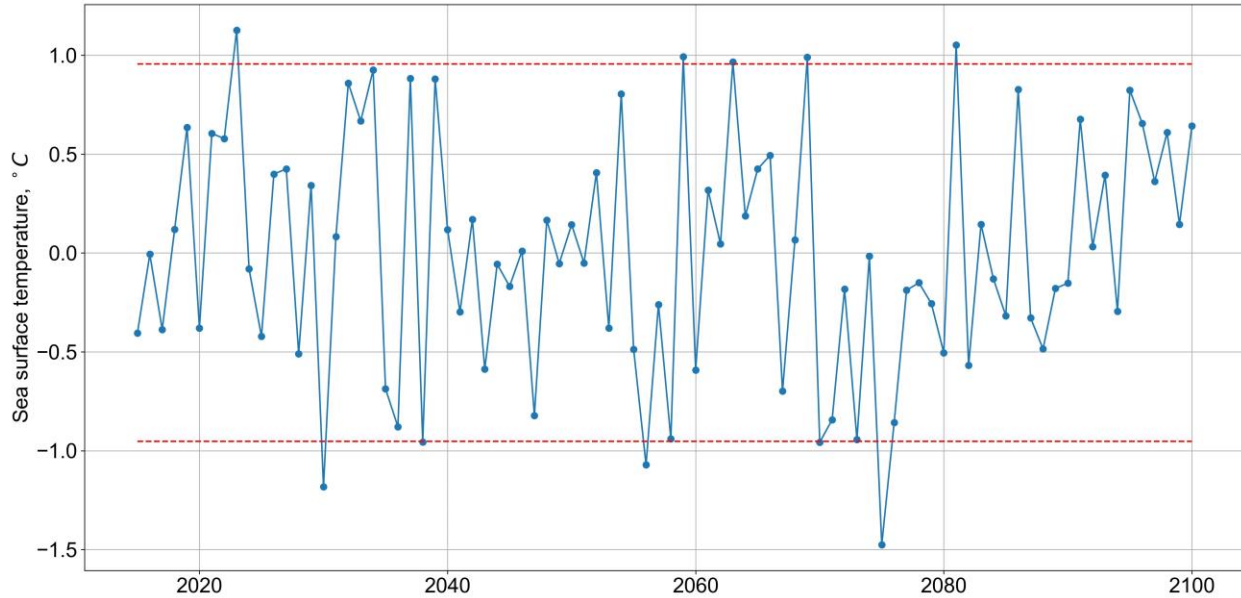


Attēls 3.21. Rīgas līča nozīmīgā viļņu augstuma ikgadējās vidējās vērtības un trends.

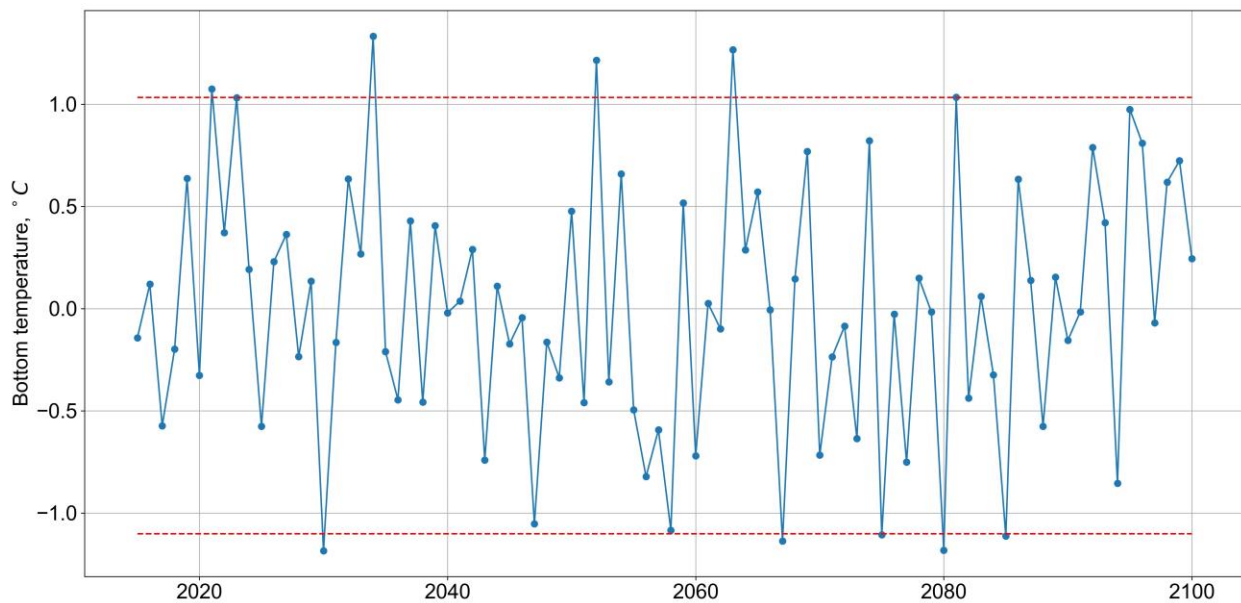
Formālā shēma dabiskas mainības un trendu analīzei ir sekojoša:

1. Izveidojam aplūkojamā parametra datu rindu.
2. Nosakām aplūkojamā parametru datu rindas trendu. Aplūkoto parametru datu rindu un trenda laika grafiki parādīti attēlos 3.16-3.21.
3. No punkta 1 parametru datu rindas atņemam punkta 2 trendu, iegūstot detrendētu datu rindu.

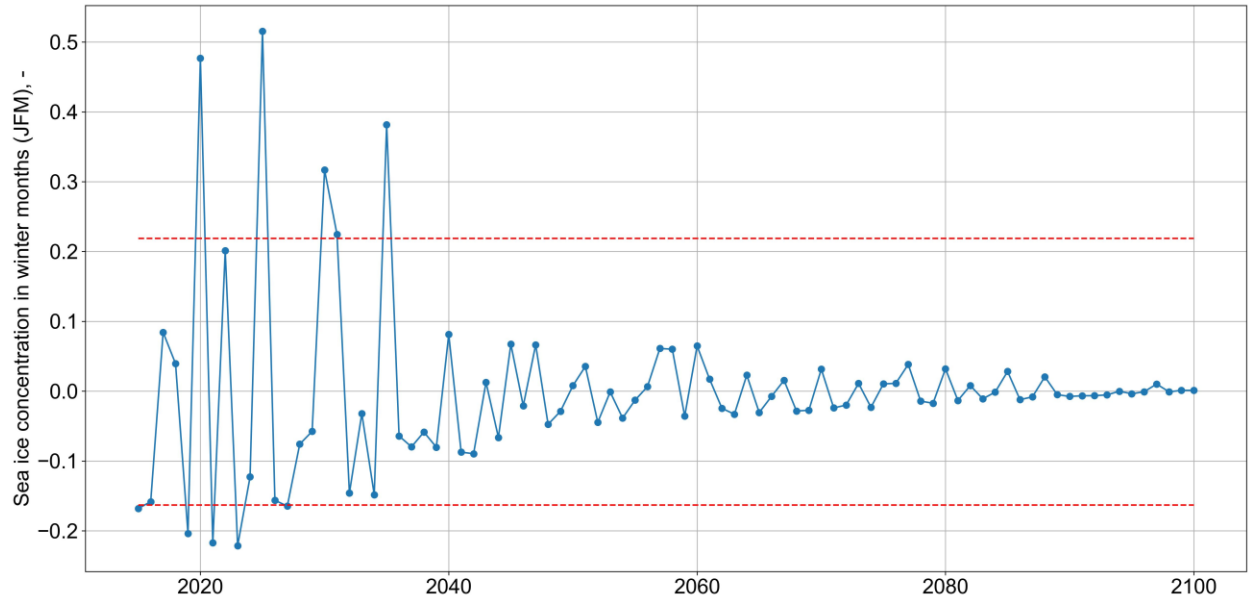
4. Punkta 3 parametru datu rindu izmantojam dabiskās mainības noteikšanai – mūsu gadījumā kā starpību starp datu rindas 95-o un 5-o promili. Detrendēto datu rindu laika grafiki un dabiskās mainības intervāls aplūkotajiem parametriem parādīti attēlos 3.22-3.27.



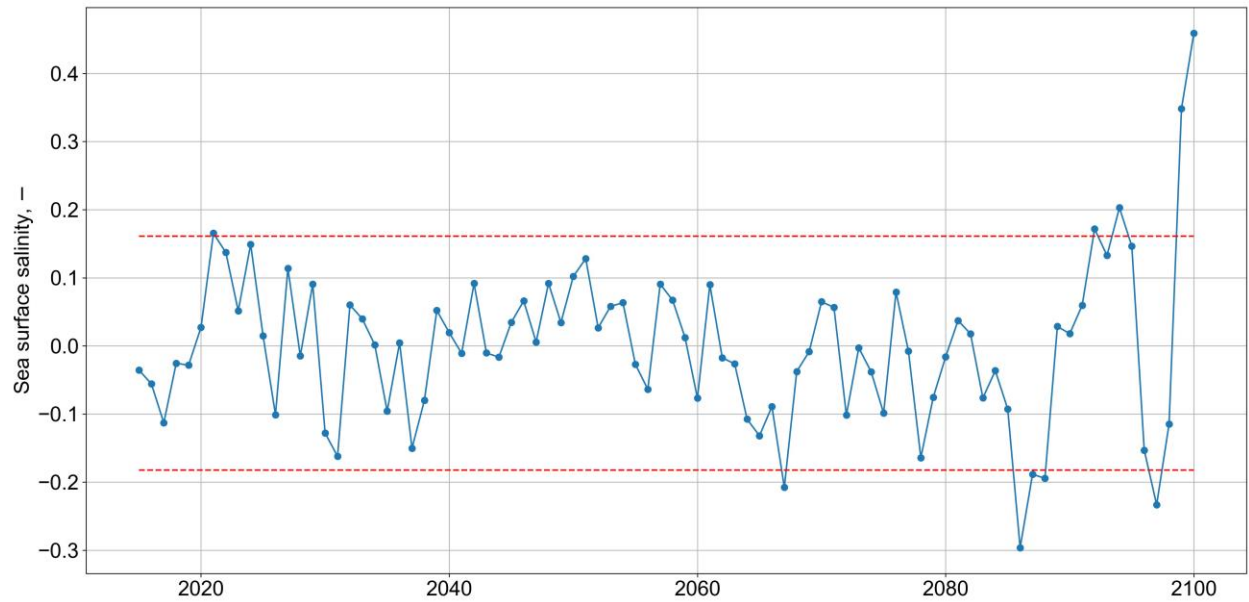
Attēls 3.22. Detrendētas Rīgas līča virsmas temperatūras ikgadējās vērtības un dabiskā mainība.



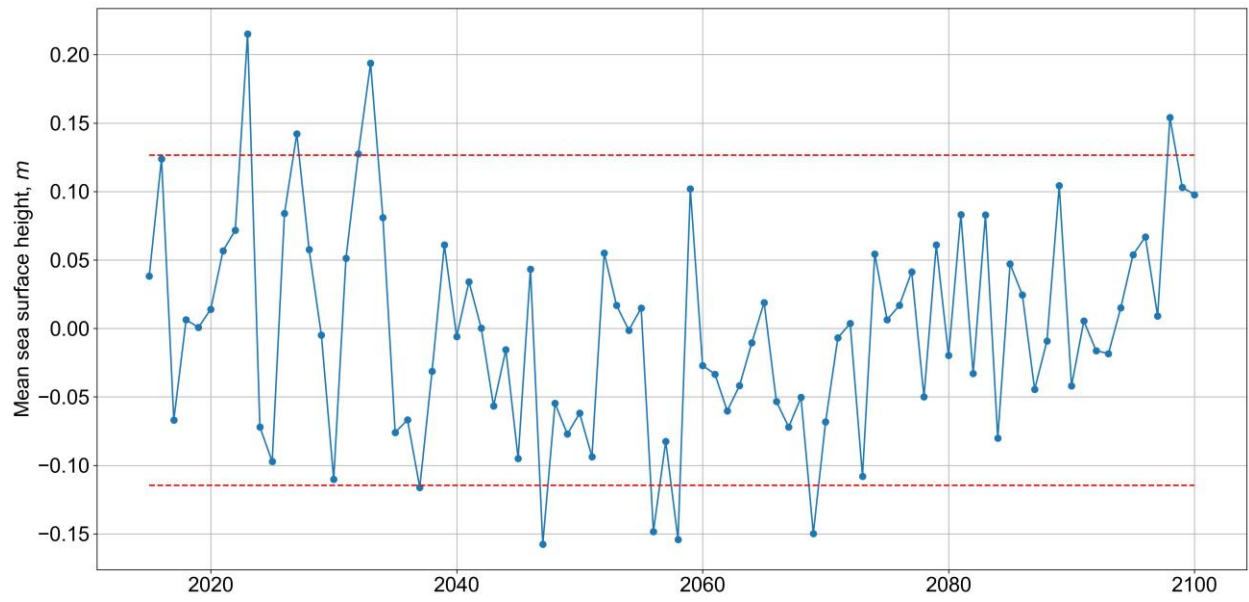
Attēls 3.23. Detrendētas Rīgas līča piegrunts temperatūras ikgadējās vērtības un dabiskā mainība.



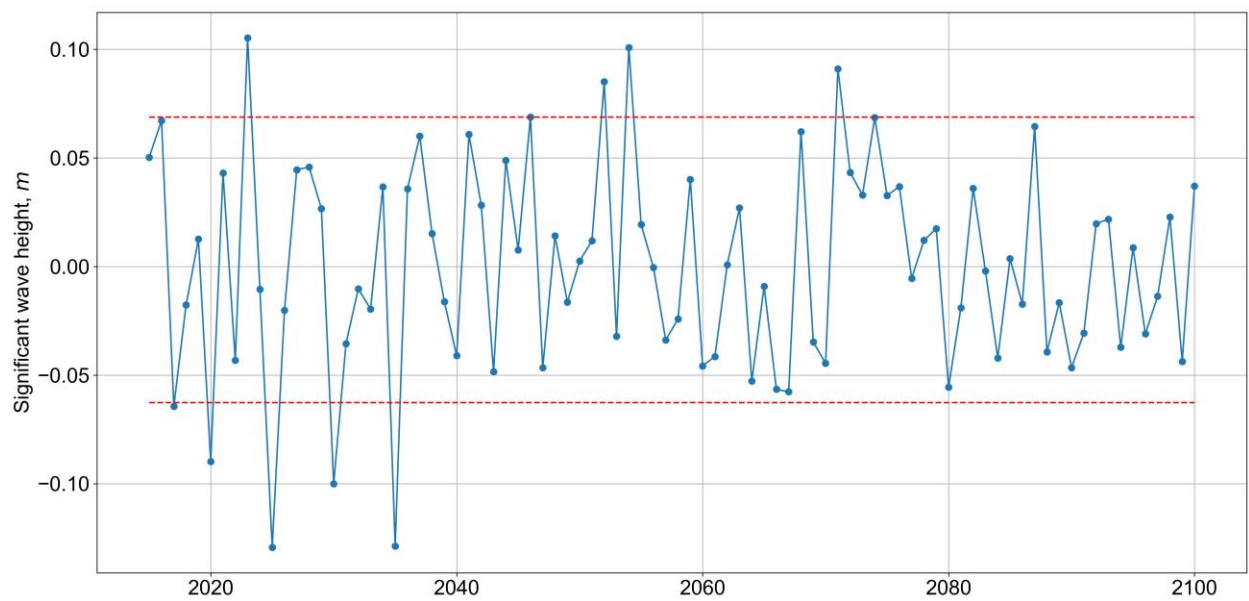
Attēls 3.24. Detrendētas Rīgas līča ledus pārklājuma ikgadējās vērtības un dabiskā mainība.



Attēls 3.25. Detrendētas Rīgas līča virsmas sāļuma ikgadējās vērtības un dabiskā mainība.



Attēls 3.26. Detrendētas Rīgas līča ūdenslīmeņa ikgadējās vērtības un dabiskā mainība.



Attēls 3.27. Detrendētas Rīgas līča viļņu augstuma ikgadējās vērtības un dabiskā mainība.

Dabiskās mainības un trendu analīzes kopsavilkums sniegts tabulā 3.1. Sajā tabulā apkopotas parametru vidējās vērtības 3 klimatiskos laika periodos, konkrētā parametra klimatiskā izmaiņa laika periodam 2015-2100.gg, parametra dabiskā mainība un attiecība starp klimatisko izmaiņu un dabisko mainību.

Redzams, ka klimatiskā izmaiņa divkārt pārsniedz dabisko mainību virsmas temperatūrai un ūdenslīmenim, bet gandrīz 1,5 reizes – piegrunts temperatūrai. Kaut arī ledus sega līdz gadsimta beigām praktiski izzūd, arī dabiskajā mainībā nereti ir gadi, kad Rīga līcī neveidojas ledus. Sāļumam un viļņu augstumam klimatiskā izmaiņai ir daudzkārt mazāka par šo parametru dabisko mainību.

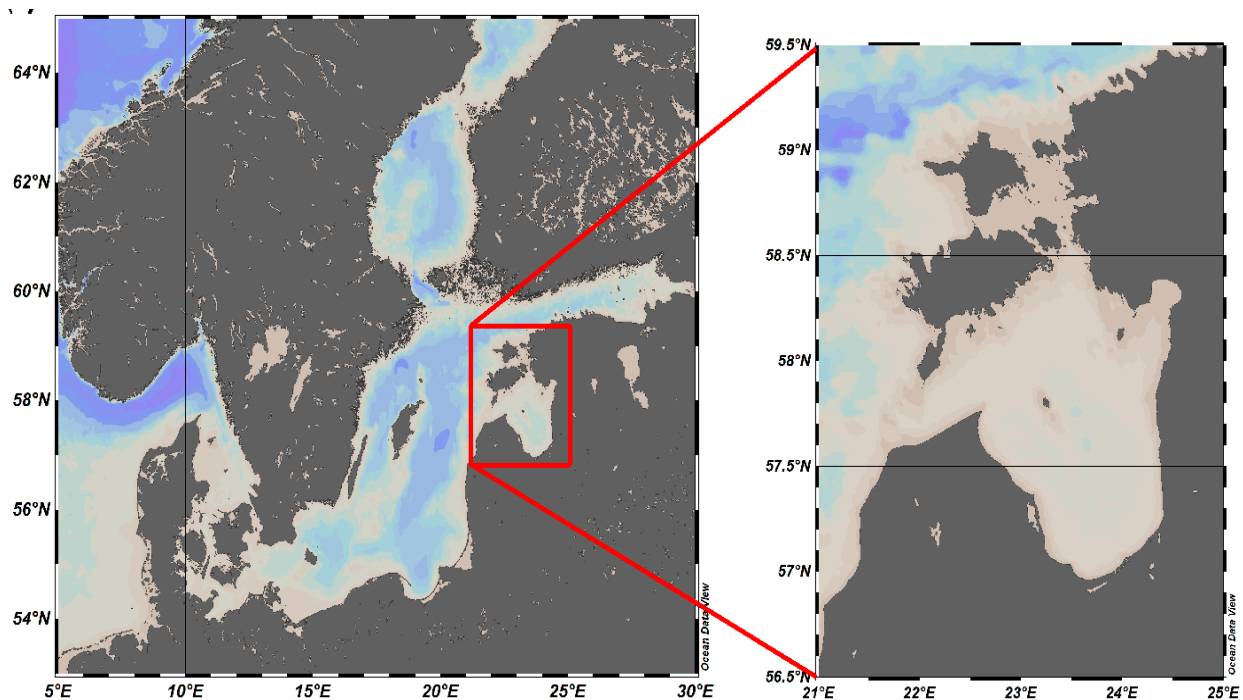
Tabula 3.1. Dabiskās mainības un trendu analīzes kopsavilkums.

	1993-2020	2021-2050	2071-2100	Klimata izmaiņa	Dabiskā mainība	KI/DM
Virsmas T, °C	8,19	9,62	11,70	3,71	1,91	1,94
Piegrunts T, °C	5,67	6,83	8,50	2,92	2,13	1,37
Ledus pārklājums, %	0,38	0,14	0,01	-0,28	0,38	0,74
Virsmas sāļums, PSV	4,98	5,18	5,17	0,019	0,34	0,06
Ūdenslīmenis, m	-0,06	0,07	0,39	0,52	0,24	2,15
Viļņu augstums, m	0,48	0,50	0,51	0,004	0,13	0,03

4. Klimata maiņas ietekme uz Rīgas jūras līci (WP4)

4.1. Modeļreģiona identificēšana (T4.1)

Galvenie servisi un intereses (D4.1). Uzsākot projekta darba uzdevumu izpildi, iesaistīto pušu, kas pārstāvēja gan valsts, gan nevalstisko sektoru, sanāsmē, Rīgas līcis ([Attēls 4.1](#)) tika identificēts kā vispiemērotākais modeļreģions.



Attēls 4.1. Baltijas jūra (NEWA-WRF modeļapgabals) un Rīgas līcis (HBM modeļapgabals), kā CE2COAST modeļreģions.

Sanāsmē tika identificēti galvenie jūras vides servisi ([Tabula 4.1](#)), kā arī slodzes, kas tos ietekmē.

Tabula 4.1. Galvenie identificētie servisi.

Galvenie servisi	Galvenās intereses, kas saistītas ar servisu	Slodzes
Zvejniecība	<ul style="list-style-type: none"> - Zvejniecības menedžments, kas balstās ekosistēmas pieejā - Zivju mazuļu dzīvotnes - Karstie punkti un patvēruma vietas - Zivju resursu telpiskā apsaimniekošana 	<ul style="list-style-type: none"> Duļķainības pieaugums Sāļuma samazināšanās Pārzveja
Laika apstākļu prognozēšana	<ul style="list-style-type: none"> - Vēja un ledus statistika 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatūras pieaugums
Piekraustes infrastruktūra	<ul style="list-style-type: none"> - Piekraustes procesi un klimata izmaiņas (krasta erozija) - Piekraustes applūšana un jūras līmeņa celšanās 	<ul style="list-style-type: none"> Temperatūras pieaugums

Galvenie servisi	Galvenās intereses, kas saistītas ar servisu	Slodzes
Oglekļa piesaiste	Netika atzīmēts	Duļķainības pieaugums
Atpūta	- Piekrastes infrastruktūras ievainojamība krasta erozijas kontekstā - Pavedienaļģu izskalošanas pludmalē pieaugums	Temperatūras pieaugums Biogēnu slodze
Bioloģiskā daudzveidība	- Roņu populācijas dzīves apstākļu pasliktināšanās - Piekrastes bentiskās dzīvotnes - Apbēršana ar sedimentu daļiņām un sedimentu transports - Hidroelektrostaciju ietekme un ostu teritoriju padziļināšanas ietekme uz ūdens caurspīdību - Zilganā meldra - tautas daiļamatniecībā lietota materiāla – pieejamības pasliktināšanās (tajā skaitā - iespējas ievākt ne katru gadu)	Temperatūras pieaugums Duļķainības pieaugums

4.2. Svarīgāko robežu un pakalpojumu tolerances identificēšana (T4.2)

Svarīgāko robežu un pakalpojumu tolerances identificēšana (D4.2). Evolūcijas gaitā organismi, tai skaitā jūrā mītošie, ir adaptējušies konkrētā rajonā dominējošiem vides apstākļiem, izveidojot vairāk vai mazāk unikālas populācijas. Pie tam, vienas un tās pašas sugas populācijas var būt adaptējušās atšķirīgiem vides apstākļiem. Pārceļot vienas populācijas īpatņus uz citu vidi (piemēram populācijas atjaunošanas programmas ietvaros), kuru iepriekš ir apdzīvojusi cita šīs pašas sugas populācija, īpatņi var neizdzīvot. Galvenokārt šāda situācija rodas, jo vides izmaiņas ir pārāk straujas. Šobrīd, klimata izmaiņu rezultātā, arī vides stāvokļa izmaiņas ir ļoti straujas, kas ierobežo organismu spēju adaptēties, ja vides stāvokļa izmaiņu rezultātā konkrētā rajonā vairs nav novērojami organisma izdzīvošanai nepieciešamie optimālie apstākļi.

Kā vēl viens būtisks faktors ir jāmin vides apstākļu kumulatīvās izmaiņas. Respektīvi, ja vides stāvoklis kopumā ir optimāls organisma izdzīvošanai, bet ir novērojamas īslaicīgas kāda faktora fluktuācijas, tad populācija dabīgi atjaunojas. Piemēram, lielu vētru laikā daļa no makrofitu populācijas tiek norauta no gultnes un izskalota krastā. Dominējot optimāliem apstākļiem (temperatūra, gaisma, sāļums, ūdens skābums) gada vai vairāku laikā populācija atjaunosies sākotnējā stāvoklī. Savukārt, ja vides apstākļus raksturojošie faktori ir zem vai virs optimālajiem, tad šādi epizodiski notikumi var būtiski degradēt populācijas stāvokli, jo atjaunošanās potenciāls ir zems. Piemēram, ja makrofitu populācija atrodas piekrastes rajonā, kur klimata ietekmē ir samazinājies ūdens sāļums zem vērtības, kas ir kritiski nepieciešama sporu veidošanās procesam, tad īslaicīgu ietekmju (vētras, karstuma viļņi) ietekmē zaudētā populācijas daļa var atjaunoties tikai tad, ja sporas no cita rajona (kurā ir sastopama veselīga populācija) ar straumēm tiek ienestas attiecīgajā rajonā un spēj iedzīvoties.

Attiecīgi, šī projekta vajadzībām tiek definēti trīs intervālu robežnosacījumi – optimālie apstākļi, kad populācija ir optimālā (veselīgā) stāvoklī, sub-optimālie, kad populācijas īpatņi var

izdzīvot, bet populāciju kopumā nevar raksturot kā optimālu, un apstākļi pie kuriem populācijas īpatņi nevar izdzīvot. Galvenokārt, fokuss ir uz temperatūras, sāļuma un ūdens caurspīdības jeb gaismas absorbcijas raksturlielumiem.

Gaisma. Pie nosacījumiem, ka ir pieejams zemūdens augiem nepieciešamais substrāts (Livingston et al. 1998)¹², kas variē atkarībā no sugas, apgaismojuma režīms tiek uzskatīts par galveno faktoru, kas kontrolē zemūdens augu telpisko izplatību (Bach et al., 1998)¹³. Līdzīgi kā substrāta gadījumā, arī apgaismojuma režīma prasības ir specifiskas dažādām zemūdens augu sugām. Atsevišķām seklūdens sugām, piemēram *Zostera* ģints sugām, dziļuma telpiskais limits var tikt noteikts balstoties uz Seki diska mērījumiem (Nielsen et al., 2002)¹⁴, kur dziļuma limits par apmēram 0.5 m pārsniedz nomērīto Seki dziļumu. Citām sugām šī sakarība nav tik viennozīmīga, jo to attīstībai ir nepieciešami citi gaismas viļņu garumi, kuru iespēšanās dziļumu var ietekmēt ne tikai ūdens slāņa biezums, bet arī ūdens slānī esoši izšķīduši savienojumi un suspendētās daļiņas. Ņemot vērā to, ka ūdens sastāvs ir specifisks Rīgas līcim, un ir pieejama tikai ļoti ierobežota publicēto avotu kopa, projekta vajadzībām tika izmantotas empīriski iegūtas sakarības.

Sāļums. Vuorinen et al. (2015)¹⁵ definē kritisko sāļumu, kas nepieciešams sugu vairošanai: 5 PSV *Mytilus edulis*, 5.2 PSV *Palaemon adspersus*, 5.1 PSV *Crangon crangon*.

Temperatūra. Sarunās ar Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskā institūts "BIOR" pētniekiem noskaidrots, ka līdz šim Rīgas līča zivju krājumu modelēšanā izmantoti no ūdens temperatūras datu rindām atvasināti indikatori:

- 1) Gada vidējā Rīgas līča temperatūra kā indikators *Eurytemora*, *Acartia*, *Bosmina*, cita zooplanktona, *Rotatoria* sastopamībai līcī.
- 2) Vasaras (jūnija–augusta) ūdens temperatūra par 40 m dziļākam ūdens slānim kā indikators *Trigloporus quadricornis* (four-horned sculpin), lucīšu, *limnocalanus* sastopamībai līcī (indikatoram pieaugot – sastopamība samazinās).
- 3) Pavasara (marts–maijs) vidējā ūdens temperatūra 0-20 m slānim kā indikators reņģu nārstam.

Skābekļa vajadzība un metaboliski mērījumi. Skābekļa koncentrācija zem 2 mg/l tiek uzskatīta par kritisku dzīvīem organismiem. Nereti kā robežvērtība izmantota arī 2.9 mg/l un sub-optimālais sliednis 4 mg/l. Kumulatīvi aplūkojot temperatūras pieauguma un skābekļa samazināšanās vienlaicīgu ietekmi – zinātniskā literatūrā uzmanība pievērsta vairākiem metaboliskiem parametriem, kuru vērtības virknei sugu apkopotas Seibel un Deutch (2020). No Rīgas līcī sastopamajām sugām pieejama informācija par gludo pleksti (*Limanda limanda*). "BIOR" līdz šim skābekļa koncentrācijas Rīgas līča par 40 m dziļākā slānī jūnijā–augustā izmantota kā indikators grēvja (*saduria*) un plakangliemenes (*macoma*) sastopamībai.

¹² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030437709700079X>

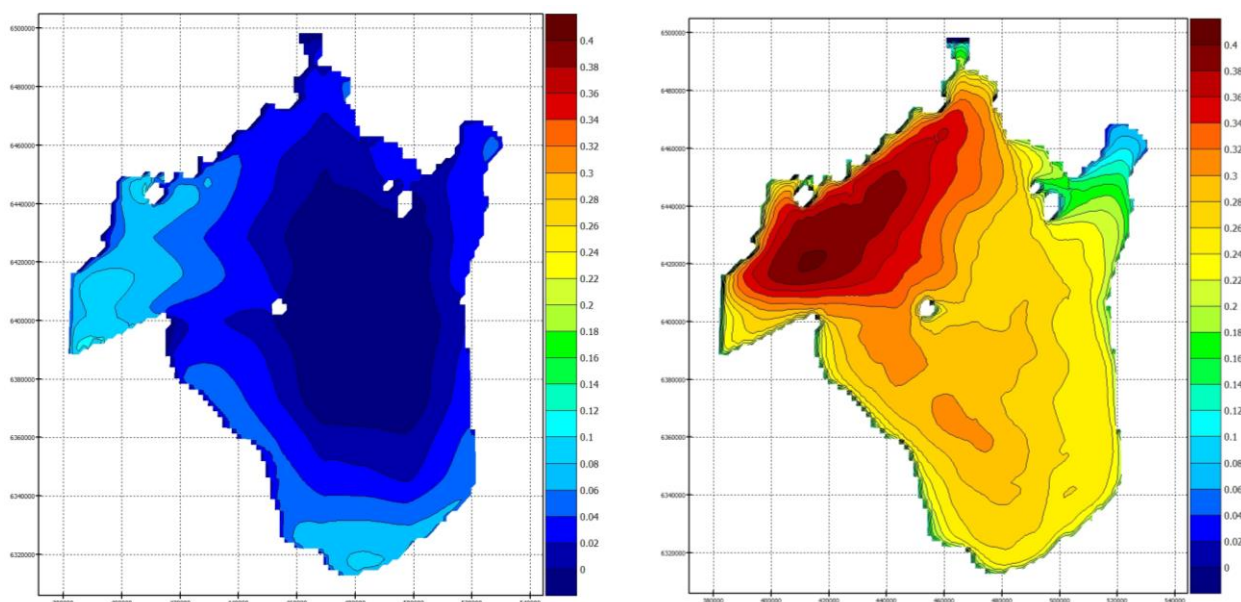
¹³ <https://www.int-res.com/articles/meps/174/m174p247.pdf>).

¹⁴ <https://www.istor.org/stable/1353347>

¹⁵ <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.019>

4.3. Karstie punkti un patvēruma vietas (T4.3)

Karsto punktu un patvēruma vietu kartes vienas slodzes un vairāku kumulatīvu slodžu gadījumā (D4.3). Projekta aktivitātē tika noteikta Rīgas līča ledus segas ietekme uz viļņu augstumu. Analizējot modelēšanas datus tika atklāts, ka ledus pārklājumam samazinoties, vidējais viļņu augstums ziemas mēnešos pieaugs. Attēlos 3.9-3.10 sniegts vidējais nozīmīgo viļņu augstuma sadalījums Rīgas līcī. Redzams, ka vidēji lielākais viļņu augstums raksturīgs oktobra-janvāra mēnešos. Augstāks viļņu augstums ir līča daļai uz Z no Roņu salas, kā arī uzskatāmi ievērojams, ka līča A-piekrastē viļņu iedarbība vidēji ir spēcīgāka nekā līča R-piekrastē. Šos efektus nosaka valdošie Rietumu sektora vēji. Saistībā ar temperatūras pieauguma rezultātā izzūdošo ledus segu redzams, ka gan vidēji gadā, gan īpaši februāra mēnesī vidējais viļņu augstums pieaug.



Attēls 4.2. Vidējā viļņu augstuma (m) Rīgas līcī pieaugums, salīdzinot laika periodus 2071-2100 un 1993-2022. Gada vidējais (pa kreisi) un februāra mēneša (pa labi) pieaugums.

4.4. Iespējas (T4.4)

D4.4 Pieejamo politikas instrumentu un iespēju raksturojums identificētai slodžu izmaiņai un pakalpojumu tolerances robežām (D4.4). Identificētais starptautiskais regulējums, Latvijas tiesību akti un politikas dokumenti:

- Apvienoto Nāciju Organizācijas (ANO) Vispārējā konvencija par klimata pārmaiņām.
- ANO Vispārējās konvencijas par klimata pārmaiņām Parīzes nolīgums.
- ANO Vispārējās konvencijas par klimata pārmaiņām Kioto protokols.
- Par Latvijas Republikas dalību Kioto protokola elastīgajos mehānismos.
- Marine Strategy Framework Directive 2008/56/EC.
- Water Framework Directive (WFD).

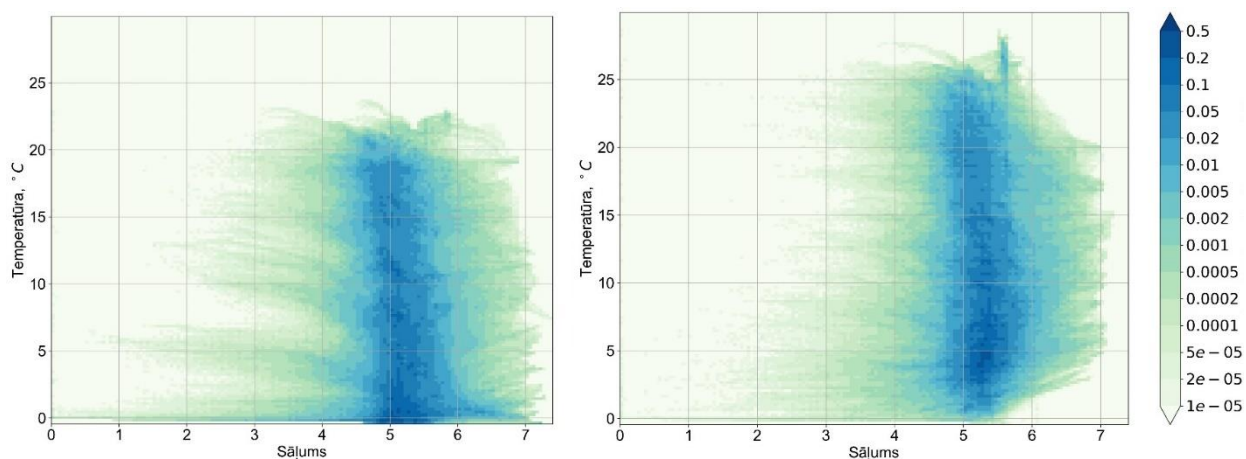
- Marine Strategy Framework Directive; Integrated Coastal Zone Management (ICZM).
- Helsinku konvencija (HELCOM).
- HELCOM Baltijas jūras rīcības plāns.
- EU Coastal and Marine Policy.
- Common Fisheries Policy (CFP).

4.5. Brīdināšanas sistēma (T4.5)

Indikatori pilotteritorijas jūras servisiem (D4.5). Agrīnās brīdināšanas sistēmas prototips ietver reanalīzes un nākotnes projekciju modeļaprēķinu mēnešu vidējo vērtību interaktīvu vizualizāciju - web prezentāciju¹⁶ LU SMI uzturētajā servisā www.water.lv.

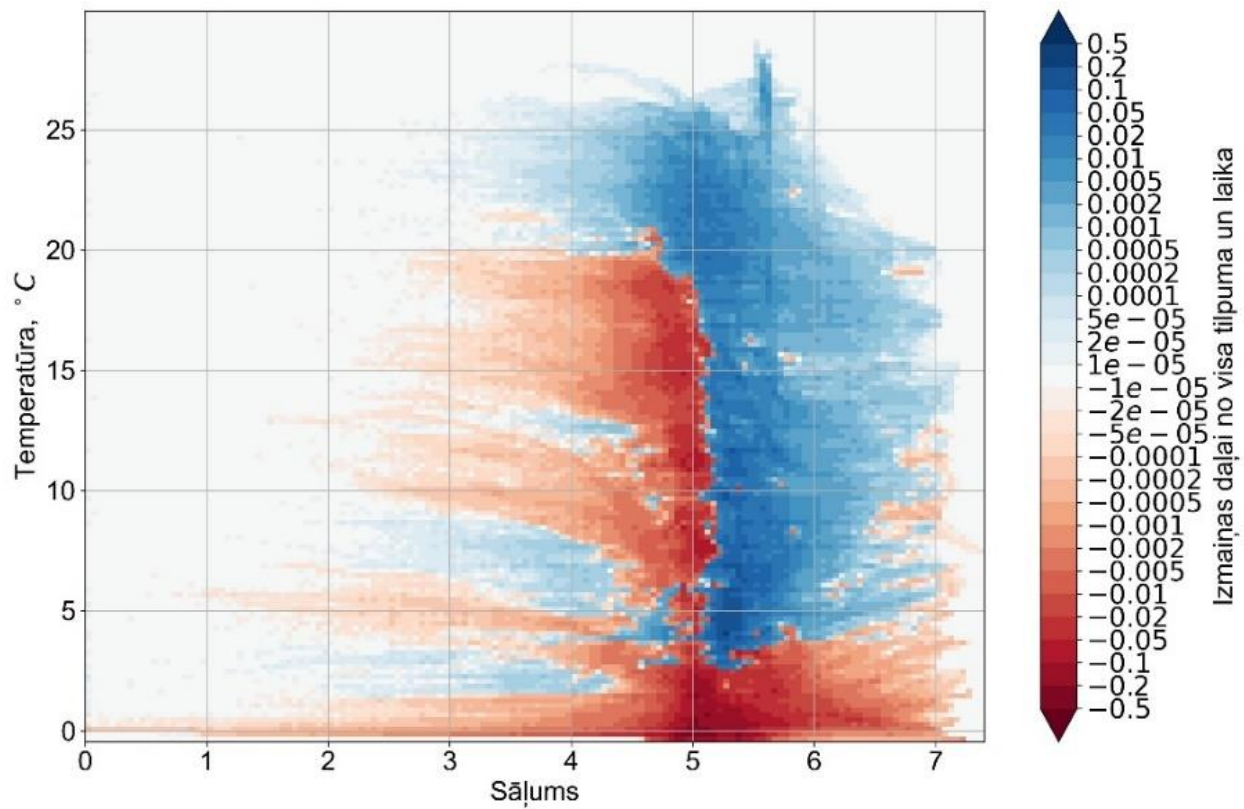
4.6. Tālākizglītības modulis (T4.6)

Brīvpieejas tālākizglītības mācību moduļa izstrāde (D4.6). Projekta laikā likts pamats vairākām iestrādēm, kas var tālāk tikt pielietotas kā uzskates materiāls mācību materiālos. Attēlā 4.3 parādīta modelētā Rīgas līča temperatūras-sāļuma (TS) diagrammas reprezentācija pašreizējā (1993-2022) un nākotnes (2071-2100), bet attēlā 4.4 vizualizēta TS izmaiņa starp periodiem. Klimata pārmaiņu tendence uzrāda, ka samazināsies visu sāļumu relatīvi aukstākais ūdens Rīgas līcī. Pieaugs ūdens daļa ar relatīvi augstāku temperatūru.



Attēls 4.3. Rīgas līča temperatūras un sāļuma diagrammas reprezentācija 1993-2022. gadiem (pa kreisi) un 2071-2100. gadiem (pa labi). Skala raksturo sastopamības biežumu – daļa no tilpuma un laika procentos (mazākas vērtības – retāk, lielākas – biežāk sastopamām TS kombinācijām).

¹⁶ <http://www.modlab.lv/Meteo/FimarWeb/ce2coast/index.html>



Attēls 4.4. Starpība starp 2071-2100. gg. un 1993-2022. gg. klimatu Rīgas līcī T-S reprezentācijā.
 (-) – TS kombinācijas, kas nākotnē retākas, (+) – TS kombinācijas, kas nākotnē biežākas.

5. Zinātne un sabiedrība (WP5)

5.1. Interesešu koordinācija (T5.1)

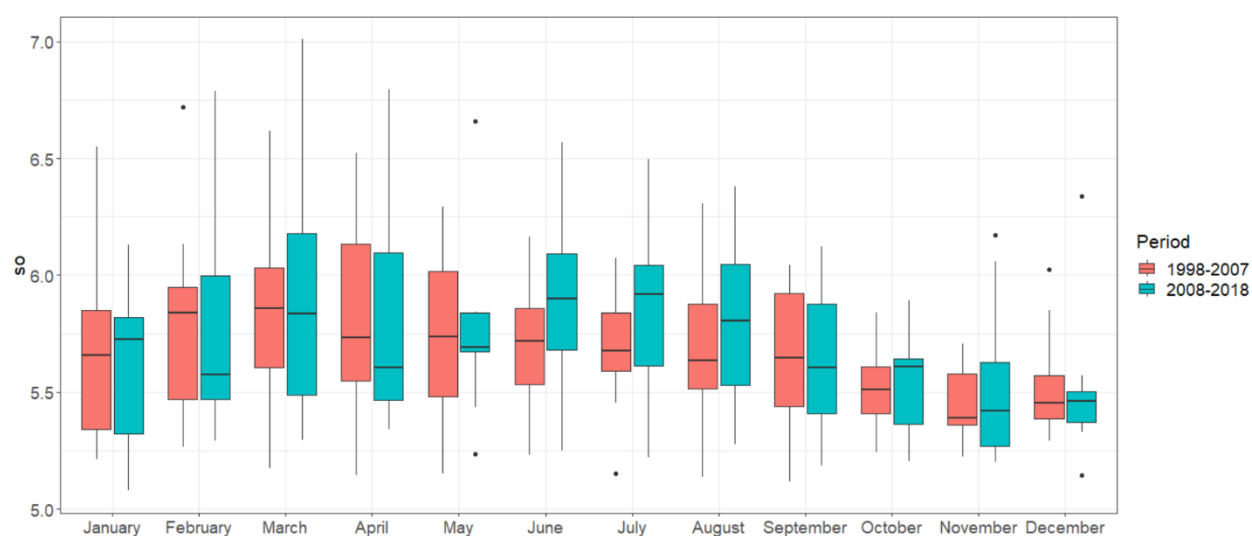
Interesešu apzināšana (D5.1). Intereses saistībā ar jūras servisu ietekmējošiem indikatoriem apzinātas šim nolūkam organizētā ieinteresēto pušu seminārā, sarunās LR Vides ministrijas rīkotās darba grupās, LU 80. un 81. Starptautisko zinātnisko konferenču sekcijās, LU Zinātnieku naktī 2023, individuālās tikšanās ar ieinteresētām pusēm.

Galvenās apzinātās intereses profesionāļu auditorijā: regulāra informācijas apmaiņa un saistīto nozaru speciālistu tikšanās.

Galvenās apzinātās intereses sabiedrībai: informācijas pieejamība par ūdens temperatūru un tīrību peldēšanas sezonā. Interese par jūras gultni Rīgas līcī – apauguma, derīgo izrakteņu kontekstā.

5.2. Koprades stratēģija (T5.2)

Komunikācijas stratēģija (D5.2). Projekta partneriem saistoša komunikācijas stratēģija sarunai ar ieinteresētām pusēm tika izstrādāta un pievienota šim dokumentam kā Pielikums 1a¹⁷. Projekta prezentācija ieinteresēto pušu seminārā 2021. gada 23. februārī pievienota šim dokumentam kā Pielikums 1b¹⁸.



Attēls 5.1. Rīgas līča maksimālā sāļuma sezonālitate dziļūdens (>40 m) slānim. 1998-2007 un 2008-2018. gadu salīdzinājums.

5.3. Produkti izplatīšanai (T5.3)

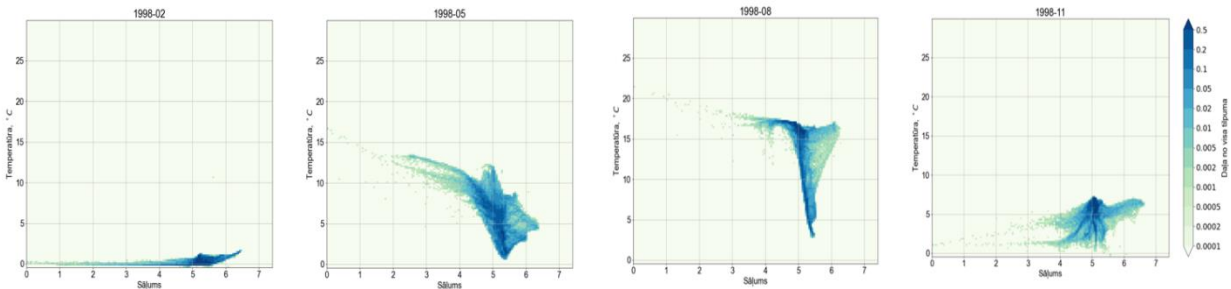
Vajadzību katalogs (D5.3). Papildus modeļaprēķinu web prezentācijai (www.water.lv) tika identificētas sekojošas vajadzības pēc operacionāliem un klimatiskiem produktiem.

- Operacionāla informācija par Latvijas teritoriālo ūdeņu dziļūdens daļu.

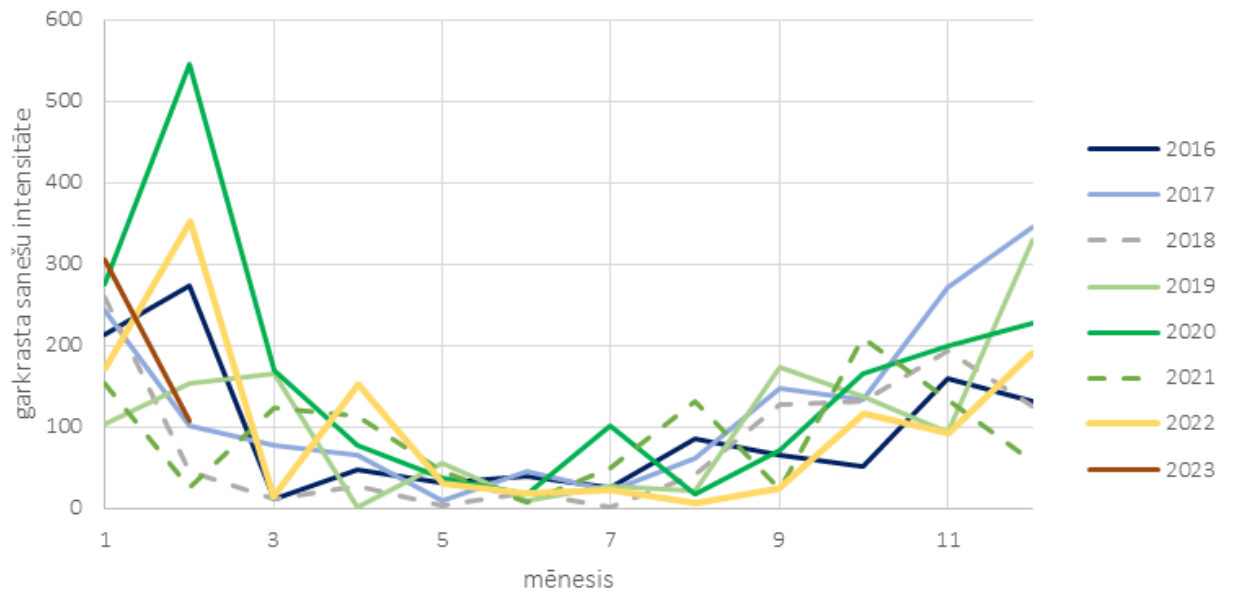
¹⁷ Ce2Coast_Pielikums1a.docx

¹⁸ Ce2Coasat_Pielikums1b.pdf

- Operacionāla informācija par garkrasta sanešiem Rīgas līcī; nākotnē potenciāls atbalsts noteikt sanešu akumulācijas varbūtiskāk skartos piekrastes apgabalus (DAP).
- Operacionāla informācija par modelētu ūdens apmaiņu starp Rīgas līci un Baltijas jūru.
- Operacionāla informācija par no lielākām upēm ieplūstošā saldūdens izplatību.
- Informācija par parametru mainību desmitgadēs. Piemērs, dziļūdens sālījumam sniegts attēlā 5.1, bet vidējā virsmas sāluma sezonālitatei 1998-2007 un 2008-2018 Pielikumā 2¹⁹.
- Klimatiskā informācija par klimatiski vidējām fizikālo parametru vērtībām, sastopamības biežuma sezonālitatei (attēls 5.2), garkrasta sanešu dinamiku (attēls 5.3).



Attēls 5.2. Rīgas līcis T-S reprezentācijā 1998. gada februārī, maijā, augustā un novembrī²⁰.



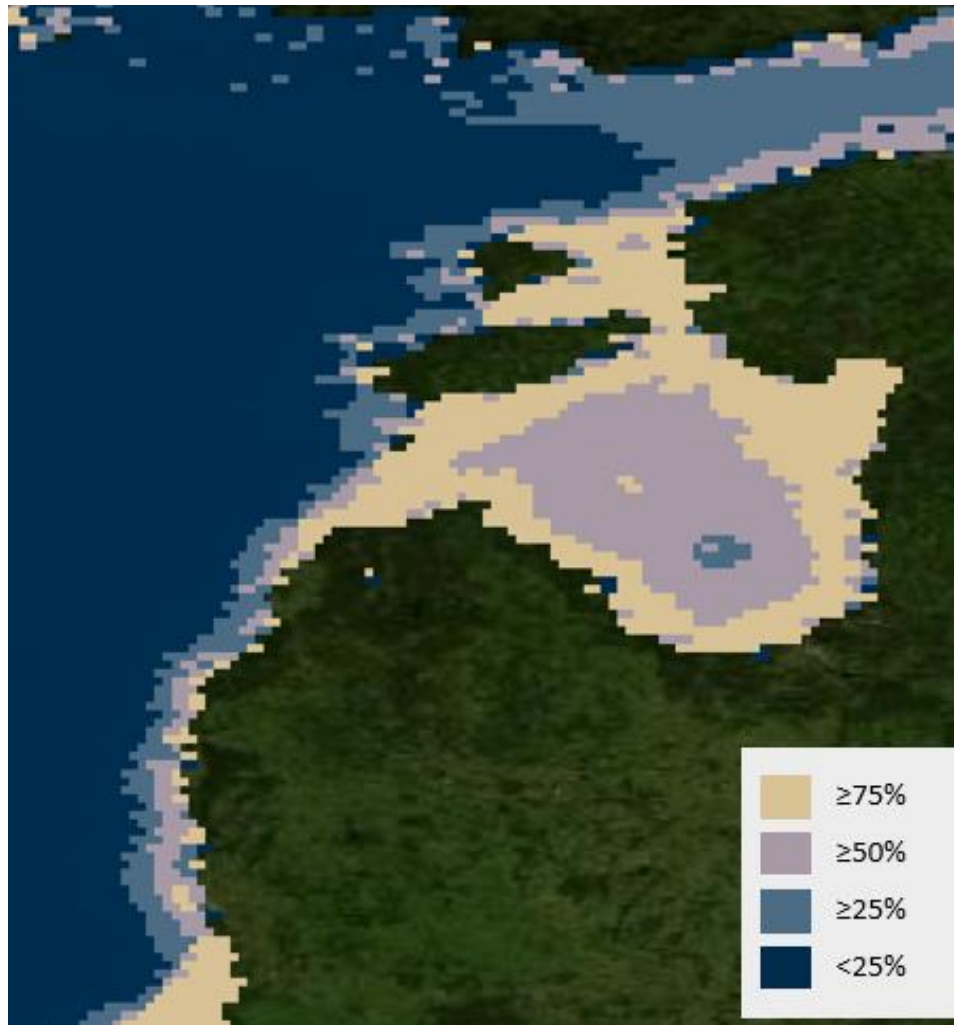
Attēls 5.3. Modelēta garkrasta sanešu intensitāte (Liepājā) 2016 – 2023. gadam.

¹⁹ Ce2Coast_Pielikumi2_3.docx

²⁰ http://www.modlab.lv/Meteo/Klimats/GulfOfRiga/TSDiagram/TS_histo_animation.html

5.4. Zinātības nodošana (T5.4)

Publikācijas (D5.4). Iegūtie rezultāti par ilgtermiņa sāļuma un caurredzamības izmaiņām un to ietekmējošiem faktoriem Rīgas līcī iesniegti publicēšanai *Oceanologia*, *Climate-induced changes in light attenuation: a case study of Secchi depth long-term trends in the Gulf of Riga, Baltic Sea*.



Attēls 5.4. Mēnešu skaits, kuros ūdens krāsa pārsniedz 9 Forel-Ule skalā Rīgas līcī un Baltijas jūras austrumgotlandes daļā. 1998-2018. gada mērījumu dati no Pitarch et. al. 2019 (augšā). Forel – Ule krāsu skalas etalons vērtībām 1-21 (LHEI foto, apakšā).

Konferencē *International Conference of Environmental Design* (Atēnas, 2023. gada oktobris) tika presentēta saistība starp Rīgas līča ūdens krāsu, Seki dziļumu un modelēto virsmas sāļumu. Pievērsta arī uzmanība iekšējiem biogēnu (konkrētāk, fosfora savienojumu) avotiem, kas pastiprināti nonāk Baltijas jūras ūdens kolonnā, samazinoties skābekļa koncentrācijai. Sagaidāms, ka tiem atkārtoti nonākot ūdens virspusē, būtu iespējama pastiprināta aļģu ziedēšana, kas, savukārt, radītu ūdens krāsas izmaiņas. Šī iemesla dēļ atsevišķi tika apskatīti gadi, kuros bezskābekļa apstākļi ir/nav bijuši – lai pamanītu vai krāsai/caurredzamībai ir atšķirības un atšķirīga saistība ar virsmas sāļumu katrā no gadu kopām. Iegūtie rezultāti publicēti konferences rakstu krājumā: “Modeled surface salinity and satellite data as proxy for Secchi depth and watercolor of the Gulf of Riga”, Pielikums 4²¹.

Zinātniskajā literatūrā aprakstītas pieejas, kurās ūdens krāsas satelītdati izmantoti, lai atrastu upju ūdens ietekmētākos jūras reģionus, piemēram, Fronkova et. al. (2022) pārskatā, kurā minēts, ka ūdens krāsas vērtība virs 9 raksturīga upju materiāla ietekmē. Šādu orientējošu kritēriju pielietojot Pitarch et. al. (2019) ūdens krāsas datu slānim mūsu reģionā, redzama spēcīga upju ietekme vairāk nekā pusē no mēneša vidējam ūdens krāsas vērtībām gandrīz visā līča apgabalā. Šāda analīze arī parāda, ka apgabals, kurā visretāk šis kritērijs tiek pārsniegts (attēlā 5.4. iekrāsots pelēkzils) atrodas uz D-DA no līča dziļākās vietas.

Tabula. 5.1. Atklāto ūdeņu stacijās satelītdatu mēneša vidējo vērtību datu kopā novērotā upes ūdenim atbilstošā ūdens krāsas diapazona (ūdens krāsa ≥ 10) proporcija no kopējā 1998-2007 un 2008-2018. gados.

Stacija	102A	119	120	121	121A	135	137A	142	107	111
Novērojumi 1998-2007	69	166	42	68	63	71	69	63	25	28
Tajā skaitā " ≥ 10 "	46	99	28	32	37	40	42	31	18	17
Procentos " ≥ 10 "	67	60	67	47	59	56	61	49	72	61
Novērojumi 2008-2018	23	35	27	28	25	27	25	26	25	22
Tajā skaitā " ≥ 10 "	19	28	18	17	18	23	17	21	17	13
Procentos " ≥ 10 "	83	80	67	61	72	85	68	81	68	59

Tā kā ekosistēmas novērojumi līcī liecina par caurredzamības pasliktināšanos, kā arī satelītdatos analizētās caurredzamības (attēlā 1.4) secīgās desmitgadēs parādīja piekrastes caurredzamības samazināšanos, tika pievērsta uzmanība arī ūdens krāsas izmaiņām satelītdatos un novērojumos šajās desmitgadēs. Tabulā 5.1. uzrādīts pieejamo ūdens krāsas novērojumu skaits izvēlētās stacijās Rīgas līča atklātajā daļā (ar labāko datu pieejamību) un proporcija novērojumiem, kuros procentuāli novērotas vērtības, kas var liecināt par upju ūdens ienesta materiāla ietekmi. Šajā salīdzinoši vienkāršajā analīzē ieraugāms, ka no 10 apskatītajām novērojumu stacijām, 7 stacijās ūdens krāsas situācija biežāk bijusi atklātam jūras ūdenim raksturīga pirmajā no periodiem 1998-2007, nekā 2008-2018 gados; 3 stacijās bijusi nemainīga vai gandrīz nemainīga abos periodos.

²¹ Ce2Coast_Pielikums4.pdf

Projekta rezultāti tika prezentēti plašākai auditorijai:

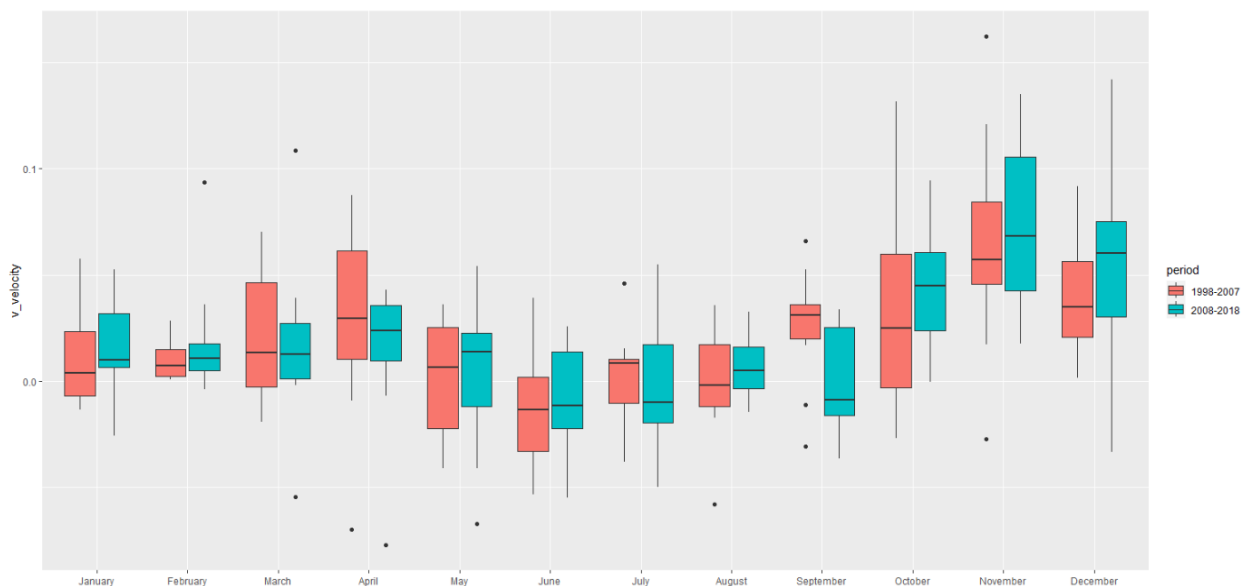
- Rīgas jūras līča klimatiskais modelis, Rolands Aleksandrs Rudenko, Andrejs Timuhins, Uldis Bethers, Juris Seņņikovs, Vilnis Frišfelds, Daiga Cepīte-Frišfelde. 80. starptautiskā LU Zinātniskās konferences sekcija 2022. gada janvārī;
- Viļņu klimata reanalīze Rīgas jūras līcī, Aigars Valainis, Vilnis Frišfelds, Daiga Cepīte-Frišfelde. 81. starptautiskā LU Zinātniskās konferences sekcija 2023. gada janvārī;
- Stacija – Virtuālā Baltijas jūra, Daiga Cepīte-Frišfelde. Latvijas Universitāte, Zinātnieku nakts 2023. gada 29. septembrī.

5.5. Starptautisks darbseminārs (T5.5)

Projekta noslēgumā konsorcijs organizēs darbsemināru ar mērķi apmainīties ar WP4 izmantojamām pieejām, kas tiks turpinātas arī pēc projekta noslēguma.

5.6. Trūkumu analīze un turpmākie pētījumi (T5.6)

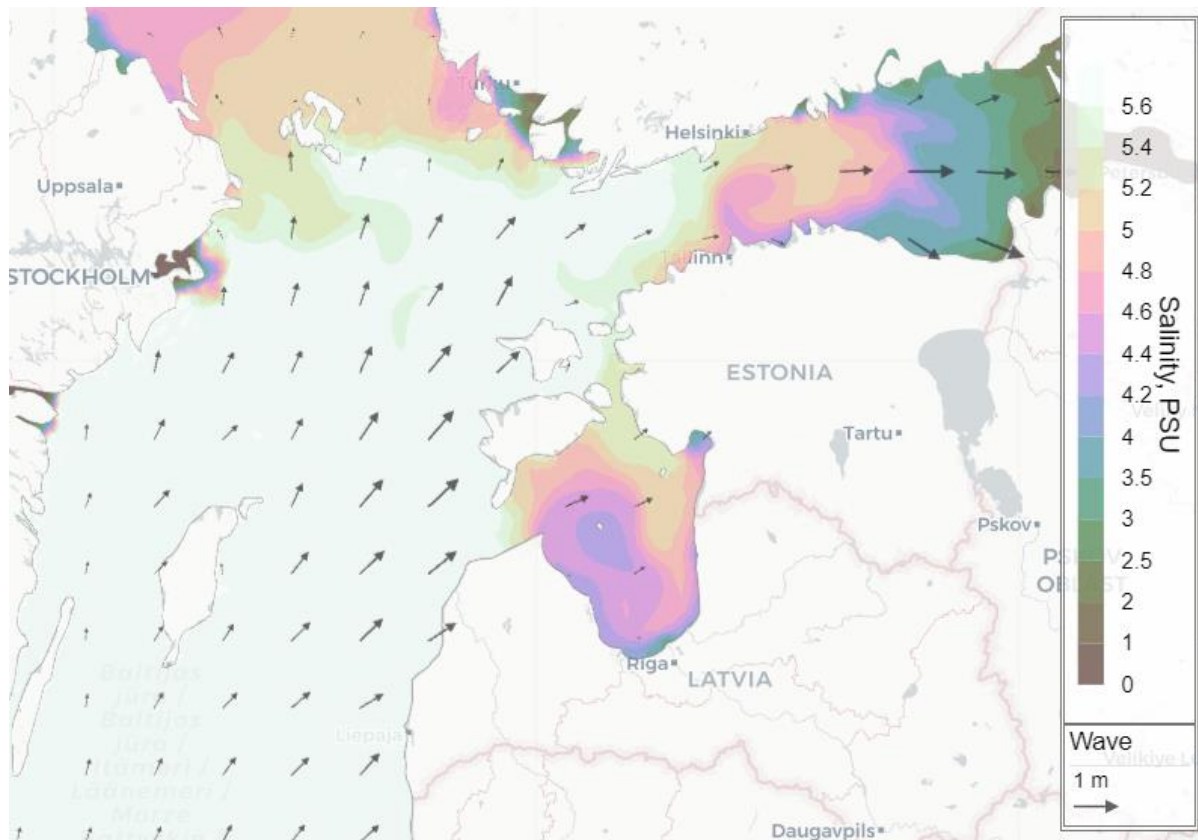
No zinātniska viedokļa nozīmīga ir Austrumgotlandes baseina un Rīgas līča ūdens apmaiņas operacionāla izsekošana, kā arī publiski pieejams sāļuma bilances monitorings Irbes jūras šaurumā.



Attēls 5.5. Vidējais virsmas straumes ātrums krastam perpendikulāros transektos līdz 30 m dziļumam līča A piekrastē ar platumu LAT=57.83.

Uzmanība pievēršama arī līča austrumu piekrastē no Igaunijas puses ieplūstošajam ūdenim, Attēls 5.5. parāda, ka divās apskatītās desmitgadēs, piemēram, rudenī (septembra

mēnesī) modelētie virsmas straumes dati uzrāda straumes virziena izmaiņas, kam var būt ietekme uz A-piekrastes ekosistēmu. No Z puses A-piekrastei pieplūstošais ūdens var būt gan sālāks – kā situācijā, ja ūdens plūst no Vainameri šauruma (attēls 5.6), gan mazāk sāļš, ja no seklā Pērnavas līča.



Attēls 5.6. Virsmas sāļuma un viļņu virziena sadalījums 2023. gada 28. jūlijā.

Vietējiem amata meistariem būtiskas izejvielas - zilganā jūras meldra iegūšana var nebūt jūras (Rīgas līča) piekrastē iespējama katru gadu, jo meldru neesot bijis sekojošos divos gados - 2021., 2022. gada vasarās.

Saruna ar sabiedrību LU Zinātnieku naktī 2023 parādīja iztrūkstošu posmu salīdzinoši vienkāršā informācijā par ūdens sāļuma atšķirībām Kurzemes piekrastes atklātajā daļā un Rīgas līcī, kā arī izpratni par sāļumu kā faktoru zivju un citu dzīvu organismu dzīves vides piemērotībai.

Rīgas līča piekraste ir viegli pieejama ar sabiedrisko un privāto transportu - piekrastes daļa ir viegli sasniedzama. Kas jūrā notiek tālāk par pludmali, nav zināms lielākajai daļai sabiedrības. Trūkstošais posms - radīt vairāk iespējas drošos apstākļos izziņāt Rīgas līci tālāk no krasta (redzēt roņus, zvejas procesu klātienē un iespējams arī attālināti ar webkameru).

Projekta gaitā tika iegūti rezultāti par līča parametru savstarpējo korelācijas sezonalitāti, vēl nav publicēti un tiks izmantoti zinātnisku publikāciju sagatavošanā, Pielikums 3²².

²² Ce2Coast_Pielikumi2_3.docx

Literatūras atsauces

Bach et al. (1998) <https://www.int-res.com/articles/meps/174/m174p247.pdf>

Frishfelds, V., Sennikovs, J., Bethers, U., Murawski, J., Timuhins, A. Modeling Transit Flow Through Port Gates and Connecting Channel in Baltic Sea—Liepaja Port—Liepaja Lake System
Frontiers in Marine Science, 2021, 8, 657721

Fronkova, L.; Greenwood, N.; Martinez, R.; Graham, J.A.; Harrod, R.; Graves, C.A.; Devlin, M.J.; Petus, C. Can Forel–Ule Index Act as a Proxy of Water Quality in Temperate Waters? Application of Plume Mapping in Liverpool Bay, UK. *Remote Sens.* 2022, 14, 2375.

<https://doi.org/10.3390/rs14102375>

Livingston et al. (1998)

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030437709700079X>

Mohrholz et al. (2015) (doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.03.005)

Nielsen et al. (2002) <https://www.jstor.org/stable/1353347>

Pitarch et al., (2019) PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.904266>

Seibel and Deutsch (2020) *Journal of Experimental Biology*:

<https://doi.org/10.1242/jeb.210492>. Supplementary information

Vuorinen et al. (2015) <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.019>

Weismann Poulsen, J., Berg, P., and Karthik, R. (2014). Better Concurrency and SIMD On The HIROMB-BOOSMODEL (HBM) 3D Ocean Code” In: J. Jeffers and J. Reinders (eds.). *High Performance Parallelism Pearls: Multicore and Many-core Programming Approaches*. Morgan Kaufmann Publishing.

Pielikumi

Pielikums 1a: Projekta komunikācijas plāns.

Pielikums 1b: Downscaling Climate and Ocean Change to Services: Thresholds and Opportunities projekts – ieinteresēto Latvijas pārstāvju tikšanās. Daigas Cepītes – Frišfeldes prezentācija 23-Feb-2021.

Pielikums 2. Vidējā virsmas sāļuma 2008.-2018. un 1998.-2007. gados starpības sezonālitate.

Pielikums 3. Ūdens krāsas korelācijas ar modelētiem fizikāliem parametriem sezonālitate Rīgas līcī 1998-2018. gadā.

Pielikums 4. Daiga Cepīte-Frišfelde, Andrejs Timuhins, Vilnis Frišfelds. Modeled surface salinity and satellite data as proxy for Secchi depth and watercolor of the Gulf of Riga. E3S Web of Conferences, 436, 1 0001 (2023) ICED 2023, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343610001>