



Vee kvaliteedi; veesamba füüsikaliste (sh. hüdrodünaamika) ja
biogeokeemiliste parameetrite ning reostuslevi uuring Saare-
Liivi meretuulepargi KMH raames

Lõpparuanne

Tellijä: UTILITAS WIND OÜ

Versioon: 04.11.2024

Kokkuvõte

Välitööd

Käesolev töö on koostatud Saare-Liivi meretuulepargi KMH raames. Mõõdeti veesamba omadusi ja hüdrodünaamikat kirjeldavad parameetrid. Hinnati tuulepargi rajamise mõju hüdrodünaamikale ja veesamba omadustele.

Stratifitseeritud perioodil esinevad veesamba parameetrites arvestatavad vertikaalsed gradiendid. Alumine kiht on stratifitseeritud perioodil külmem, soolasem, toitainete rikkam ja madalama hapnikusisaldusega. Mõõtmisandmed näitavad, et arendusala süvakihis võib esineda sesoonne hüpoksia.

Sõltuvalt hüdrodünaamilistest tingimustest võib tuulepargi alal olla suurem/väiksem osakaal maismaalt pärit veemassil. Püsिमõõtmised näitasid, et vee omadused alal on oluliselt mõjutatud vertikaalse segunemise sündmustest, hüppekihtide basse inimastaapi kalletest ja adveksioonist. Heljumi sisalduse aegread näitasid, et alal võib soodsatel tingimustel heljumi sisalduse kontsentratsioon põhjalähedases kihis ulatuda üle 20 mg/l. Nii kõrged heljumi kontsentratsioonid olid seotud tuulesündmustega, mis tekitasid piisavalt tugevat lainetust, et põhjustada resuspensiooni. Ka tugevatel põhjalähedastel hoovustel võis heljumi sisalduse tõusu sündmustes roll olla. Uurimislaevalt tehtud profiilid ja allveeliuguri mõõdistused näitasid, et põhjalähedases kihis on kõrgem hägusus sagedane.

Registreerisime arendusalal korduvalt olulise laine kõrguse üle 3 m. Teaduskirjanduse ja tuulestatistika põhjal võib eeldada, et alal võib esineda veelgi kõrgemaid laineid.

Sügistalvisel perioodil esinesid barotroopsed (ühekihilised) hoovused, mis olid seotud tuule otsese ja kaudse mõjuga. Hoovuse keskmine kiirus oli sügistalvisel perioodil 4-5 cm/s, maksimaalne tunni keskmine hoovuskiirus oli 14 cm/s. Suvisel-sügisesel perioodil mõõdetud hoovused olid kihistunud kuni oktoobri keskpaigani, mil veesammas segati tugevate tuule sündmustega läbi. Hoovuse keskmine kiirus oli siis vahemikus 5-8 cm/s ja maksimaalne tunni keskmine hoovuskiirus oli 26 cm/s. Ala jääkatte periood ja keskmine jää paksus on viimastel kümnenditel kahenenud, kuid endiselt esineb alal külmematel talvedel jääkate.

Mõju

Numbriliste simulatsioonide abil hindasime tuulepargi esialgse ja täiendava ala mõju hüdrodünaamikale ning veesamba karakteristikutele. Liivi lahe mastaapi tsirkulatsiooni, lainetust, soolsuse välju, stratifikatsiooni ja biogeokeemilisi välju tuulepargi rajamine ei muuda.

Tuulepargi alal vähenevad kuu keskmised hoovuskiirused kuni 2,5 cm/s. Tuulepargi naaberaladel võivad hoovuskiirused ka kasvada. Mõju on suurem sügisel ja talvel ning jääb tagasihoidlikumaks suvel.

Mõju lainetusele sõltub tuule kiirusest ja suunast. Soodsate tuultega võib laine kõrgus väheneda 5 cm, kohati 10 cm. Mõju pikaajalisele keskmisele laine kõrgusele on oluliselt väiksem. Keskmiselt väheneb laine kõrgus pargi sees kuni 3%.

Veidi väheneb tuulepargi alal soolsus, mis on tõenäoliselt tingitud pinnakihi hoovuste, st. advektatsiooni mõjutamisest. Vähenemise taga võib olla ka vertikaalse segunemise mõjutamine. Võrreldes loodusliku varieeruvusega on tuulepargi poolt põhjustatud soolsuse vähenemise suurusjärg (0,05 g/kg) ca 20-30 korda väiksem. Võib öelda, et võrreldes Liivi lahe üldiste horisontaalsete gradientide ja ajaliste käikudega on muutused olulisemates toitainetes (fosfaadid, nitraadid) ja üldainetes (üldfosfor, üldlämmastik) tagasihoidlikud.

Pikemaajalise mõju puhul veesambale on oluline roll hoovuste ja vertikaalse segunemise mõjutamisel. Ühest küljest suurendavad tuulikute veealused konstruktsioonid vertikaalset segunemist, teisalt põhjustab tuule kiiruse vähenemine vertikaalse segunemise langust. Ei ole saajaprotsendiliselt selge, kumb vastastikku mõjuvast tegurist on tugevama mõjuga. Antud küsimusega on viimastel aastatel teaduslikult tegeletud ja on saadud mitmesuguseid tulemusi. Leidub uuringuid, mis näitavad vertikaalse segunemise suurenemist, kuid leidub ka teadustöid, mis näitavad vastupidist mõju. Antud töö raames tehtud simulatsiooni tulemused viitavad, et vertikaalne segunemine pigem väheneb. Tuleb märkida, et varasemate teadustööde puhul on enamasti olnud uurimispiirkonnaks Põhjameri, kus erinevalt Liivi lahest on kineetilises energias oluline roll tõusu-mõõnaga seotud hoovustel ja hüdrodünaamiline aktiivsus tervikuna on meie piirkonnast kõrgem. Liivi lahe veesambas kineetilise energia genereerimisel seevastu on suhteliselt olulisem roll lokaalsel tuulel. Seega võib eeldada, et meie piirkonnas on tuule vähendamisel suhteliselt suurem mõju hoovustele ja vertikaalsele segunemisele võrreldes näiteks Põhjameriga.

Simulatsiooni tulemused viitavad, et mõnevõrra võib kevadel ja suvel väheneda ülemise segunenud kihi paksus. Potentsiaalselt võib segunenud kihi paksuse vähenemine tuulepargi alal tuua kaasa veidi varasema ja intensiivsema kevadõitsengu. Viimasele viitavad biogeokeemilise modelleerimisega saadud kõrgemad klorofüllü väärtused varakevadel. Suve lõpus, sügisel võib aset leida hapnikupuuduse süvenemine. Mõjus esineb aastatevaheline muutlikkus, st. arvestatavat mõju ei kaasne simulatsiooni põhjal mitte igal aastal. Soodsatel tingimustel võib hapniku sisaldus langeda üle 0,5 ml/l. Võrreldes loodusliku varieeruvusega ei ole see suur vähenemine, kuid see leiab aset kõige ebasobivamal sesoonil. Nimelt esineb just suve lõpus ja sügisel Liivi lahe süvakihtides hüpoksia, kusjuures hüpoksilised tingimused tuvastati mõõtmiste käigus ka tuulepargi alal.

Simulatsioonide määramatus ei võimalda kõrge usaldusväärsusega väita, et kirjeldatud muutused ülemise kihi produktsioonis ja põhjalähedase kihi hapniku tingimustes kindlasti aset leiavad, aga potentsiaal sellisteks muutusteks on olemas.

Heljumi leviku simulatsioonid näitavad, et heljum püsib kauem veesambas ja levib kaugemale sügis-talvisel perioodil. Kevad-suvisel perioodil settib heljum kiiremini ja levikuulatus on väiksem. Suvisel perioodil on üks ööpäev peale tööde käigus heljumi veesambasse paiskumist enamus sellest hajunud ja kontsentratsioonid enamasti alla 5 mg/l. Pessimistlikuima stsenaariumi järgi, soodsatel tingimustel, võib arvestavas koguses heljumit (kontsentratsioon 5 mg/l) levida suurusjärgus 10 km kaugusele algallikast. Enamasti jääb levik siiski lokaalsemaks. Ei ole alust arvata, et arvestatavas koguses heljumit jõuaks rannikule, v.a. eksportkaablite paigaldustööde puhul. Kavandatud heljumit tekitavatest töödest (vundamentide ettevalmistus, pargisisesed kaablid, eksportkaablitrass) võib heljum levida kõige kaugemale eksportkaablite paigaldusel.

Kaadamise tõttu leiab aset arvestatav heljumi sisalduse tõus ja vee läbipaistvuse vähenemine. Kui kaadatakse otse tuulikute kõrvale, on mõju ruumis hajutatud, kuid heljumiga mõjutatud mereala on suurem. Kui kaadatakse kahele kaadamisalale, on mõjuala väiksem, kuid see on tugevalt kontsentreeritud kahele alale. Kui kaadamist teha nt. iga kolme päeva tagant, siis on tööde perioodist (16 kuud) ca 1/6 ajast veesambas kõrgenenud heljumi kontsentratsioonid ja vähenenud vee läbipaistvus.

Loodusliku settimiskoormust ületatakse tuulikute juurde kaadates (kaadamise 1. alternatiiv) suuremal alal kui kaht kaadamisala kasutades (kaadamise 2. alternatiiv). Samas intensiivse settimise piirkond on kaadamise 2. alternatiivi puhul suurem. 2. alternatiivi puhul mõjutatakse

vähem madalaid alasid ning settimine looduskaitseliste aladele on ebaoluline. 1. alternatiivi puhul võib heljum soodsatel tingimustel jõuda ja settida ka looduskaitseliste aladele. Seda mõju on võimalik piirata (vt. leevendavad meetmed ja seire alalõiku). Kaadamiskoha valikul tuleks arvestada elustiku (põhjaelustik, kalastik, linnustik) eripärasid. Võimalus on mõju hajutada suuremale ja madalamale alale. Alternatiivina saab mõjutada merd väiksemal alal ja sügavamas piirkonnas, aga intensiivsemalt.

Reostuse leviku hindamiseks hinnati osakeste levikut valitud tuulikute asukohtadest. Osakeste levik algasukohast oli kaugem sügis-talvisel perioodil ja lokaalseim kevadel. Osakeste levik rannikule ja hoiualadele oli tunduvalt kiirem ja tõenäosem esialgselt alalt. Kihnu rannikule võib soodsatel tingimustel osakene jõuda vähem kui ööpäevaga, mandri rannikule jõudmine võtaks aega vähemalt kaks ööpäeva. Täiendusalt kuluks mandri rannikule levikuks ligi kolm ööpäeva. Kihnu jõuaks soodsatel tingimustel reostus täiendusalt kohale kahe ööpäevaga.

Leevendavad meetmed ja seire

Heljumi levikuga seotud mõjusid on võimalik leevendada, kui tööde tegemist piirata ebasoodsates oludes. Ebasoodsaks oluks võib olla teatud tuule poolt tekitatud hüdrodünaamiline olukord, mis soodustab heljumi kandumist tundlikele aladele.

Alternatiivina on võimalik tundliku ala lähistel teostada operatiivset seiret. Kuna heljumi sisaldusel on ka arvestatav looduslik varieeruvus, siis tuleks seiret teostada vähemalt kahes asukohas: tundliku ala lähistel ning analoogsel (sügavus, settetüüp) alal lähipiirkonnas, tööde eeldatavast mõjupiirkonnast väljaspool. Operatiivseire abil on võimalik suurema heljumi koguse kandumist ja settimist tundlikule alale vältida. Täiendavalt võib kasutada ka operatiivset modelleerimist.

Mõlema eeltoodud meetme (tööde piiramine, operatiivne seire) detailne välja töötamine tuleks teha koostöös vee kvaliteedi, põhjaelustiku ja kalastiku ekspertidega.

Simulatsiooni tulemused viitavad, et tuulepargi piirkonnas vähenevad hoovuskiirused ning mõjutatud on veesamba karakteristikud. Soovitame teostada täiendavaid mõõtmisi tuulepargi mõjude täpsemaks kvantifitseerimiseks ja edaspidiste arenduste, sh. kumulatiivsete mõjude, hindamiseks ja planeerimiseks:

- teha ühe aasta jooksul enne tuulepargi ehitust ning ühe aasta jooksul peale tuulepargi tööle asumist hoovusmõõtmised.

- teha klorofüll a , temperatuuri ja soolsuse mõõtmisi ülemises kihis jää lahkumisest sügiseni ühel aastal enne tuulepargi tööle asumist ning samasugune mõõtmine peale tuulepargi tööle asumist.
- teha hapniku, temperatuuri ja soolsuse mõõtmised põhjalähedases kihis maist oktoobrini ühel aastal enne tuulepargi tööle asumist ning samasugune mõõtmine tuulepargi mõõtmise ajal.

Kõik mõõtmised (hoovus, klorofüll a , temperatuur, soolsus) tuleks teha kahes asukohas, üks tuulepargi sees (jaamas KW või selle lähistel) ning teine sarnastes tingimustes (sügavus, avatus, kaugus rannikust), kuid tuulepargi alalt ja võimalikust mõjupiirkonnast eemal.

Sisukord

Kokkuvõte	2
1. Sissejuhatus	9
2. Metoodika.....	11
2.1. Mõõtmised uurimislaevalt.....	11
2.2. Mõõtmised poiijaamades.....	13
2.3. Mõõtmised liuguriga	17
2.4. Veesamba füüsikaliste omaduste modelleerimine	21
2.5. Veesamba biogeokeemiliste omaduste modelleerimine	23
2.6. Heljumi leviku modelleerimine.....	24
2.6.1. Tuulikute vundamentide ja kaablite paigaldusel tekkiva heljumi levik.....	24
2.6.2. Kaadamisel tekkiva heljumi levik.....	26
2.7. Reostuse leviku modelleerimine	27
2.8. Lainetuse modelleerimine	29
3. Mõõtmistulemused ja taustainfo	31
3.1. Mõõtmised uurimislaevalt.....	31

3.2. Mõõtmised poijaamades.....	40
3.2.1. Hoovused	40
3.2.2. Lainetus.....	54
3.2.3. Veesamba parameetrid.....	58
3.3. Liuguri mõõtmised	68
3.4. Piirkonna jääolude kirjeldus.....	72
3.4.1. Kasutatud andmed	72
3.4.2. Jääolude iseloomustus 1993-2021 mudelandmete põhjal	73
3.4.3. Jääolude iseloomustus Läänemere jääteenistuse andmete põhjal	78
4. Mõju analüüs	81
4.1. Hoovused.....	81
4.1.1. Esialgne ala	81
4.1.2. Esialgne ala ja täiendusala.....	88
4.2. Lainetus	91
4.3. Veesamba füüsikalised omadused.....	101
4.3.1. Esialgne ala	102
4.3.2. Esialgne ala ja täiendusala.....	109
4.4. Veesamba biogeokeemilised omadused.....	111
4.4.1. Esialgne ala	111
4.4.2. Esialgne ala ja täiendusala.....	118
4.5. Heljumi levik.....	123
4.5.1. Esialgne ala	123
4.5.2. Täiendusala.....	135
4.5.3. Eksportkaablid.....	144
4.5.4 Kaadamine	150
4.6. Õlireostuse levik.....	165
4.6.1. Esialgne ja täiendusala	165

4.6.2. Õlireostuse stsenaariumid	169
4.7. Mõju jääoludele.....	172
Kasutatud kirjandus.....	174

1. Sissejuhatus

Käesolev töö on koostatud Saare-Liivi meretuulepargi KMH raames. Tegemist on lõpparuandega. Käsitletakse hüdrodünaamikat (hoovused, lainetus), veesamba füüsilisi ja biogeokeemilisi näitajad; arendustegevusega seotud heljumi levikut ja teoreetilise reostuse levikut.

Töös on esitatud täiendatud välitööde andmestik ja analüüs ning mõju analüüs. Kirjeldatud on mõõtmiste ja simulatsioonide metoodika. Töös on käsitletud kahte tuulepargi arendusala: esialgne ala ja täiendav ala.

Liivi laht on sesoonselt stratifitseeritud, poolsuletud Läänemere alambassein, mis on Läänemere avaosast eraldatud madalate väinadega.

Tugevamate hoovustega piirkonnad on Irbe ja Suur väin (Lilover et al., 1998; Otsmann et al., 2001; Talpsepp, 2005). Võrreldes avamerega esinevad tugevamad hoovused ka piki rannikut (Lips et al., 2016a). Hoovuste ajalis-ruumiline muutlikkus on paljuski seotud tuuletingimustega.

Lainetuse ajalis-ruumiline muutlikkus sõltub otseselt tuule kiirusest ja suunast. Ekstreemsetes tormides võib oluline laine kõrgus ulatuda üle 5 m (Tuomi et al., 2010).

Madalad väinad takistavad Läänemere avaosas süvakihi veemassi levikut Liivi lahte ja nii ei ole siin püsivat stratifikatsiooni. See morfoloogiline eripära paneb paljuski paika Liivi lahe veesamba karakteristikud ja hüdrodünaamika. Liivi lahe vee bilansis on peale väinades toimuva veevahetuse oluline roll jõgedel ning vool atmosfääriga.

Liivi lahe veesammas seguneb talviti põhjani. Kevadel tekib esmane nõrk stratifikatsioon magedama pindmise vee levikul (Stipa et al., 1999). Suveks panustab stratifikatsiooni ehk tiheduse vertikaalsesse gradienti enam ülemise ja põhjalähedase kihi temperatuuri erinevus, soolsuse osakaal on väiksem. Tiheduse gradient määrab ära ka veesamba ülejäänud karakteristikud. Suvel on mere pindmine veemass soe, magedam, toitainetevaene. Süvakiht on jahedam, veidi kõrgema soolsuse ja toitainete kontsentratsiooniga ning hapnikuvaesem. Mitmesuguste protsesside (näiteks jõevee levik, läbi väinade tulevate läätsede levik süvaveekeerked) tõttu esineb lahes väiksemamastaabilist ruumilist muutlikkust, mis on näha ka vee karakteristikutes (Liblik et al., 2017; Lips et al., 2016b). Kuigi Liivi lahes ei esine

permanentset hapnikupuudust, tekib hapnikupuudujääk alates kevadest ning sügiseks langeb lahe süvakihis hapniku kontsentratsioon hüpoksia tasemeni (Liblik et al., 2023).

Head merekeskkonna seisundit Liivi lahes saavutatud ei ole, sh. eutrofeerumist kirjeldavate parameetrite põhjal (HELCOM, 2023). Endiselt on probleemiks toitainete liigne sissekanne valgaalalt, kuid olulist rolli mängib ka settest eralduv fosfor (Savchuk, 2002), mis on intensiivsem just hapnikuvaestes tingimustes (Aigars et al., 2015; Stoicescu et al., 2022).

Tuulepargil on potentsiaalne mõju hüdrodünaamilistele tingimustele ning veesamba omadustele. Ehitusaegne mõju on seotud peamiselt heljumi tekkega sette liigutamisel vundamentide ja kaablite paigaldusel. Kasutusaegne mõju on seotud tuulikute veealuste konstruktsioonidega ning muutustega tuuleoludes.

Töö teostasid Anne Aan, Victor Alari, Fred Buschmann, Villu Kikas, Madis-Jaak Lilover, Urmas Lips, Risto Reilson, Nelli Rünk, Kai Salm, Oliver Samlas, Enriko Siht, Stella-Theresa Stoicescu, Kaimo Vahter ja Germa Väli. Projekti juht oli Taavi Liblik.

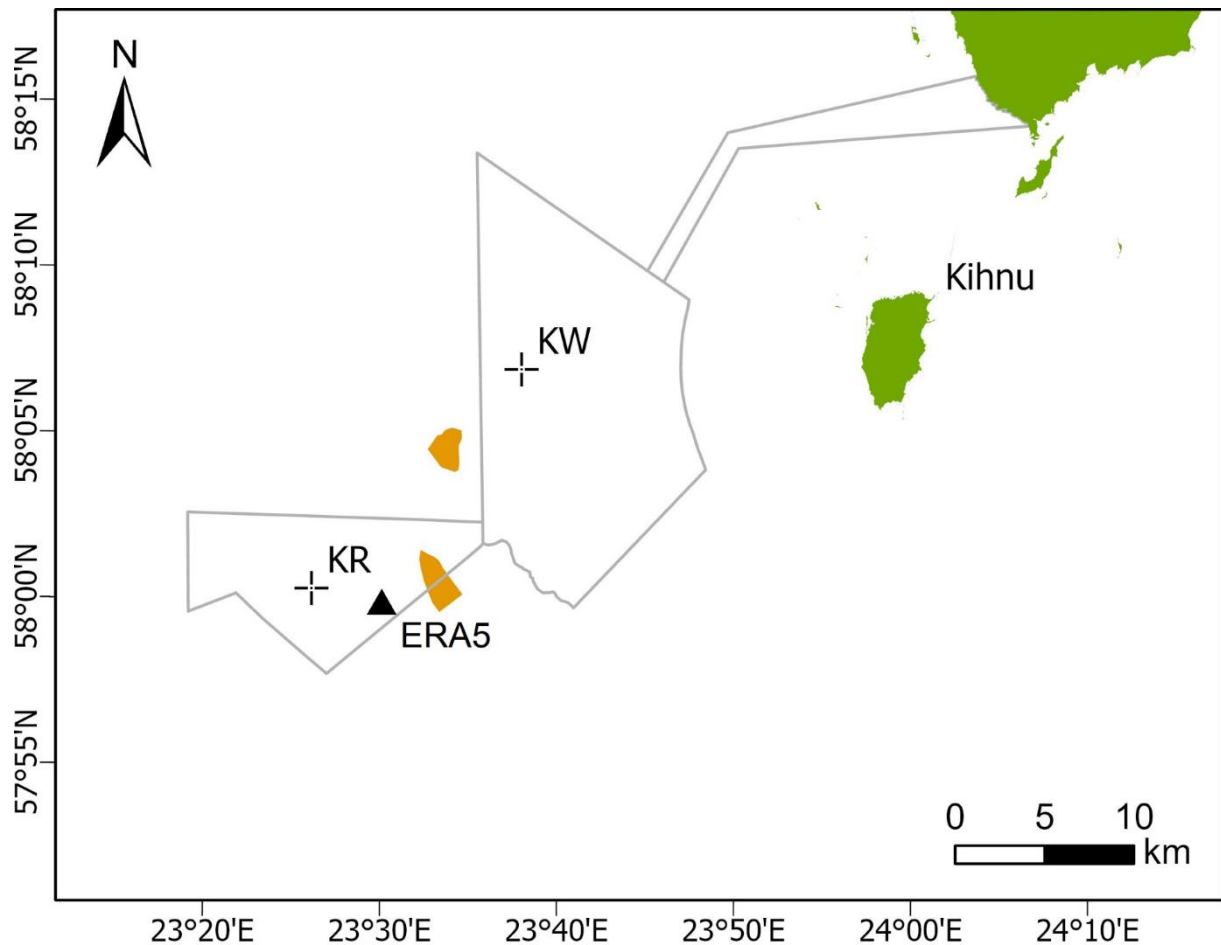
2. Metoodika

2.1. Mõõtmised uurimisolaevalt

Käesolevas uuringus teostati Saare-Liivi meretuulepargi arendusalal veesamba parameetrite (temperatuur, soolsus, lahustunud hapnik, hägusus, klorofüll-a kontsentratsioon ja toitained) profiilide mõõtmised mõlema arendusala (esialgne ala ja täiendav ala) ühes asukohas erinevatel aastaegadel vähemalt viiel korral (joonis 2.1.1).

Selleks määrati meretuulepargi arendusalal kaks mõõdistusjaama – esialgsel alal jaam "KW" (asukoht: 58.11630°N 23.63115°E, keskmine sügavus 29 m) ja täiendaval alal jaam "KR" (asukoht 58.00560°N 23.43360 °E, keskmine sügavus 37 m), mis on esitatud järgneval kaardil (joonis 2.1.1).

Tuule iseloomustamiseks on kasutusel ERA5 Euroopa Keskpika Ilmaennustuskeskuse (ECMWF) reanalüüsi andmestik (Hershbach et al., 2020), mille väljavõttepunkt (koordinaadid: 58.0°N 23.5°E) on esitatud joonisel 2.1.1. ERA5 on reaalse meteoroloogiliste mõõtmiste ja mudelandmete kombinatsioon. ERA5 andmetest kasutati ka mere pinnakihi temperatuuri ning numbrilise mudeli sisendina õhurõhku, pilvisust, õhuniiskust, õhutemperatuuri, tuulekiiruse komponente.



Joonis 2.1.1. Proovivõtujaamad Saare-Liivi meretuulepargi arendusalal – KW (esialgsel alal) ja KR (täiendaval alal). Kolmnurgaga on tähistatud ERA5 andmebaasist tuuleandmete väljavõttepunkt. Oranžid alad tähistavad kaadamisalade alternatiivi 2.

Mõõdistused teostati järgnevatel kuupäevadel (uurimislaevalt “Salme”) - jaamas KW 27.10.2022, 22.01.2023, 13.04.2023, 1.06.2023, 13.07.2023, 25.07.2023, 26.08.2023, 30.10.2023. Jaamas KR 13.04.2023, 1.06.2023, 13.07.2023, 26.08.2023, 31.10.2023.

Vertikaalprofiilid mõõdeti mõõtesondidega Idronaut Ocean Seven 320 Plus WOCE-CTD ja SeaBird 19 Plus V2 SeaCAT Profiler.

Samuti mõõdeti Secchi kettaga vee läbipaistvust ja koguti erinevatelt sügavustelt veeproove toitainete sisalduse määramiseks. Lisaks võeti veeproove ka mõõtesondide kalibreerimiseks (lahustunud hapnik, klorofüll-*a* ja hõljuvaine kontsentratsioon).

Et saada kogu Liivi lahe veemasside jaotustest üldisemat ruumilist pilti, on aruandes täiendavalt esitatud ka uurimislaeval paikneva läbivoolusüsteemiga 2,5 m sügavuselt mõõdetud temperatuuri ja soolsuse ruumilised jaotused.

Sondi poolt optiliselt mõõdetud hägususe väärtuste teisendamiseks heljumi kontsentratsiooniks leiti regressiooniseos samaaegselt kogutud veeproovidest määratud heljumi kontsentratsiooni ja hägususe vahel. Veeproovidest hõljuvaine kontsentratsioon määrati kuivkaalu meetodil, kus veeproov filtreeriti läbi eelnevalt kaalutud tselluloosi filtri (Millipore membraanfilter poorisuurusega 0.45 µm) ja hiljem kuivatati ning kaaluti uuesti.

Sarnaselt hägususe väärtuste kalibreerimisele teisendati sondiga registreeritud optilised klorofüll-*a* fluorestsentsi väärtused klorofüll-*a* kontsentratsiooniks kasutades veeproovidest laboratoorse analüsaatoriga (Thermo Helios γ) määratud klorofüll-*a* kontsentratsiooni ja fluorestsentsi regressiooniseost.

Kontrollimise ja kalibreerimise eesmärgil määrati veeproovidest ka lahustunud hapniku sisaldus hapnikumõõtjaga MU 6100 L (VWR).

Vee keemilistest parameetritest analüüsiti kõigis kogutud proovides lahustunud toitainete – nitritite ja nitraatide (NO₂+NO₃), ammooniumi (NH₄), fosfaatide (PO₄) ja räni (Si) – sisaldused ning üldlämmastiku (N_{tot}) ja üldfosfori (P_{tot}) sisaldused. Proovid koguti mõlemast proovivõtupunktist integreerituna ülemisest kihist (1m, 5m, 10m) ja põhjalähedasest kihist.

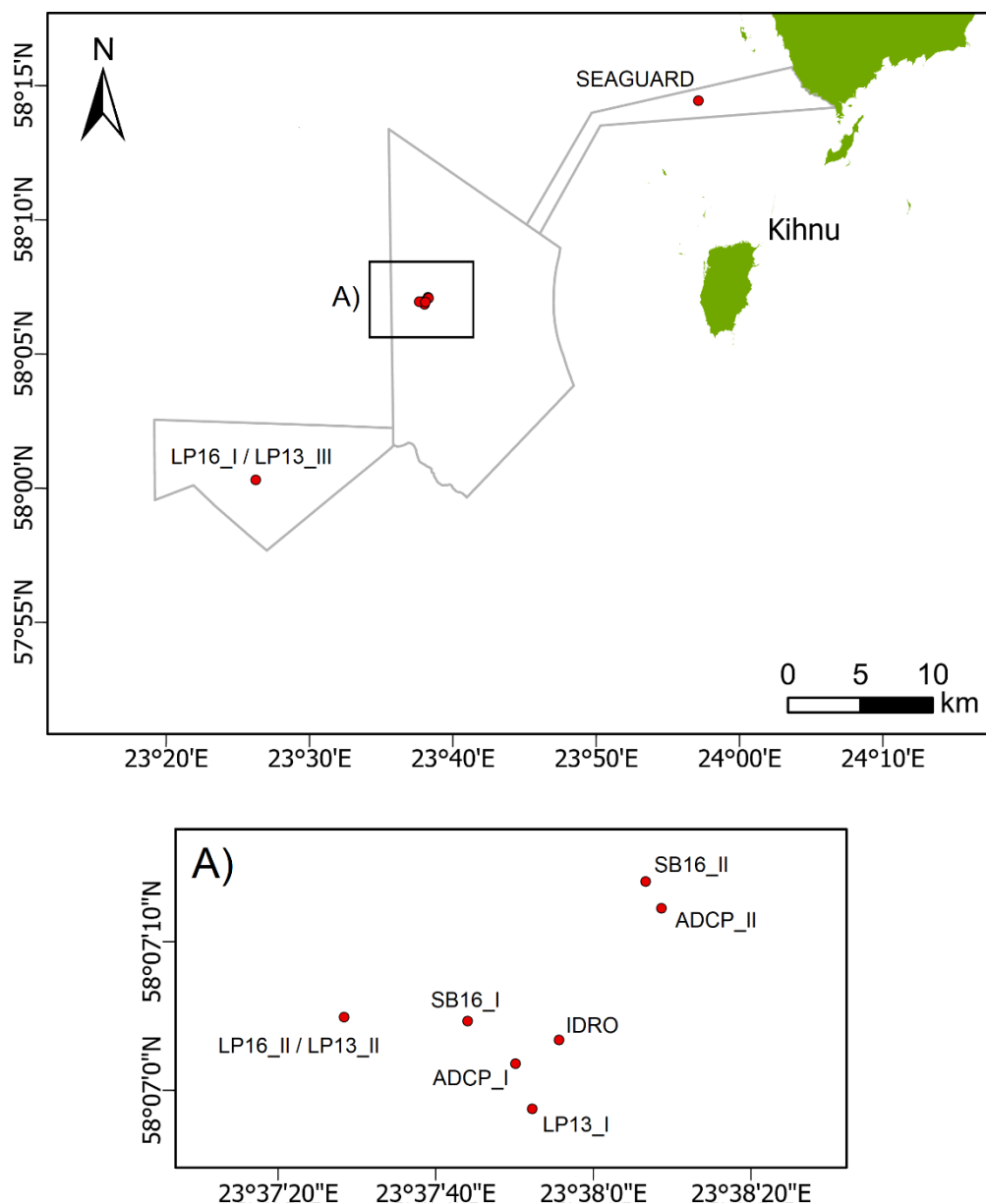
Üldlämmastiku, fosfaatide ja nitritite-nitraatide analüüsimiseks kasutati segmentvoolu analüsaatorit SEAL AutoAnalyzer 500. Analüüsid teostati TalTech meresüsteemide instituudi akrediteeritud laboris vastavalt kehtivatele rahvusvahelistele standarditele.

2.2. Mõõtmised poiijaamades

Pidevmõõtmised toimusid Saare-Liivi meretuulepargi arendusalal paikneva jaama KW lähistel (sügavus 28-29 meetrit), tuulepargi täiendaval alal jaamas KR (sügavus 35-39 meetrit) ja kaablikoridoris (sügavus 10 meetrit).

Jaama KW vahetusse lähedusse oli paigaldatud järgnevad seadmed - lainepoi „Lainepoiss“, Wiseparker OÜ (joonis 2.2.1, LP13 ja LP16); akustiline hoovusmõõtja RDI Workhorse Sentinel ADCP 307.2 kHz (joonis 2.2.1, ADCP); mere füüsikalisi parameetreid mõõtev CTD

mõõtesond SBE 16 Plus V2 SeaCAT CTD (joonis 2.2.1, SB16) ja profileeriv pinnapoi "Idronaut" sondiga Ocean Seven 316 Plus CTD (joonis 2.2.1, IDRO). Jaama KR läheduses paiknes seade - lainepoi „Lainepoiss“, Wiseparker OÜ (joonis 2.2.1, LP13 ja LP16). Kaablikoridoride uuringualal paiknes hoovusmõõtja Aanderaa SeaGuard II DCP 600 kHz (joonis 2.2.1, SEAGUARD).



Joonis 2.2.1. Püsिमõõtejaamade kaart (ülemine). Alumisel joonisel (A) on Saare-Liivi meretuulepargi esialgsel alal jaama KW läheduses paiknevate seadmete (tabel 1) lähivaade. Rooma number tähise lõpus viitab mõõdistusperioodile (tabel 1 – „Mõõtmisperiood“).

Tabelis 1 on esitatud poiijaamades paiknenud seadmed, koordinaadid, sügavused ja mõõdistusperioodid.

Tabel 1. Pidevmõõtmiste asukohad ja perioodid.

Mõõteseade	Lühend kaardil	Jaama nimi	Asukoht kraadides (põhjalaius, idapikkus)		Keskmine sügavus	Andurite paiknemine	Mõõtmisperiood
SBE 16 Plus V2 SeaCAT CTD	SB16_I	KW	58,117967	23,628853	30 m	2,0 m põhjast	27.10.22 - 22.01.23
	SB16_II	KW	58,120595	23,635107	27,7 m		25.07.23 - 30.10.23
RDI Workhorse Sentinel ADCP 307.2 kHz	ADCP_I	KW	58,117175	23,630547	30 m	0,5 m põhjast	27.10.22 - 22.01.23
	ADCP_II	KW	58,120098	23,635663	27,5 m		25.07.23 - 30.10.23
Aanderaa SeaGuard II DCP 600 kHz	SEA-GUARD		58,243573	23,954450	10 m	1,0 m põhjast	17.05.24 - 26.08.24
Lainepoiss nr 13	LP13_I	KW	58,116332	23,631147	29 m	merepinnal	27.10.22 – 07.01.23 (tekkis tõrge)
	LP13_II	KW	58,118030	23,624510	30 m		22.01.23 (poi välja)
	LP13_III	KR	58,006510	23,435080	38 m		13.04.23 - 10.09.23
Lainepoiss nr 16	LP16_I	KR	58,006510	23,435080	38 m	merepinnal	10.09.23 - ...
	LP16_II	KW	58,118030	23,624510	30 m		13.04.23 - 10.09.23
Profileeriv poi "Idronaut" sondiga OS316 Plus	IDRO	KW	58,117628	23,632083	29,5 m	profiil pinnalt põhjani	25.07.23 - 14.08.23 (tekkis tõrge) 10.09.23 (poi välja)

Lainepoid Lainepoiss nr 13 ja nr 16 (joonis 2.2.2, a) kasutavad laine kõrguse ja suuna leidmiseks 3-suunalist kiirendusandurit, güroskoopi ja kompassi.

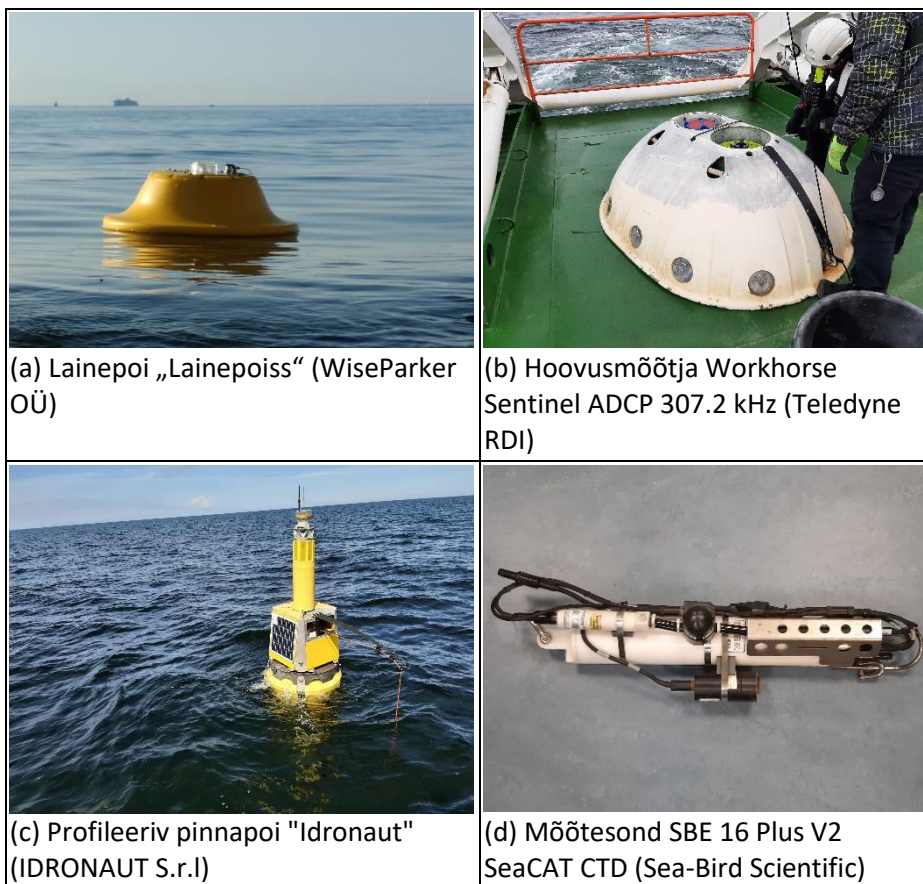
Hoovusmõõtja RDI Workhorse Sentinel ADCP 307.2 kHz (joonis 2.2.2, b) on akustiline Doppleri efektil põhinev hoovuste profileeriija (ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler), mis on võimeline samaaegselt mõõtma veesamba erinevate kihtide hoovuskiirusi ja suunda. Seade asetati merepõhjale ning see mõõtis kiiruseid vertikaalse sammuga 1 m.

Seadmega SeaGuard II DCP (joonis 2.2.2, e) mõõdeti kaablikoridoris vee hägusust. Seadme andurid paiknesid 1 m kõrgusel merepõhjast.

Mere veesamba parameetreid mõõtev CTD-sond SBE 16 Plus V2 SeaCAT CTD (joonis 2.2.2, d) töötab läbivoolu põhimõttel, kus pumba abil liigutatakse proovivesi anduriteni, mille järgselt toimub vee parameetrite mõõtmine – soolsus (läbi vee elektrijuhtivuse), vee temperatuur, hägusus ning hapnik.

Profileeriv pinnapoi "Idronaut" (joonis 2.2.2, c) keris kindla ajavahemiku tagant CTD mõõtesondi Idronaut Ocean Seven 316 Plus pinnalt põhjani, mõõtes samal ajal erinevaid parameetreid (soolsus, temperatuur, lahustunud hapnik, hägusus, klorofüll-a fluorestsents) ja mere põhja lähedalt uuesti parkimise sügavusele.

Kõik seadmed olid fikseeritud põhja ankrute abil. Lainepoide ning profileerivate pinnapoide mõõtmistulemusi oli võimalik jälgida ja salvestada reaajajas, teistest seadmetest andmete kättesaamiseks tuli need laeva pardale tõsta ja arvutiga ühendada.

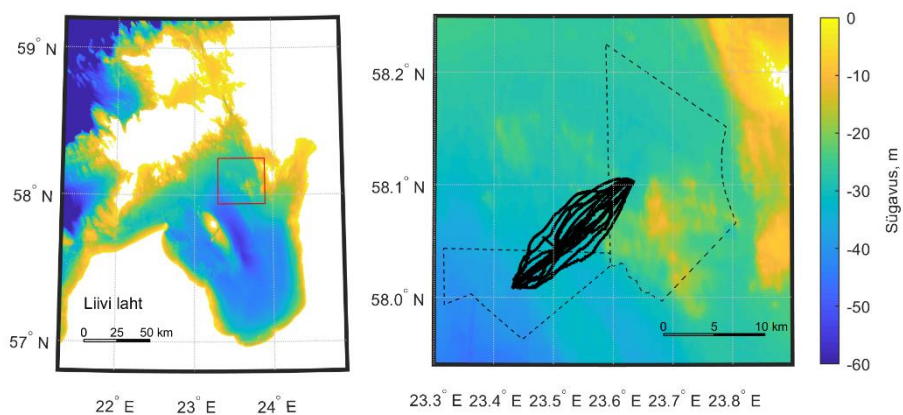




Joonis 2.2.2. Saare-Liivi meretuulepargi arendusalal kasutatud pidevmõõteseadmed.

2.3. Mõõtmised liuguriga

Projekti raames teostati liuguri mõõdistus perioodil 25.07.2023–13.08.2023. Mõõdistuse raames koguti temperatuuri, soolsuse, klorofüll, hägususe ja hapniku andmeid. Sügavus mõõdistuslõike piirkonnas oli umbes 30 m ning mõõdistuslõike asukoht tuulepargi arendusaladel on näha joonisel 2.3.1. Seade läbis 15 km pikkust mõõdistuslõiget 16 korda ja kogus ligi 7000 vertikaalset profiili.



Joonis 2.3.1 Liuguri mõõdistuse trajektoor tuulepargi arendusalade (märgitud kriipsjoonega) suhtes Liivi lahes 2023. aastal. Joonise värviskaalal on mõõdistuspiirkonna sügavus (EMODnet Digital Terrain Model).

Liuguri külge oli kinnitatud CTD-andur (SeaBird, G-1451), hapnikuandur (Aanderaa Data Instrument AS, Oxygen Optode 4330) ning klorofüll a fluorestsentsi ja hägususe andur (Wet Labs, Eco Flntu). Andurite mõõtmisagedus oli 0,5 Hz. Liuguri profiilid koguti seadme sukeldudes ja pinnale tõustes. Enne töötlust on andmetele tehtud esmane kvaliteedikontroll. Töödeldud andmed on keskmistatud konstantse sammuga (0,5 dbar) võrgule.

CTD-andur mõõdab temperatuuri, elektrijuhtivust ja rõhku. Lisaks arvutatakse soolsus ja tihedus. Esmalt on temperatuuri ja elektrijuhtivuse väärtused viidud samale rõhule. Kuna liugur on pidevas liikumises, ei vasta anduri reaktsioonaja tõttu mõõdetud parameetri väärtuse registreeritud asukoht selle väärtuse esinemise tegelikule asukohale veesambas. Reaktsiooniaeg on aeg, mille jooksul andur reageerib muutusele. Tulenevalt registreerib andur mõõdetava parameetri väärtuse viivitusega ning eelkõige tuleb see esile tugevate vertikaalsete gradientide olemasolul.

Anduritel on erinev reaktsiooniaeg. Liuguri temperatuuri ja elektrijuhtivuse anduri puhul on see <2 s. Iga missiooni korral leitakse nende andurite jaoks ajaline parand, mis võimaldab filtreerimise teel viia füüsikalise parameetri väärtus vastavusse rõhuga (Fofonoff and Millard Jr, 1983). Nähtuse likvideerimiseks leiti optimaalsed parandid profiilide võrdluse teel, eeldusel, et nii laskumisel kui ka tõusmisel mõõdetud profiilid peavad olema võimalikult sarnased ehk kaks kõrvuti asetsevat profiili vastavad samale veemasside vertikaalsele jaotusele.

Elektrijuhtivuse andurit mõjutab lisaks reaktsiooniajale ka soojuslik inerts. See tähendab, et liikudes läbi temperatuuri hüppekihi muutub temperatuur keskkonnas kiiremini kui andur seda registreerida jõuab. Seetõttu erineb temperatuur elektrijuhtivuse anduris veesambas mõõdetust. Soolsuse arvutamiseks hinnatakse temperatuuri elektrijuhtivuse anduris. Koefitsientide a ja b abil arvutatakse parand T_T , mis lahutatakse mõõdetud temperatuurist T

$$T_T(n) = -bT_T(n-1) + a[T(n) - T(n-1)]$$

Koefitsiendid on määratud valemiga

$$a = \frac{4f_n\alpha\tau}{1 + 4f_n\tau}$$

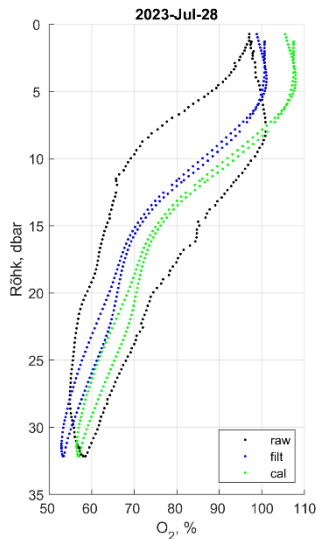
$$b = 1 - \frac{2a}{\alpha}$$

kus f_n on mõõtmisagedus, α temperatuurivea amplituud ja τ ajakonstant (Mensah et al., 2009). Optimaalsed α ja τ on samuti leitud kõrvutiste profiilide võrdluse teel.

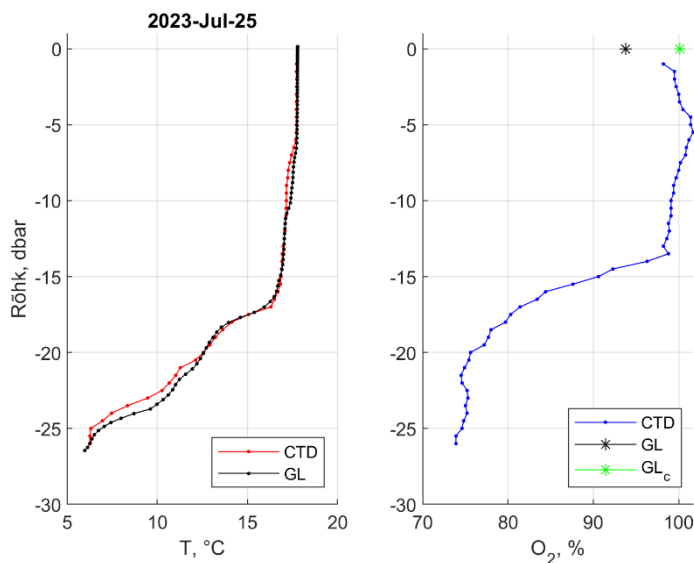
Liuguri hapnikuandur väljastab toorandmetena hapniku küllastusprotsendi, mis on arvutatud mõõdetud optilise signaali faasinihke ja temperatuuri põhjal. Hapnikuanduril on enda temperatuuriandur, kuid erinevate reaktsiooniaegade tõttu ei ole väljastatud küllastusprotsent täpne. Faasinihe, mis sõltub lahustunud hapniku kontsentratsioonist, registreeritakse <30 s ning temperatuur <15 s viivitusega. Seetõttu on küllastusprotsent tagasiarvutatud faasinihkeks ning hapniku sisaldus on leitud kasutades täpsemat CTD-anduri temperatuuri.

Erinevalt CTD-andurist ei ole hapnikuanduri reaktsiooniaeg konstantne. CTD-andur on varustatud pumbaga, et veevool läbi anduri oleks ühtlane ning töötingimused stabiilsed. Hapnikuandur mõõdab otse ümbritsevast keskkonnast, mistõttu mõõtmised on sõltuvuses liuguri liikumiskiirusest. Liikumiskiirusest sõltub anduri ette tekkiva piirikihi paksus, läbi mille jõuab hapnik anduri kilele. Omakorda avaldab mõju temperatuur, mõjutades hapniku lahustuvust ja levimist nii piirkihis kui ka anduri kilel (Bittig and Körtzinger, 2017). Reaktsiooniaja mittelineaarsus väljendub enim hüppekihtide läheduses, kus muutused nii voolus kui ka temperatuuris võivad olla järsud. Bittig (2017) on loonud mudeli, mis seob piirikihi paksuse, temperatuuri ja reaktsiooniaja. Nimetatud mudelit on kohendatud vastavalt hapniku anduri keskmisele reaktsiooniajale, mis antud missioonil oli 27 s. Mudeli põhjal on faasiväärtusi korrigeeritud enne küllastusprotsendi uuesti arvutamist. Joonisel 2.3.2 on näide küllastusprotsendi profiilist.

Enne küllastusprotsendi teisendamist hapniku kontsentratsiooniks (mg/l) väärtused kalibreeritakse. Selle jaoks registreeritakse liuguri veeskamisel ja väljavõtmisel täpsema (sh lühem reaktsiooniaeg, kõrgem mõõtmisagedus) CTD-sondiga lahustunud hapniku sisalduse vertikaalsed profiilid. Joonisel 2.3.3 on näidatud vahetult peale liuguri veeskamist uurimislaevalt tehtud temperatuuri ja hapniku profiil ning liuguri mõõdetud hapnik pinnakihis enne ja peale kalibreerimist.



Joonis 2.3.2 Näide hapniku küllastusprotsendist kahest järjestikusest profiilist toorandmete korral (must) ja filtreeritud väärtustest arvatuna (sinine). Rohelisega on näidatud kalibreeritud profiilid.



Joonis 2.3.3. Vahetult peale liuguri veeskamist uurimislaevalt tehtud temperatuuri (punane, vasak paneel) ja hapniku küllastusprotsendi (sinine, parem paneel) profiil. Liuguri mõõdetud väärtused on esitatud vastavalt musta värviga ning kalibreeritud väärtus rohelisega.

Liuguri andmete põhjal on arvatud segunenud pinnakihi paksus. Segunenud pinnakihi sügavus on minimaalne sügavus, kus on täidetud tingimus $\rho_z \geq p_3 + 0,15 \text{ kg m}^{-3}$: p_3 on tihedus 3 dbar sügavusel ja p_z tihedus sügavusel z (Liblik et al., 2020).

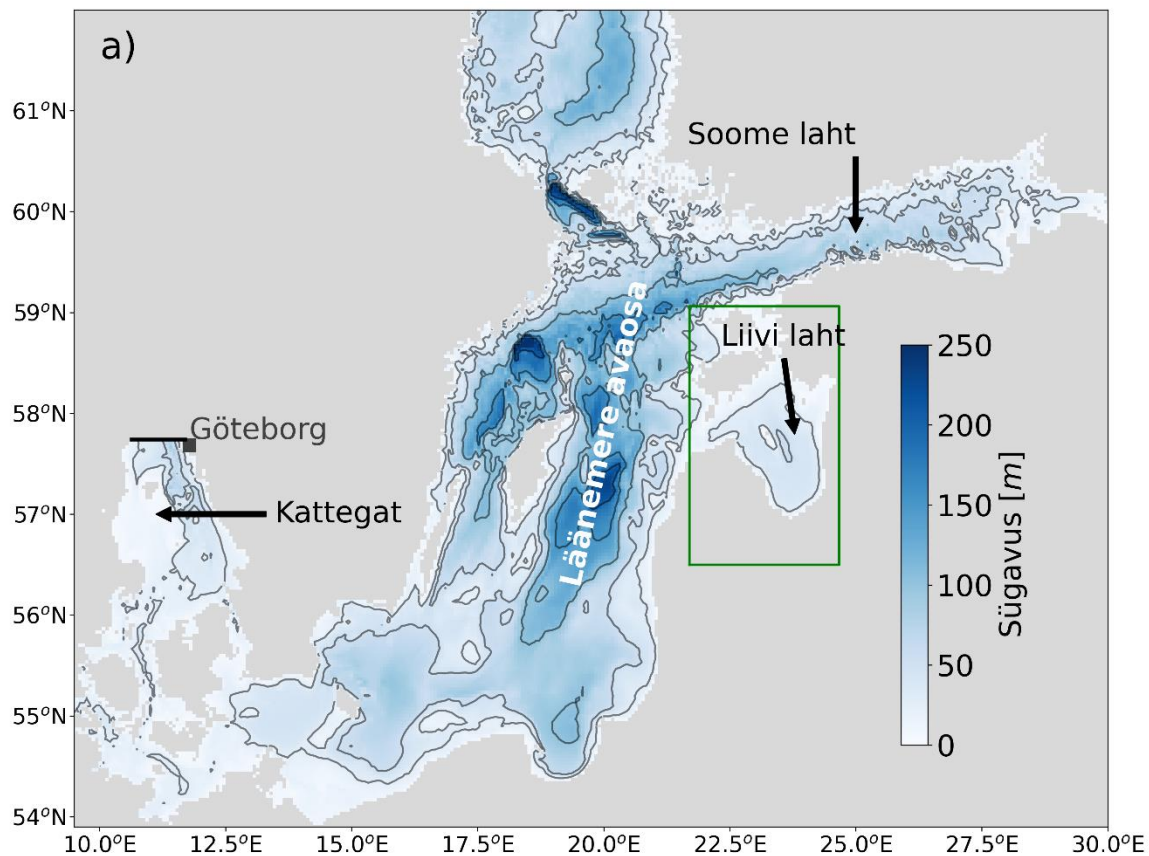
2.4. Veesamba füüsikaliste omaduste modelleerimine

Käesolevas uuringus on Liivi lahe tsirkulatsiooni modelleerimiseks kasutatud kolmemõõtmelist hüdrodünaamika mudelit GETM (*General Estuarine Circulation Model*; Burchard ja Bolding, 2002), mis võimaldab modelleerida nii kiirusvälja kui ka temperatuuri ja soolsuse ajalis-ruumilisi jaotusi. GETM kasutab vertikaalselt fikseeritud arvu kihtisid (sarnaselt sigma-kihtidega mudelitega), kusjuures kihtide paksused on ajas muutuvad ning adaptiivsed sõltudes muu hulgas stratifikatsiooni või kiirusvälja vertikaalsest jaotusest (Hofmeister et al., 2010; Klingbeil et al., 2018).

Horisontaalse segunemise arvutamiseks kasutatakse mudelis Smagorinsky (1963) parametrizeeringut (segunemise tugevus sõltub kiirusvälja horisontaalsetest gradientidest) ning vertikaalse segunemise arvutamiseks kasutatakse GOTM (*General Ocean Turbulence Model*) mudelit. Täpsemalt on arvutustes kasutusel kahel võrrandil põhinev $k-\varepsilon$ mudel (Canuto et al., 2001).

Käesolevas töös on kasutusel seotud võrkude lahendus modelleerimaks Läänemere üldist füüsikalist ning biogeokeemilist seisundit koos resolutsiooni ja täpsuse suurendamisega Liivi lahes.

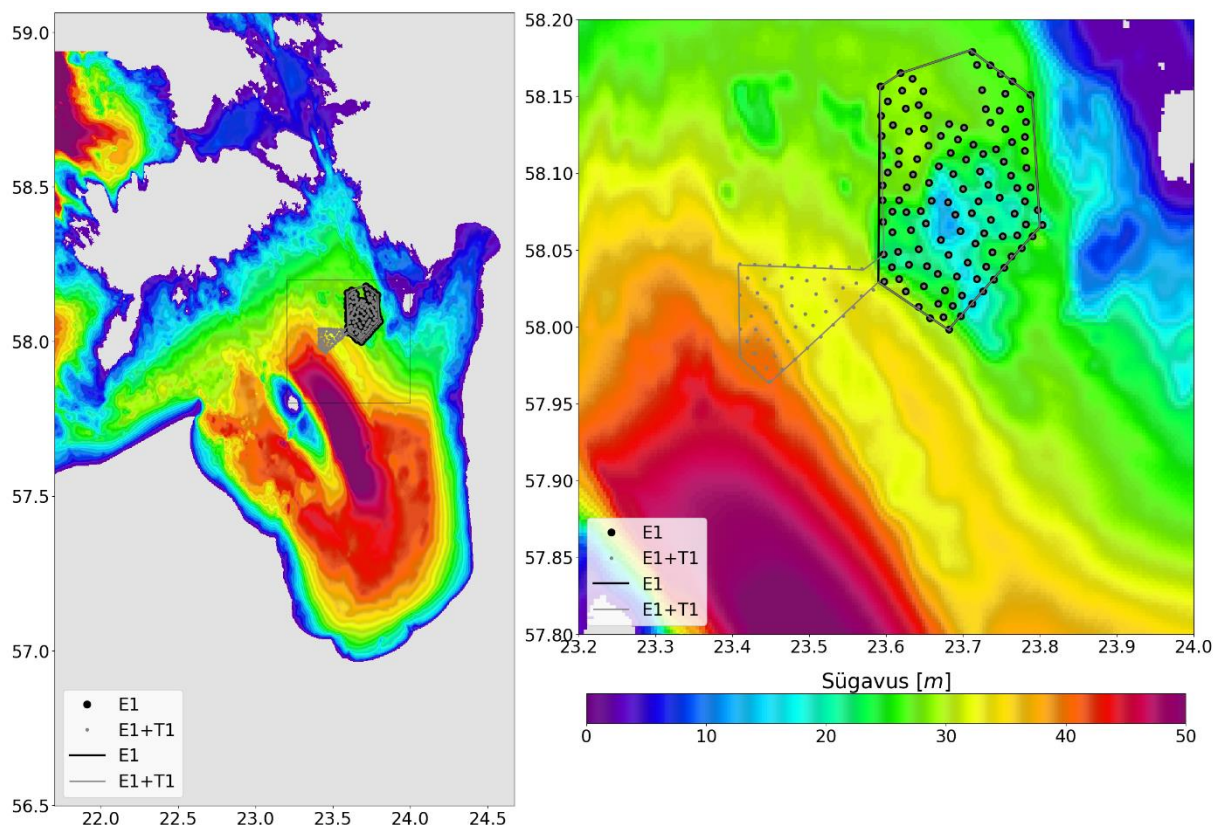
Läänemere üldise füüsikalis-biogeokeemilise seisundi modelleerimiseks kasutatakse horisontaalset võrgusammu 1 meremiil (1852 m) terve Läänemere ulatuses (joonis 2.4.1) ning modelleerimispiirkond lõppeb Kattegatis (Taani väinades), kus on avatud rada, mille kaudu arvutatakse barotroopne veevahetus Põhjamere ja Läänemere vahel. Rajatingimustena kasutatakse veetaseme andmeid Göteborg Torshamnen jaamast koos klimatoloogiliste temperatuuri ja soolsuse profiilidega (Janssen et al., 1999) piki avatud raja transekti.



Joonis 2.4.1 Läänemere seotud arvutusvõrk. Avatud raja asukoht on näidatud musta joonega ning roheline joonega on näidatud Liivi lahe arvutuspiirkond.

Jõgede vooluhulkadena Läänemerre on kasutusel Rootsi Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi reanalüüsi (1979-2011) ja ennustuse (2012-2018) andmete põhjal koostatud andmestik (Väli et al., 2019), mida on pikendatud samadest andmetest hinnatud klimatoloogiliste ridadega kuni aastani 2023.

Liivi lahe tsirkulatsiooni täpsemaks modelleerimiseks kasutatakse horisontaalset lahutust 250 m kogu lahe ulatuses (joonis 2.4.2), kusjuures rajatingimused basseini lääne- ja põhjaossa võetakse eelpool kirjeldatud madala lahutusega mudelarvutustest.

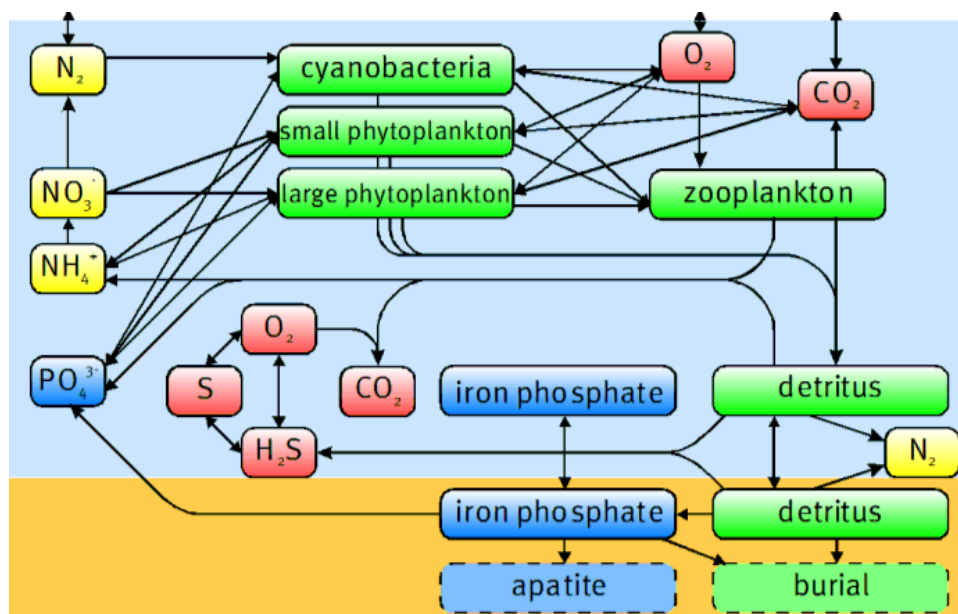


Joonis 2.4.2 Liivi lahe arvutuspiirkond koos tuulikute asukohtadega (vasakul) ning suurendus planeeritud tuulikute piirkonda (paremal). Mustad täpid on tuulikute asukohad esialgsel alal ning hallid täpid täiendalal. Joontega on näidatud mõju hindamiseks kasutatud ruumilise keskmistamise piirkonda.

Käesolevas aruandes esitatud hinnangutes on arvestatud ka tuuliku postide võimaliku mõjuga vertikaalsele segunemisele. Põhjameres teostatud modelleerimistega on näidatud (Christiansen et al., 2023), et hoovuskiiruse 30 cm/s juures, tuuliku vahetus läheduses ca 0,15-0,2 km² alal, võib vertikaalne segunemine ja seda kirjeldav segunemiskoeffitsient suureneja rohkem kui poole võrra. Liivi lahes on antud töö raames mõõdetud hoovuse keskmine kiirus ca 6-7 cm/s, st. ca 4-5 korda väiksem kui mainitud numbrilises eksperimendis Põhjameres ning võib eeldada, et postide mõju on nõrgema hoovuse puhul samuti väiksem. Käesolevas töös on alternatiivide hindamisel postide asukohtades suurendatud vertikaalse segunemisega seotud parameetreid 10%.

2.5. Veeseadme biogeokeemiliste omaduste modelleerimine

Biogeokeemia modelleerimiseks on kasutusel Läänemere Uurimisinstituudi (IOW) poolt loodud ERGOM (Ecological Regional Ocean Model) mudel. ERGOM on lämmastiku ja fosforiringel põhinev ökoloogia mudel, milles on anorgaanilised toitained (NO_3 , NH_4 , PO_4) ning nende tarbijatena 3 erinevat klassi fütoplanktonit - suur fütoplankton, väike fütoplankton ning sinivetikad ehk tsüanobakter. Fütoplanktoni tarbijana on mudelis zooplankton ning surnud orgaanilise aine trasserina detriit, mis laguneb veesambas uuesti anorgaanilisteks toitaimeks Redfieldi suhte järgi ning settib ka põhja. Hapnikutingimuste jälgimiseks on mudelis nii hapnik kui ka vesiniksulfaat H_2S , mis tekib anoksilistes tingimustes. Kokkuvõtvalt on mudelis kasutusel suur hulk biogeokeemilisi trassereid, millele mõjuvad erinevad hüdrodünaamilised protsessid (adveksioon, segunemine) ning mille jaotusi modelleeritakse sarnaselt temperatuuri ja soolsuse jaotustele. ERGOM mudel on paaritatud ehk seotud GETM mudeliga läbi FABM (*Framework for Aquatic Biogeochemical Models*; (Bruggeman and Bolding, 2014)) liidese ning ERGOM mudeli skeem on toodud joonisel 2.5.1.



Joonis 2.5.1. ERGOM mudeli skeem. Allikas www.ergom.net

2.6. Heljumi leviku modelleerimine

2.6.1. Tuulikute vundamentide ja kaablite paigaldusel tekkiva heljumi levik

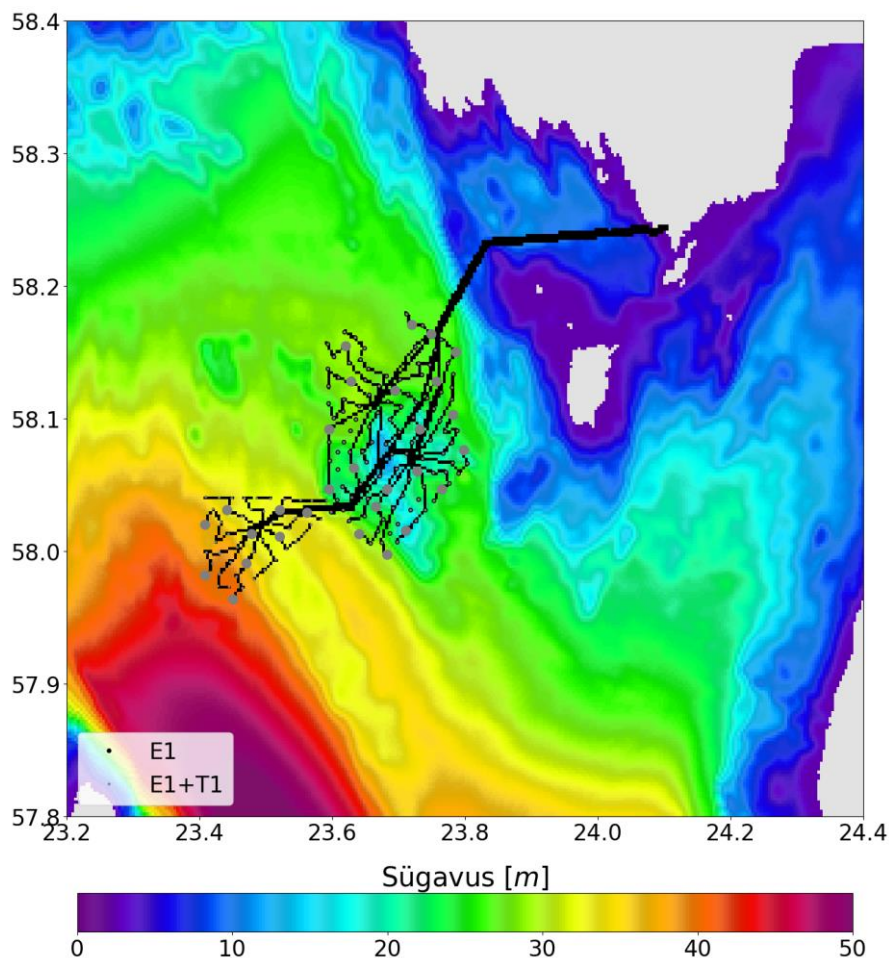
Heljumi leviku modelleerimiseks (joonis 2.6.1) kasutatakse IOW settemodelit läbi FABM liidese sarnaselt biogeokeemia mudeliga ERGOM.

Antud uuringus on simuleeritud kahte tüüpi setted – peeneteraline fraktsioon aleuriit, mille settimiskiirus on 50 m/ööpäevas ning peeneteraline liiv, mille settimiskiirus on 200 m/ööpäevas. Teiste settetüüpide (liiv, kruus) settimiskiirused on märgatavalt suuremad ehk nende levik on lokaalne. Tuulikute vundamentide ettevalmistusest ja kaablite paigaldusest tekkiva heljumi leviku arvutused on teostatud kahes erinevas olukorras – stratifitseeritud olekus ehk suvistes tingimustes ning läbisegunenud olukorras ehk talvistes tingimustes. Modelleerimisperioodidena kasutati 2018/2019 aasta talvekuid (DJF) ja 2019. aasta suvekuid (JJA), sest nende perioodide tuulekiiruse ja –suuna jaotused olid lähedal klimatoloogilistele tingimustele. Modelleerimisperioodi valikul on arvestatud, et esindatud saaks erinevate hüdrodünaamiliste olukordade kogum, milledest on võimalik teha leviku statistikat. Varasemad uuringud ja ka käesolevas töös tehtud mõõtmisandmed on näidanud, et Liivi lahe meresüsteemi, sh. hoovustes on oluline roll stratifikatsioonil. Seetõttu on valitud kaks perioodi: stratifitseeritud veesambaga ning läbisegunenud olukord.

Heljumi leviku näitamiseks modelleerisime heljumi leviku teket tuulepargi esialgse- ja täiendala äärmistest tuulikutest; lisaks ka mõnest tuuliku asukohast pargi keskel (joonis 2.6.1).

Arvutuste jaoks initsialiseeritakse kogu settematerjal valitud tuulikute või kaablite asukohtadest veesambasse kord ööpäevas ning seejärel vaadeldakse suspendeeritud setete levikut 3, 6, 12, 24 ja 48 tunni järel. Erinevate tuuleoludega arvestamiseks arvutatakse iga päev eraldi kuni 2 ööpäeva (48 h) ning hiljem analüüsitakse keskmistatud väljasid koos erinevate võrgupesade maksimumidega. Viimased annavad võimaliku maksimaalse ulatuse heljumi levikule ning kirjeldavad kõige pessimistlikumat stsenaariumit vaadeldava võrgupesa jaoks.

Arvutuste jaoks on lisaks tehtud kaks eeldust: veesambasse jõuab 10% liigutatavast materjalist (ühes tuuliku punktis eeldatakse 10 000 m³ materjali liigutamist) ning suspendeeritud materjali koostis vaadeldud asukohas vastab ruumis interpoleeritud settelõimise jaotusele. Kaablite korral on arvestatud settekoguse 4 m³ liigutamisega iga meetri kohta, millest suspendeerituks loetakse 0,4 m³.



Joonis 2.6.1: Tuulikute asukohad tuulepargis koos heljumi leviku arvutamiseks kasutatud punktidega (hallid täpid). Mustade joontega on näidatud kaablite asukohad.

2.6.2. Kaadamisel tekkiva heljumi levik

Kaadamisel tekkiva heljumi leviku modelleerimiseks kasutatakse samu tehnilisi vahendeid nagu vundamentide rajamisel ja kaablite paigaldusel tekkiva heljumi leviku puhul (vt. eelmine peatükk). Käsitletakse ainult esialgsel alal läbiviidavate töödega tekkiva materjali kaadamise mõjusid.

Kaadamisega tekkiva heljumi modelleerimine viidi läbi KMH hilisemas faasis, kui tööde ajastus ning ka paigaldatavate tuulikute arv oli täpsustunud. Töid tehakse perioodil märts-oktoober, kahel aastal ning esialgsel alale paigaldatakse 80 tuulikut. Arvutused teostati perioodile märts-oktoober 2021 ja märts-oktoober 2022.

Kaadamise mõju arvutustes käsitleti kahte alternatiivi: 1) materjal kaadatakse tuulikute kõrvale, 2) materjal kaadatakse kahele kaadamisalale (joonis 2.1.1). Arvutustes kasutatakse ühe tuuliku puhul tekkivat maksimaalset settehulka, milleks on $10\,000\text{ m}^3$. Eraldi näidatakse veesambas oleva heljumi kontsentratsiooni ning settinud materjali hulka.

Esimese alternatiivi (materjal kaadatakse tuulikute juurde) ei ole teada, mis järjestuses tuulikuid paigaldatakse. Seetõttu näidatakse veesamba heljumi kontsentratsioonide statistikat valitud tuulikute (tuulepargi servades ja keskel) juures tehtava kaadamise puhul. Arvutuste jaoks initsialiseeritakse kogu settematerjal valitud tuulikute või kaablite asukohtadest veesambasse kord kolme ööpäeva järel ning seejärel vaadeldakse suspendeeritud setete levikut 3, 6, 12, 24 ja 48 tunni järel. Erinevate tuuleoludega arvestamiseks arvutatakse iga kord eraldi kuni 2 ööpäeva (48 h) ning hiljem analüüsitakse keskmistatud väljasid koos erinevate võrgupesade maksimumidega. Viimased annavad võimaliku maksimaalse ulatuse heljumi levikule valitud tuulikute juurest ning kirjeldavad kõige pessimistlikumat stsenaariumit vaadeldava võrgupesa jaoks. Heljumi settimise simuleerimisel on arvestatud kõigi tuulikutega ning on eeldatud, et tööd tehakse ära kahe aasta jooksul perioodil märts-oktoober.

Teise alternatiivi puhul eeldame, et kogu materjal kaadatakse kahele alale võrdses osas kahe aasta jooksul märtsist oktoobrini. Materjali viiakse kaadamisalale iga kolme päeva tagant.

2.7. Reostuse leviku modelleerimine

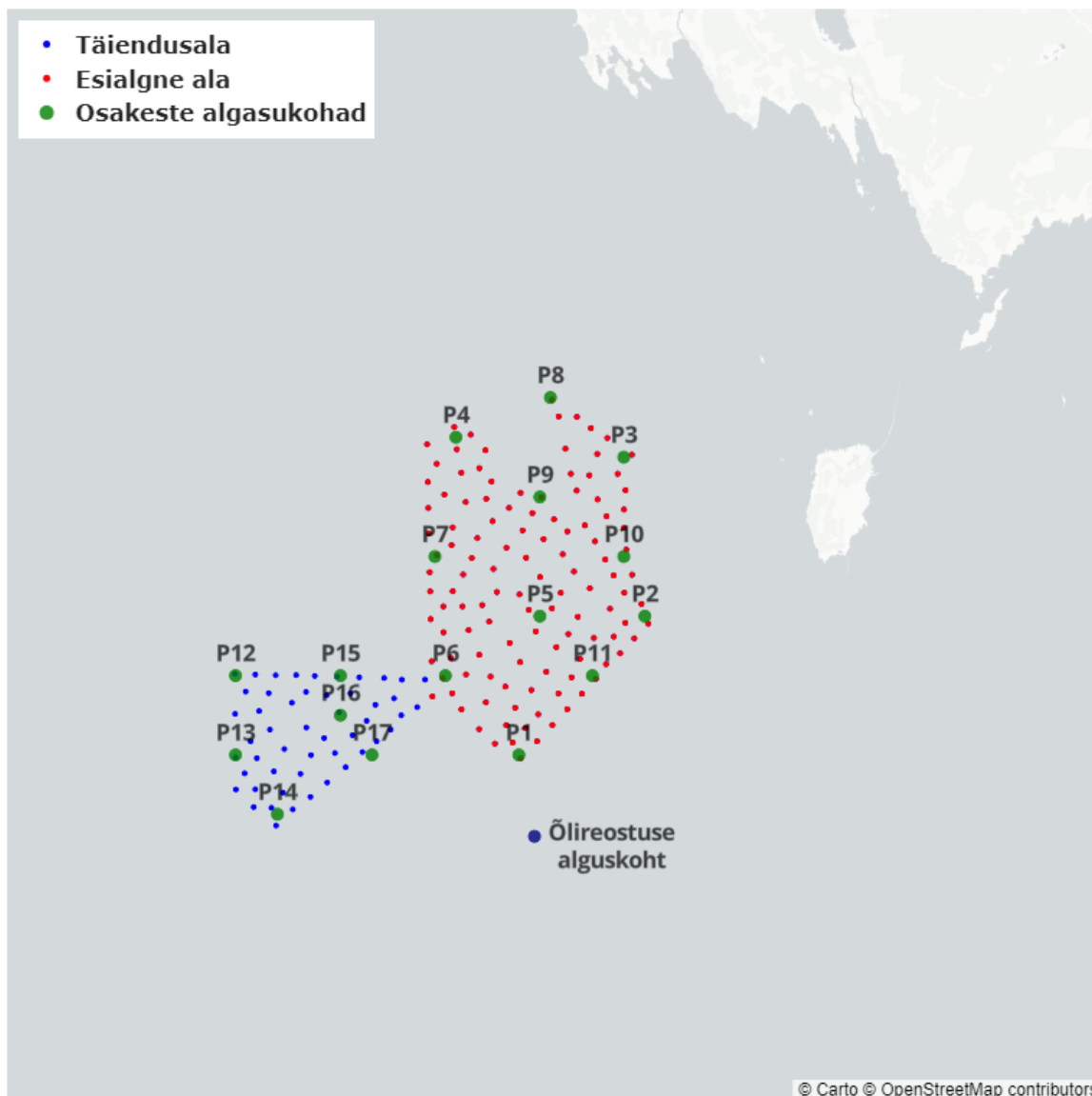
Õlireostuse modelleerimiseks kasutati Lagrange'i osakeste mudelit OpenDrift (Dagestad et al., 2018). Lagrange'i osakeste mudelid jälgivad individuaalseid osakesi kiirusväljas ning võimaldavad detailset analüüsi nende trajektooride kohta.

Käesolevas töös kasutas OpenDrift hüdrodünaamika mudeli GETM väljundist 3,6 tunnise lahutusega 2D (pinna) kiirusvälja andmeid, et simuleerida osakeste levikut Liivi lahes. OpenDrift arvutas osakeste koordinaadid ajasammuga 600 sekundit. Kiirusvälja andmed interpoleeriti ajas ja ruumis osakeste asukohtadesse. Osakesi lasti lahti joonisel 2.7.1 toodud asukohtadest igal ajahetkel perioodi 02.01.2018 – 08.10.2023 jooksul. Asukohtadeks valiti mitmed punktid tuulepargi välispiiril ja paar punkti pargi sees (kokku 17 punkti). Nii on võimalik näidata reostuse võimalikud trajektoorid tuulepargi eripiirkondadest. Igast punktist

lasti lahti 200 000 osakest (kokku 3 400 000) viie stsenaariumi korral: osakeste maksimaalne levimise aeg (vanus) oli 72, 48, 24, 12 või 6 tundi. Osakestel lasti kiirusväljas levida kuni nad randusid või saavutasid maksimaalse vanuse. Osakesed levisid kiirusväljas adveksiooni ja difusiooni mõjul. Horisontaalse difusiooni koefitsiendiks määrati $0.157 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, arvestades hüdrodünaamika mudeli 250 meetrist võrgusammu (Schönfeld, 1995). OpenDrift mudel arvutab osakestele antud difusioonikordaja ja juhusliku arvu kaudu difusioonist tingitud kiiruse.

Osakeste lõppasukohti kasutati levimise tõenäosuskaartide koostamiseks. Tõenäosuskaardid näitavad, kuhu osakesed (reostus) vastavalt stsenaariumile määratud aja jooksul levivad. Lisaks arvutati osakeste (reostuse) rannikule ning looduskaitsealadele jõudmise tõenäosused. Analüüs tehti eraldi iga algallika jaoks kogu perioodi vältel ja sesoonide kaupa. Analüüsiperioodiks valiti täpselt 5 aastat – 2018.10.01 kuni 2023.10.02 – nii on kõik aastaajad võrdselt esindatud.

Lisaks tehti läbi kaks konkreetset õlireostuse stsenaariumi arvutust. Nendes stsenaariumites lasti vastaval 11.09.2019 ja 12.09.2019 lahti 1000 osakest, mis esindasid 10 m^3 laevadiislit (<https://adios.orr.noaa.gov/oils/AD00721#ember20161>). Osakesed lasti lahti asukohas 57.958877°N , 23.694818°E (vt. joonis 2.7.1, tumesinine punkt), kus on kõrgeenenud laevaõnnetuse tõenäosus. Reostusel lasti 48 tundi levida. Lisaks hoovuskiirustele kasutati osakeste leviku arvutamisel ka tuule – ja laineandmeid. Muud laevadiisli omadused (nt. aurustumine, segunemine) pandi osakestele OpenDrift mudeli OpenOil mooduliga.

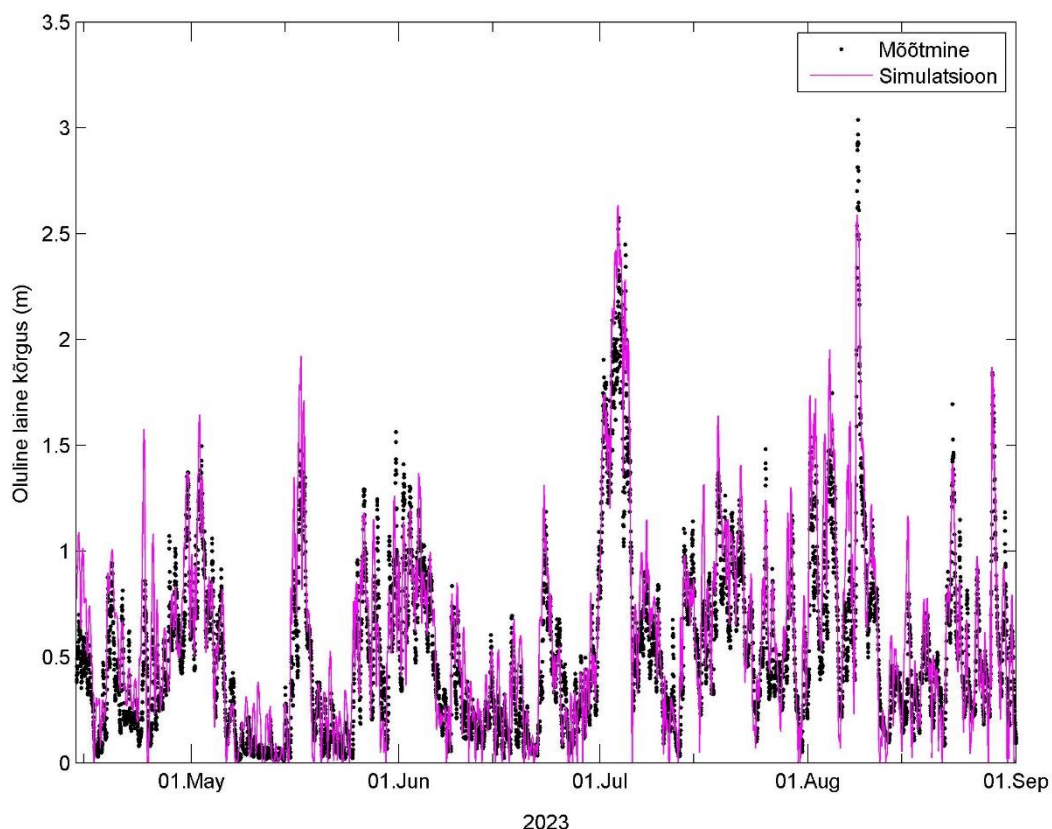


Joonis 2.7.1: Osakeste algasukohad (rohelised punktid) ja tuulikute asukohad esialgsel alal (punased punktid) ja täiendusosalal (sinised punktid). Tumesinine punkt tähistab õlireostuse stsenaariumi algasukohta.

2.8. Lainetuse modelleerimine

Lainetuse modelleerimiseks kasutasime numbrilist mudelit SWAN. Tuulikute mõju lainetusele modelleeritakse erinevate tuule kiiruste ja suundade jaoks. Tuulikud vähendavad piirkonnas tuule kiirust ja potentsiaalselt ka laine kõrgust. Vähesel määral mõjutavad lainetust ka tuulikute mastid, kuid see mõju on tagasihoidlik (Alari and Raudsepp, 2012; McCombs et al., 2014). Loode-Eesti tuulepargi mõju hindamiseks modelleeriti pargi erinevate konfiguratsioonide jaoks

nii mastide mõju kui ka tuule vähenemise mõju (TTÜ meresüsteemide instituut, 2008 ja 2022). Mastide mõju oli vaid 1-2 cm tuulikute läheduses, tuule vähenemise mõju oli teatud tuultega suurem ja laiaulatuslikum. Sellest tulenevalt kontsentreerume antud töös põhjalikumalt tuule vähenemisest tingitud mõjule. Lainetust modelleeritakse iga tuule suuna ja kiiruse kombinatsioonis kuni lainete küllastuseni, st. momendini, kui lained enam tuulelt energiat juurde ei saa. Lainetuse kirjeldamisel kasutame kõige enam levinud parameetrit „oluline laine kõrgus“. Oluline laine kõrgus on teatud perioodil vaadeldud lainete aegrea 1/3 kõrgemate lainete keskmine kõrgus. Esmalt modelleeriti kogu Läänemere lainetus. Üle kogu Läänemere tehtud arvutustest võeti rajatingimused planeeritava tegevuse piirkonnas tehtud arvutuste tarvis. Järgnevalt arvutati detailsed laineväljad tuulepargi piirkonnas. SWAN lainemudel on Lääne-Eesti rannikumeres edukalt valideeritud- mudelitulemused on näidanud head kokkulangevust mõõtmistega (Alari et al., 2008; TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2007). Hea kokkulangevus on ka tuvastatud antud projekti raames tehtud mõõtmistega jaamas KW (joonis 2.8.1).



Joonis 2.8.1. Mõõdetud ja simuleeritud oluline laine kõrgus jaamas KW.

3. Mõõtmistulemused ja taustainfo

3.1. Mõõtmised uurimislaevalt

Uurimislaevalt teostati proovivõtukarusselliga veesamba parameetrite mõõdistus. Selleks registreeriti temperatuuri, soolsuse, hapniku, klorofüll-*a* ja hägususe profiilid mõlema arendusala ühes asukohas (jaamad KW ja KR) kokku 7 reisi käigus. KW jaama mõõdistustöid alustati 2022. aasta oktoobris, KR jaam lisandus alates 2023. aasta aprillist. Kokku külastati KW ja KR jaamu vastavalt kaheksal ja viiel korral.

Joonisel 3.1.1 on kujutatud mõlema jaama temperatuuri, soolsuse, hapniku, klorofüll-*a* ja heljumi sisalduse profiilid ajavahemikul oktoober 2022 kuni oktoober 2023.

Oktoobri lõpuks 2022 oli veesammas jaamas KW täielikult läbisegunenud, ning parameetrite pinna- ja põhjakihis ei esinenud suuri erinevusi. Temperatuur ja soolsus olid vastavalt 11,4 °C ja 6,2 g/kg. Heljumi sisaldus oli praktiliselt kogu veesambas umbes 3 mg/l, suurendes põhjakihis, kus see oli ligikaudu 5 mg/l. Jaanuari keskel on tekkinud jaamas KW umbes 10 m sügavusele nõrk temperatuuri ja soolsuse hüppekiht. Veidi jahedam ja magedam vesi oli pinnakihi. Klorofüll-i sisaldus oli madalal tasemel sarnaselt oktoobriga, olles ligikaudu 2 mg/m³. Heljumi sisaldus püsis kogu veesamba ulatuses veidike üle 4 mg/l.

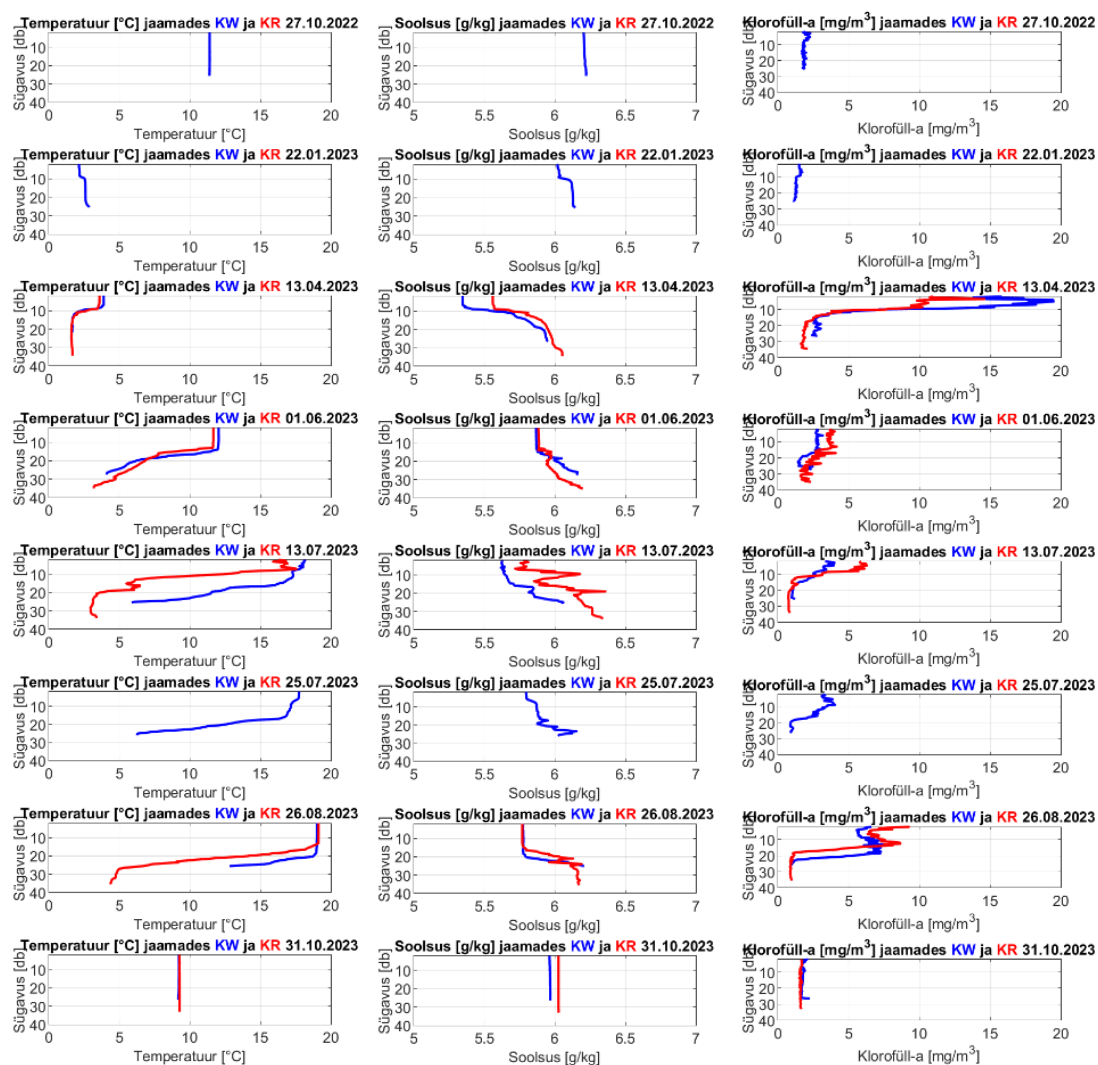
Aprillis alustati ka jaama KR mõõtmistöödega. Mõlema jaama parameetrite vertikaalsed jaotused olid sarnased. Kõige paremini kattusid kahe jaama temperatuuri ja hapniku väärtused, samas kui soolsuse väärtused pinnakihi olid väiksemad ja klorofüll-i väärtused suuremad jaamas KW. Aprilli mõõdistuse ajaks oli tekkinud termokliin ja kogu mõõteperioodi kõrgeimad klorofüll-i väärtused registreeriti just aprillis, kõrge primaarproduktiooni perioodil. Jaama KW klorofüll-i maksimum ulatus ligikaudu 20 mg/m³ ja jaama KR maksimum peaaegu 15 mg/m³. Samal ajal registreeriti ka suurimad hapniku sisaldused pinnakihi, ligikaudu 14,5 mg/l. Heljumi sisaldus oli mõlemas jaamas kõrgem pinna- ja põhjakihis, kuni 7 mg/l, madalam vahekihi. Juuni alguseks oli termokliin veelgi tugevnenud ning pinnakihi temperatuur mõlemas jaamas oli üle 10 °C. Juuniks olid klorofüll-i väärtused langenud kogu veesamba ulatuses alla 5 mg/m³. Sarnaselt oli ka hapnik langenud nii pinna- kui põhjakihis mõlemas jaamas vastavalt alla 12 mg/l pinnakihi ja alla 10 mg/l põhjakihis. Heljumi sisaldus oli

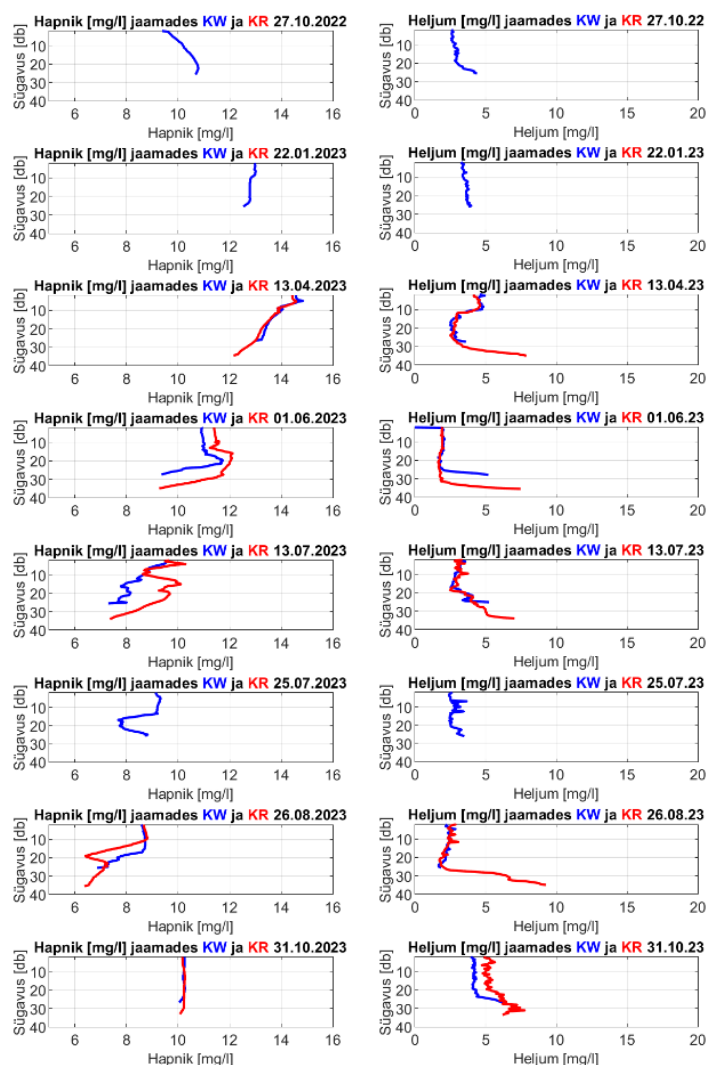
mõlemas jaamas ülemises kihis ca 2 mg/l, kuid põhjakihis esines mõlemas jaamas tunduvalt kõrgem heljumi sisaldus, olles jaamas KW ligikaudu 5 mg/l ja jaamas KR 7 mg/l. Juuli keskpaigaks oli pinnakihi temperatuur veelgi tõusnud, olles üle 15 °C. Hapnik oli veelgi langenud, olles mõlemas jaamas praktiliselt kogu veesamba ulatuses alla 10 mg/l. Klorofüllis sisaldus oli küll veidikene tõusnud, kuid mitte märkimisväärselt, olles jaama KR pinnakihis natuke üle 5 mg/m³. Juuli lõpus teostati mõõtmisi ainult jaamas KW, ning erilist muutust võrreldes eelneva perioodiga märgata ei ole. Augusti lõpus oli termokliin mõlemas jaamas võrreldes varasemate mõõtmistega sügavamal, umbes 20 m sügavusel. Sarnaselt paiknes ka halokliin mõlemas jaamas ligikaudu 20 m sügavusel. Põhjakihi hapnik oli jätkuvalt langenud, olles mõlemas jaamas juba alla 7 mg/l. Samal ajal on pinnakihis märgata klorofüllis sisalduse suurenemist. Heljumi sisaldus oli veesambas üldiselt alla 3 mg/l välja arvatud jaama KR põhjakihis, kus esines kogu mõõteperioodi maksimum, ligikaudu 10 mg/l. 2023 aasta oktoobriks oli veesammas jälle läbisegunenud ning kummagi jaama parameetrites suuri vertikaalseid gradiente ei esinenud, temperatuur oli ligikaudu 9 °C, soolsus ligikaudu 6 g/kg, klorofüll ligikaudu 2 mg/m³ ja hapnik ligikaudu 10 mg/l. Jaamas KR esines nii pinna- kui põhjakihis kõrgem heljumi sisaldus. Pinnakihis oli heljum jaamas KW alla 5 mg/l ning jaamas KR ligikaudu 5 mg/l, samas kui põhjakihis tõusis heljum mõlemas jaamas üle 5 mg/l.

Toitainete ja üldainete analüüside tulemused on toodud tabelis 2. Mõlema jaama puhul mõõdeti pinnakihi integreeritud proovide ja põhjakihi suurimad väärtused aprillis, välja arvatud ammooniumil, mille puhul mõlema jaama maksimum esines juulis. Aprillis olid ainete sisaldused mõnevõrra kõrgemad ülemises kihis, mis viitavad, et ülemine, maismaalt pärit vesi ei olnud alumise kihiga täielikult segunenud. Juunis, juulis ja augustis olid ainete sisaldused ülemises kihis selgelt langenud ja madalamad kui alumises kihis. Erandiks oli üldlämmastik, mille sisaldus ülemises ja alumises kihis oli juunis ja juulis samas suurusjärgus. Anorgaanilised toitained olid primaarprodutseerijate poolt ülemisest kihist ära tarbitud. Veidi kõrgemad väärtused juulis on tõenäoliselt tingitud väga õhukesest segunenud kihist. HELCOM metoodika järgi integreeritakse ülemise kihi proovid 1, 5 ja 10 m sügavuselt võetud proovidest. Kui segunenud kihi paksus (nagu 13. juulil) on alla 10 m, siis on 10 m vesi pärit termokliinist, kus võivad toitainete kontsentratsioonid. Läänemeres on toitainete kliinid tugevalt termokliiniga seotud.

Uurimislaevalt tehtud mõõtmised näitavad, et vaatamata mereala madalusele, esineb siin aprillist alates arvestatav stratifikatsioon ja vertikaalsed gradiendid on näha ka toitainetes, klorofüllis ja heljumi sisalduses. See tähendab, et vertikaalse segunemise mõjutamine (nt läbi

tuule kiiruse vähendamise tuulepargi alal) võib tingida muutuseid ka mere ülemise ja alumise kihi vahelises ainerings ja seeläbi ka primaarproduktsoonis. Põhjalähedases kihis esines korduvalt hägususe maksimum, mis on tõenäoliselt tingitud setete resuspensioonist hoovuse või lainetuse tõttu. Kahe jaama vertikaalsed jaotused on suhteliselt sarnased, kuid on ajas väga muutuvad. See viitab, et arendusalade piires ei ole ruumiline muutlikkus nii suur kui ajaline muutlikkus. Ajalist muutlikkust vaatame edaspidi täpsemalt poijaamade andmetest. Ruumilise ja ajalise muutlikkuse üheskoos analüüsime kõrgsageduslike allveeliuguri mõõtmiste põhjal.





Joonis 3.1.1. Jaamades KR ja KW registreeritud temperatuuri, soolsuse, hapniku, klorofüll-a ja heljumi profiilid .

Tabel 2. Jaamade KR ja KW räni (Si), ammooniumi (NH₄), lämmastiku ionide (NO₂+NO₃), üldlämmastiku (N_{tot}), fosfaadi (PO₄) ja üldfosfori (P_{tot}) laboratoorsete analüüside tulemused.

Jaam KR							
Kuupäev	Sügavus (m)	Si (μM)	NH ₄ (μM)	NO ₂ +NO ₃ (μM)	N _{tot} (μM)	PO ₄ (μM)	P _{tot} (μM)
13.04.23	Int 1+5+10	35.07	0.18	19.89	48.35	0.71	1.23

01.06.23	Int 1+5+10	9.45	0.22	0.05	24.39	0.18	0.59
13.07.23	Int 1+5+10	12.72	2.00	2.16	29.45	0.25	0.72
26.08.23	Int 1+5+10	7.19	0.32	0.10	16.58	0.15	0.40
31.10.23	Int 1+5+10	32.46	0.46	7.96	31.04	0.80	1.08
13.04.23	34	40.33	0.78	11.40	35.38	0.97	1.57
01.06.23	35	25.97	0.50	1.90	17.93	0.51	0.74
13.07.23	34	41.18	3.36	7.53	30.04	0.67	1.15
26.08.23	35	46.62	0.60	14.72	29.22	1.20	1.33
31.10.23	33	30.43	0.51	8.22	26.48	0.84	1.00
Jaam KW							
Kuupäev	Sügavus (m)	Si (μM)	NH4 (μM)	NO2+N03 (μM)	Ntot (μM)	PO4 (μM)	Ptot (μM)
13.04.23	Int 1+5+10	28.29	0.25	21.65	53.43	0.51	1.05
01.06.23	Int 1+5+10	10.79	0.21	0.06	20.52	0.17	0.51
13.07.23	Int 1+5+10	9.00	1.08	0.06	29.38	0.16	0.72
26.08.23	Int 1+5+10	10.98	0.46	0.08	24.36	0.17	0.55
31.10.23	Int 1+5+10	32.07	0.48	6.72	28.97	0.56	0.99
13.04.23	26	32.82	0.35	15.66	28.93	0.98	1.15
01.06.23	25	21.91	0.34	0.07	24.95	0.24	0.71
13.07.23	25	22.59	4.76	4.55	25.19	0.68	0.80
26.08.23	25	16.81	1.80	1.91	22.29	0.29	0.62

31.10.23	26	29.52	0.55	7.73	27.45	0.76	0.92
----------	----	-------	------	------	-------	------	------

Uurimislaev Salme läbivoolusüsteem (Salmebox) registreerib merevee temperatuuri ja soolsust 2,5 m sügavusel merepinnast. Antud töö raames on analüüsitud ajavahemikku august 2022 kuni august 2023 jäävaid andmeid, kokku on kasutatud kaheksa reisi andmeid, mis läbisid uurimisala Liivi lahes.

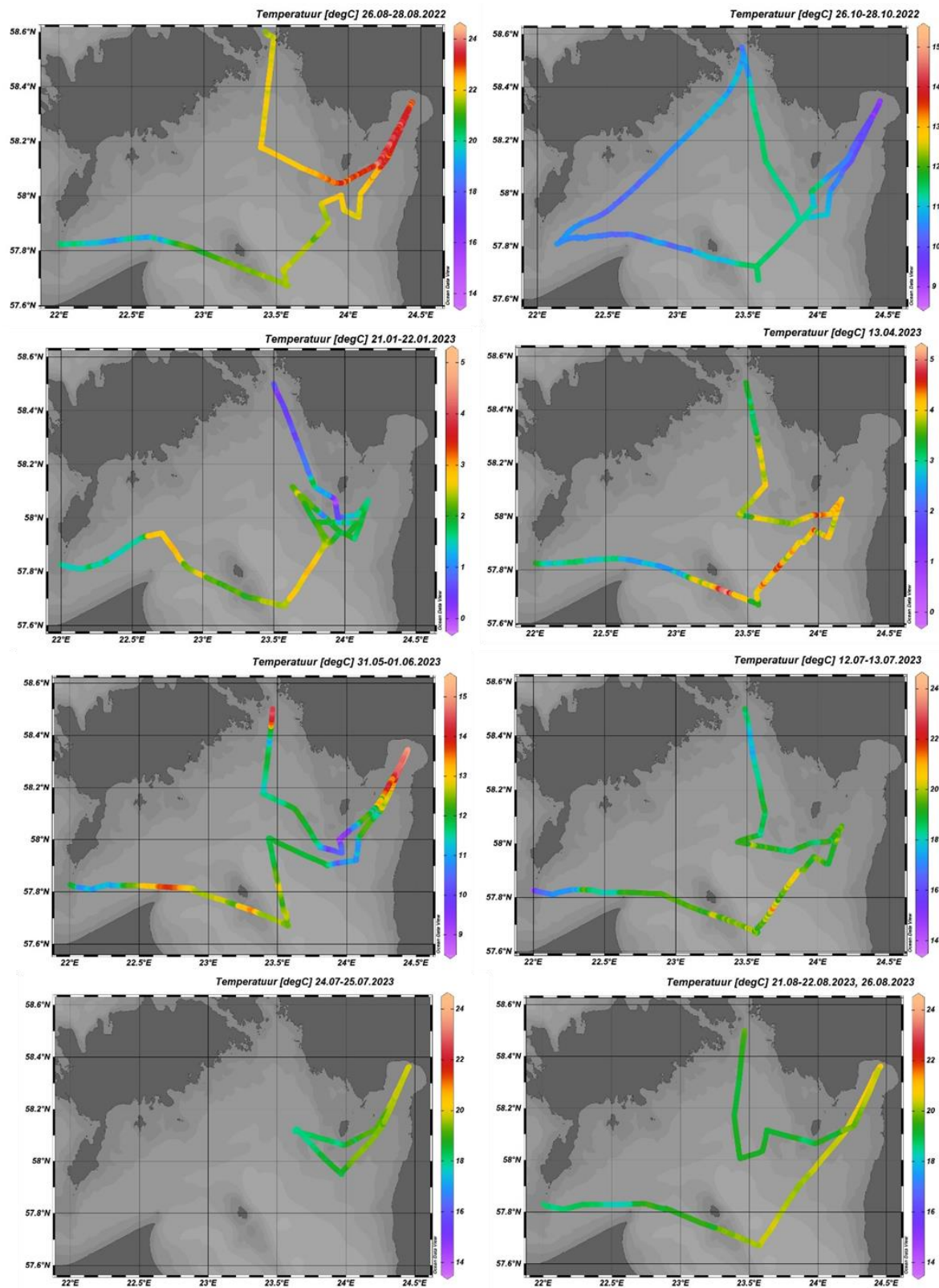
Joonisel 3.1.2 on kujutatud Salmeboxiga registreeritud pinnakihi temperatuur Liivi lahes. Kahe aasta võrdluses on augustis 2022 mõõdetud kõige kõrgem merevee temperatuur, jäädes vahemikku 18-20 °C Irbe väina suunas ning ulatudes 24 °C Pärnu lahes. Oktoobris 2022 jäi merevee temperatuur 9-12 °C vahele, olles soojem Liivi lahe keskosas ning jahedam Irbe väina ning Pärnu lahe suunas. 2023 aasta jaanuaris oli Liivi lahe lääneosas vee temperatuur umbes 1,5 °C ja lahe keskosas veidi alla 3°C, kuid Kihnu saare lõunaosas langes alla 0°C ning esines jääd. Aprillis 2023 jäi vee temperatuur vahemikku 2,4-5,1 °C, olles soojem Liivi lahe keskosas. Mai lõpuks, juuni alguseks tõusis vee temperatuur veidi üle 15 °C, olles vahemikus 8,9-15,1 °C. Soojem veemass registreeriti Pärnu lahes ja Suure väina suunas ning Kura poolsaare tipu juures, samas kui kõige madalam vee temperatuur mõõdeti Kihnu saarest lõuna pool. Juulis 2023 toimus Liivi lahel tuulepargi piirkonnas kaks reisi, millest esimene jäi juuli keskpaika (12.07-13.07) ning teine juuli lõppu 24.07-25.07. Juuli keskpaigaks oli merevee temperatuur tõusnud 21,5 °C Liivi lahe keskosas, langedes kuni 13,9 °C-ni Irbe väina suunas. Juuli lõpuks ja augustis oli vee temperatuur väiksema muutlikkusega, olles vahemikus 17,8-20,1 °C juulis ning 18,1-20,9 °C augustis.

Joonisel 3.1.3 on toodud Salmeboxiga registreeritud merevee pinnakihi soolsus Liivi lahes. Üldiselt oli soolsus kõrgem Liivi lahe läänepoolses osas, Irbe väinas ning mõnel juhul ka Suure väina poolses osas. Soolsus oli madalam Liivi lahe keskosas ning Pärnu lahes. Nii 2022. aasta kui 2023. aasta augustis oli Liivi lahe keskosas ning idapoolses osas merevee soolsus pinnakihis ühtlaselt jaotunud, jäädes 5,27-5,79 g/kg vahele. Mõlemal aastal on kõrgeim pinnakihi soolsus mõõdetud vahetult Kura poolsaarest põhjas, jäädes vahemikku 6,0-6,99 g/kg augustis 2022 ning 5,9-6,35 g/kg augustis 2023. Talvel oli üldine soolsuse sisaldus Liivi lahes kõrgem kui näiteks sama aasta aprillis, jäädes 5,60-6,65 g/kg vahele jaanuaris 2023 ja 5,08-6,21 g/kg vahele aprillis 2023.

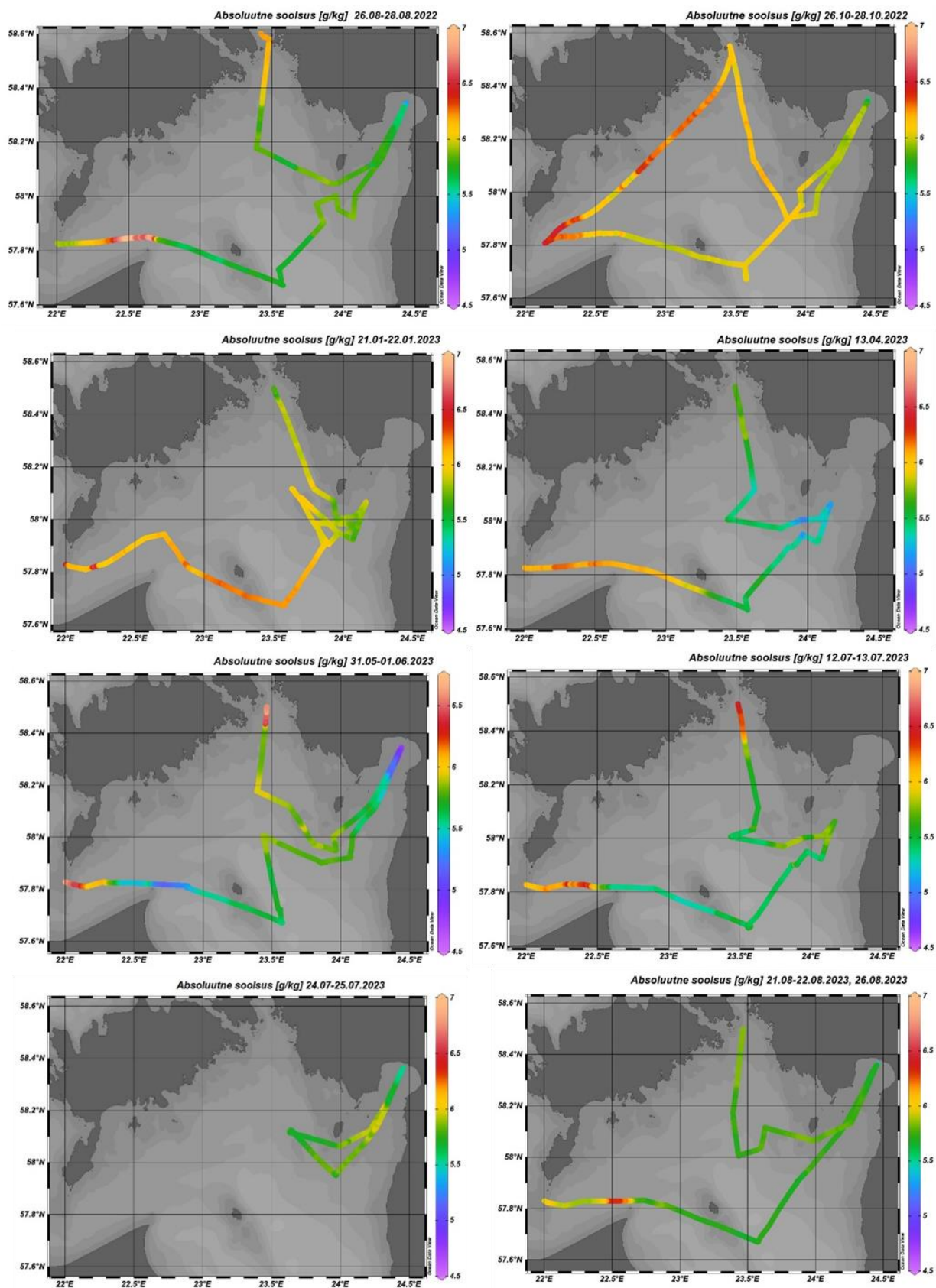
Terve Liivi lahe ulatuses saadud temperatuuri ja soolsuse mõõtmisandmetest on näha Liivi lahele omaseid tsirkulatsioonimustreid, mis on mõjutatud jõgedest ja avamerelt pärit vee

transpordist. Suvisel perioodil võib lääneosas valitseda pinnakihis antitsükloonaalne voolamine, kui Liivi lahe lõunaosa madalama soolsusega veed võivad kanduda kaugemale põhja poole (Lips et al., 2016a).

Pinnakihis tehtud mõõtmised näitavad, et rannaäärsete protsesside nagu apvellingud või jõevee leviku otsest tugevat mõju arendusaladel ei esine. Ajaline muutlikkus on pigem tingitud Liivi lahe üldisest sesoonsest käigust, sh. vertikaalsest segunemisest.



Joonis 3.1.2. Salmeboxiga mõõdetud temperatuur Liivi lahes 2022. aasta augustist kuni 2023. aasta augustini.



Joonis 3.1.3. Salmeboxiga registreeritud absoluutse soolsuse väärtused Liivi lahes 2022. augustist kuni 2023. augustini.

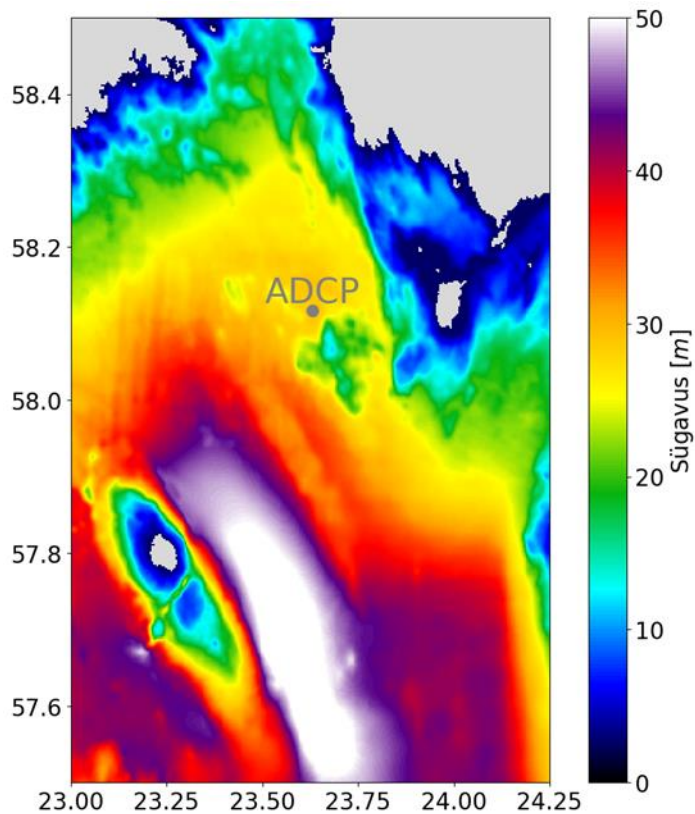
3.2. Mõõtmised poiijaamades

3.2.1. Hoovused

Hoovuste mõõtmised teostati akustilise Doppleri printsiibil töötava hoovuste kiiruste profileerijaga ADCP (RDInstruments, 307,2 kHz) Kihnu saarest lääne suunas jääva Liivi lahe piirkonna mõõtmisjaamas koordinaatidega Lat=58.1172, Lon=23.6305 (KihnuW jaam, Joonis 3.2.1.1). Mõõtmisperiood hõlmas ligikaudu 3 kuud sügis-talvisest perioodist (alates 27.10.2022 kuni 22.01.2023) ja 3 kuud suvest sügiseni (alates 25.07.2023 kuni 30.10.2023).

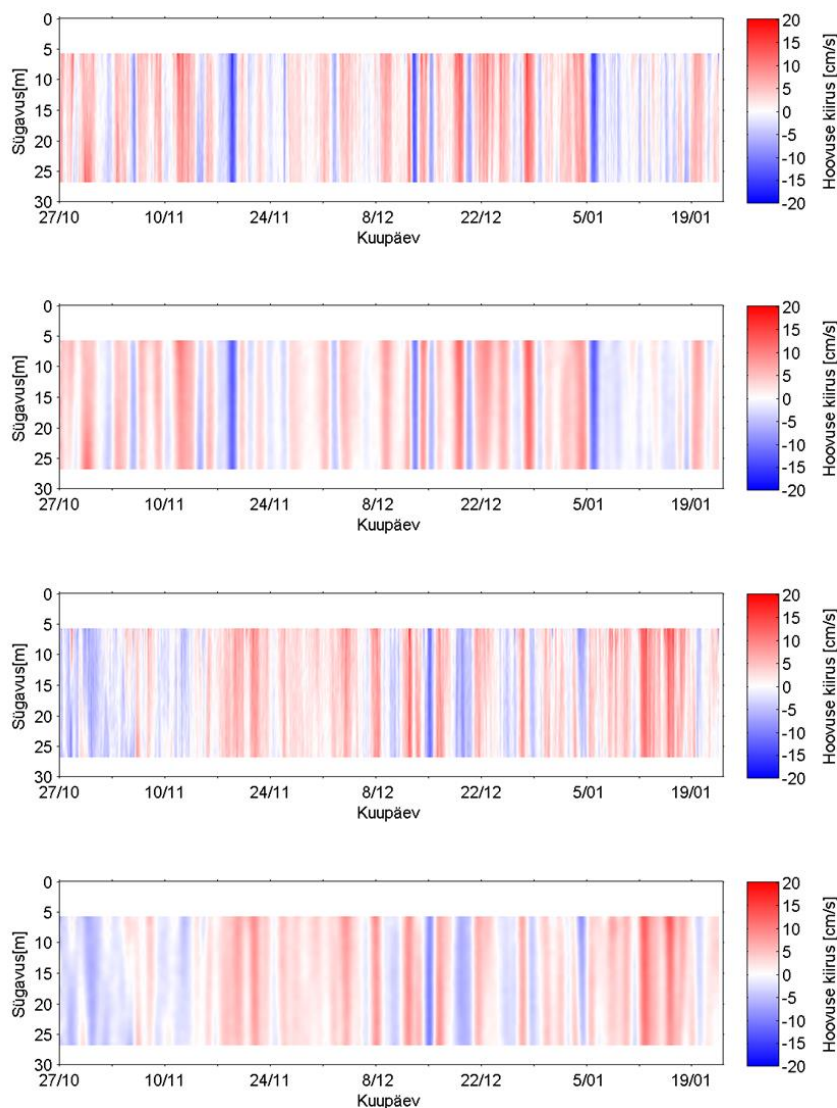
Esimene mõõdistus

Mere sügavus mõõtmispunktis esimese mõõteseeria ajal oli ligikaudu 30 m, aparaat asetati merepõhjale ning esimesed mõõtmised saadi 27 m sügavuselt, mõõdeti vertikaalse sammuga 1 m kuni 6 m sügavuseni, seega kokku 22-lt horisondilt.



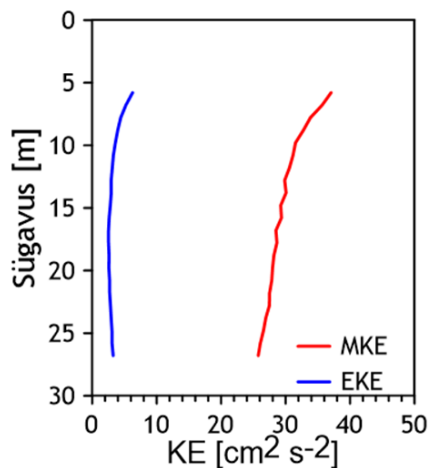
Joonis 3.2.1.1. Hoovusmõõtja ADCP (RDInstruments, 307,2 kHz) asukoht Kihnu saarest ligikaudu 18 km läänes (KihnuW). Taustavärvina on toodud merepõhja sügavusjaotus.

Kõigepealt vaatame hoovuse kiiruse vektori u - ja v -komponente (u -komponent on positiivne ida suunas ja v -komponent põhja suunas). Kiiruse vektori komponentide esitamine võimaldab otsustada nii hoovuse kihilisuse üle (joonisel värv muutub sügavusega) kui ka lainelise iseloomu üle (ajamastaabis kuni 36 tundi toimub värvide muutumine ajateljel). Lühiajaline hoovuse kiiruste muutumine tuleneb sellest, et Läänemeres kõige sagedamini esinevad lainelised protsessid (tõusu-mööna lained, inertslained ja seišid) omavad suurimat võnkumiste perioodi umbes 33 tundi. Seega kõrvutades ajas kõrglahutusega andmeid üle 36 tunni keskmistatud andmetega saame teha järeldusi laineliste protsesside osast hoovustele. Hoovuste ida ja põhjasuunaliste komponentide sügavus-aeg kaardid on toodud joonisel 3.2.1.2 (ülemine on kõrglahutusega ja alumine keskmistatud andmetega aegrida). Aegridadest nähtub, et sügis-talvisel perioodil madalas meres hoovus ei ole sügavusega kihistunud. Hoovused ei ilmuta ka tugevate perioodiliste võnkumiste esinemist.

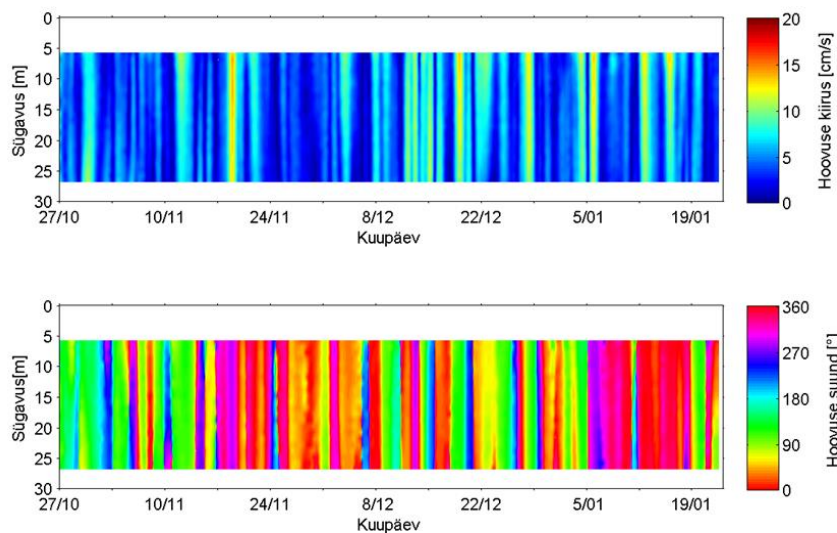


Joonis 3.2.1.2. KihnuW jaamas keskmistamata kiiruse u-komponent ja üle 36 tunni keskmistatud u-komponent (vastavalt ülemised 1 ja 2 paneel). Keskmistamata kiiruse v-komponent ja üle 36 tunni keskmistatud v-komponent (vastavalt alumised 3 ja 4 paneel).

Joonisel 3.2.1.3 on esitatud alla 36 tunniste kiiruse pulsatsioonide ($u' = u - u_k$, $v' = v - v_k$; u_k ja v_k on üle 36 tunni keskmistatud kiirused ja u' ja v' vastavad kiiruse komponentide pulsatsioonid) kineetilise energia (EKE) võrdlus keskmistatud kiiruse kineetilise energiaga (MKE). MKE ületab EKE ligikaudu 10-ne kordselt ja seega on meil põhjendatud siinse edaspidise analüüsi käigus keskenduda keskmistatud kiiruste analüüsile.



Joonis 3.2.1.3. KihnuW jaamas üle 36 tunni keskmistatud hoovuse kineetiline energia (punane joon) ja selle fluktuatsioonide kineetiline energia (sinine joon).

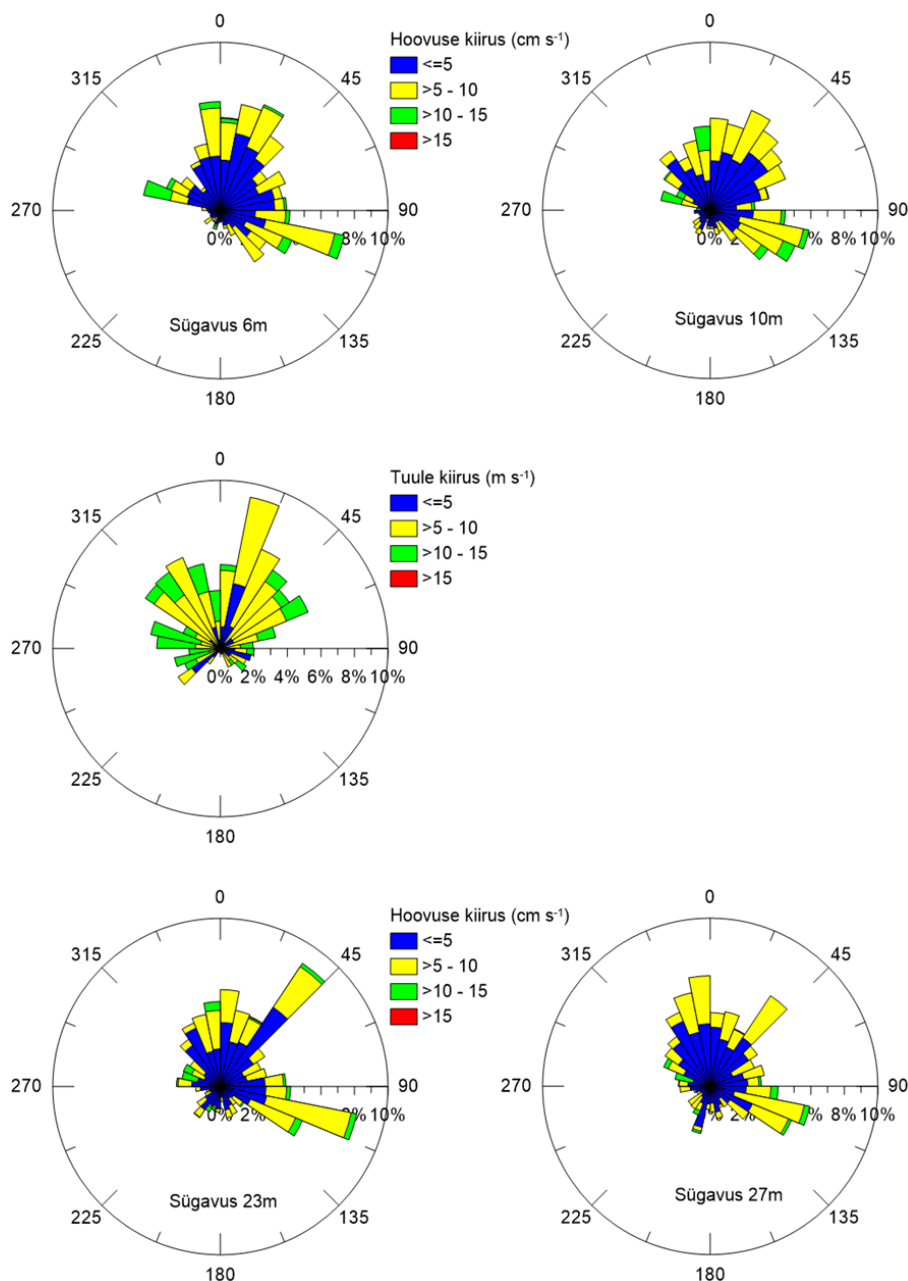


Joonis 3.2.1.4. KihnuW jaama hoovuse kiirus ja suund (filtreeritud andmed, lühemad kui 36 h perioodid on välja filtreeritud ehk keskmistatud).

Hoovuse kiiruse ja suuna sügavuse-aja kaart annab võimaluse jälgida hoovuse tippkiiruseid ja nendele vastavaid voolamise suundasid ajas. Vaadeldava sügis-talvise vaatlusperioodi jooksul esines 9 lühemaajalist perioodi, mille kestel hoovuse kiirus ületas 10 cm/s; kokku 6,5 päeva vältel. Need suuremad kiirused vaadeldi kas N või ESE suunal (ligikaudu suunal 116 kraadi).

Hoovusteroosi abil analüüsime hoovuse suundade ja kiiruste sagedusjaotust kahel sügavusel ülemises kihis – vastavalt 6 ja 10 m sügavusel ja kahel sügavusel põhjalähedases kihis – vastavalt 23 ja 27 m sügavusel (joonis 3.2.1.5). Hoovuse kiiruse ja nurga sagedusjaotused on esitatud joonisel nurgalahutusega 11,25 kraadi, mis vastab ühele rumbile ja on 1/32 osa

täisringist. Üldises plaanis oli hoovus suunatud sektorisse NW, NE ja ESE nii ülemises kui ka põhjalähedases kihis, mis on kooskõlas tuulevektori suundadega (joonis 3.1.2.6).



Joonis 3.2.1.5. KihnuW jaama keskmistatud hoovusteroos pinnalähedastel sügavustel 6 ja 10 m (ülemised kaks alamjoonist) ja põhjalähedastel sügavustel 23 ja 27 m (alumised kaks alamjoonist). Alamjoonistel on hoovuse suundade jaotus lahutusega 1 rumb (üks rumb on $1/32$ täisringist ehk siis $11,25$ kraadi) protsentides kõikidest mõõtmistest, kiiruste jaotus on antud protsentides värviskaalaga eristatud klasside jaoks. Keskmine alamjoonis näitab tuulevektori suundi mõõtmisperioodil (üldiselt hoovuse suunad jälgivad tuulevektori suundi antud mõõtmisjaamas).

Põhjalähedases kihis oli WNW suunalisi kiirusi oluliselt vähem kui pinnalähedases kihis. Kõige rohkem tugevaid hoovuseid esines sügavusel 6 meetrit just WNW suunal. SW sektori suunalisi hoovusi esines esines kõige vähem. Prevaleerivaks hoovuse suunaks osutus ligikaudu 8%-ga hoovus nurgavahemikku 101,25-112,5 kraadi 6 m sügavusel ja ligikaudu 9% -ga nurgavahemikku 33,75-45 kraadi 23 m sügavusel.

Kogu mõõtmisperioodi keskmisi hoovuseid iseloomustame nende keskmise kiiruse, maksimaalse kiiruse ja vektorkeskmise kiirusvektori suuna ning hoovuse suuna püsivuse parameetrite abil (Tabel 3).

Tabel 3. Hoovuse kiiruse keskmised, maksimaalsed väärtused ning hoovuse suuna hoidmise püsivus vastavalt mõõtmis sügavusele

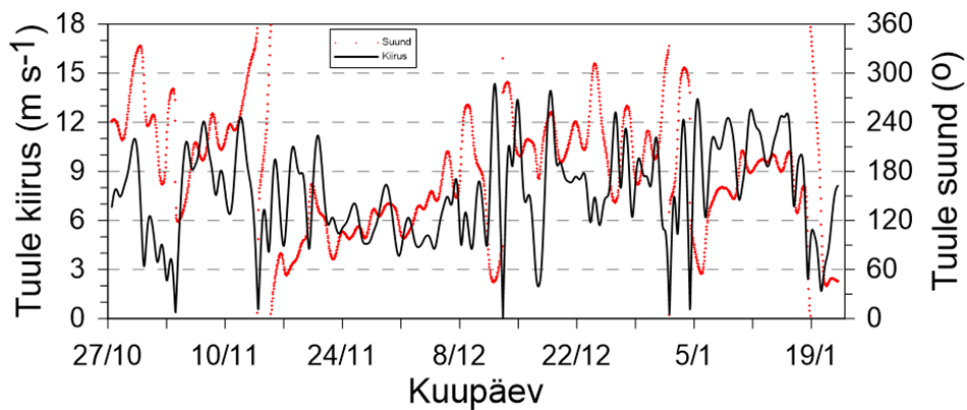
Süg (m)	k_m (cm/s)	max_m (cm/s)	k_u (cm/s)	k_v (cm/s)	k_vm (cm/s)	Püs (%)
6	5.3	13.5	1.5	1.6	2.2	42
7	5.2	13.8	1.4	1.6	2.2	42
8	5.0	13.6	1.4	1.5	2.1	41
9	5.0	13.4	1.3	1.5	2.0	40
10	4.9	13.4	1.3	1.4	1.9	40
11	4.8	13.6	1.3	1.3	1.9	39
12	4.8	13.6	1.3	1.3	1.8	38
13	4.7	13.5	1.2	1.3	1.8	38
14	4.8	13.4	1.2	1.3	1.8	37
15	4.7	13.0	1.2	1.2	1.7	36
16	4.7	13.3	1.2	1.2	1.7	36
17	4.6	12.9	1.2	1.1	1.6	35
18	4.6	13.0	1.2	1.1	1.6	35
19	4.6	12.9	1.1	1.1	1.6	34
20	4.6	12.9	1.1	1.1	1.6	34
21	4.6	13.0	1.1	1.0	1.5	33
22	4.5	12.9	1.1	1.0	1.5	33
23	4.5	12.4	1.0	1.0	1.5	33

24	4.5	12.6	1.0	1.0	1.4	32
25	4.4	12.7	0.9	1.0	1.3	30
26	4.4	12.6	0.9	0.9	1.3	29
27	4.4	12.7	0.8	0.9	1.2	28
kesk	4.8	13.2			1.7	36

Süg – mõõtmisügavus, k – üle mõõtmisperioodi keskmine väärtus, max – mõõtmisperioodi maksimaalne väärtus, m - hoovuse kiirus, u - hoovuse kiiruse idasuunaline komponent, v - hoovuse suuruse põhjasuunaline komponent, k_{vm} - mõõtmisperioodi resultantkiirus (vektorkeskmine kiirus), $Püs=k_{vm}/k_m$ – iseloomustab kui püsivalt hoovus hoiab suunda, 100% on juhul kui vesi voolab ühes kindlas suunas, 0% on kui vesi liigub elliptilisel trajektooriga ja liikumise alguspunkt ühtib liikumise lõpp-punktiga.

Hoovuse keskmine kiirus oli suurim pinnakihis – 5,3 cm/s ja väiksem põhjakihis – 4,4 cm/s. Võrdluseks näiteks Soome lahes piki nõgu on keskmised kiirused pinnal umbes 10 cm/s (Suhhova et al., 2018). Suurim maksimaalne kiirus mõõdeti 7 m sügavusel 13,8 cm/s; ja väiksem maksimaalne kiirus mõõdeti põhjalähedases kihis 23 m sügavusel 12,4 cm/s. Mõõtmisperioodi resultantkiiruse (vektorkeskmise kiiruse) moodul muutus sügavusega 1 cm/s pinnalt põhjani, vastavalt 2,2 ja 1,2 cm/s. Hoovuse püsivuse parameeter oli pinnakihis suurim, 42%, ja põhjakihis väiksem, 28%. Mõlemad vaadeldud hoovuse püsivuse parameetri väärtused on võrreldavad Soome lahe pinnakihi väärtustega, mis on 30% ümbruses. Seega hoovus on sügis-talvisel perioodil suhteliselt püsivalt NE suunaline.

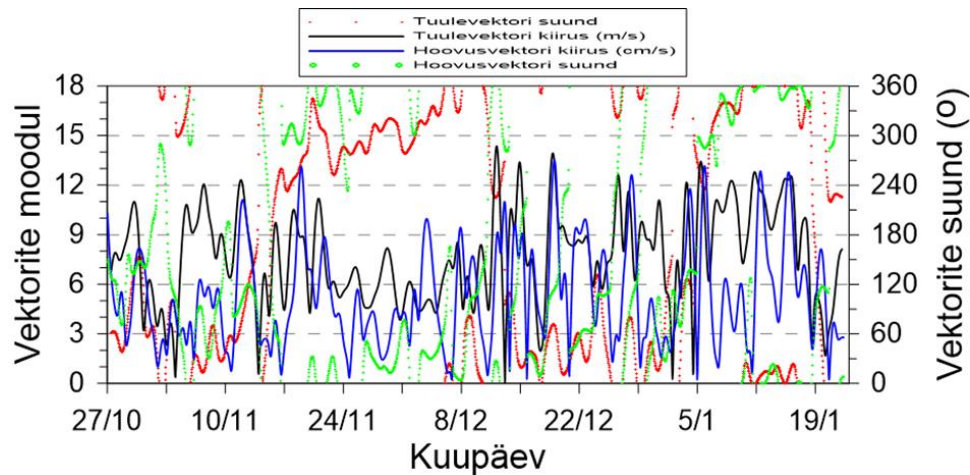
Hoolimata sügis-talvisest mõõtmisperioodist tugevat tormi ei esinenud (joonis 3.2.1.6). Tugevamad tuuled (üle 12 m/s) esinesid novembri alguses hooti ühe nädala kestel, detsembri keskel samuti ühe nädala kestel ja jaanuari esimeses pooles kahe nädala jooksul. Keskmine tuule kiirus mõõtmisperioodi jooksul oli 8,0 m/s ja maksimaalne kiirus 15,7 m/s (siin kasutasime 1 tunni keskmistatud tuult).



Joonis 3.2.1.6. Tuule kiirus ja suund (filtreeritud andmed, lühemad kui 36 h perioodid on välja filtreeritud ehk keskmistatud, tuule suund näitab, mis suunast tuul puhub).

Hoovuse seost tuultega vaatleme joonise 3.2.1.7 abil, mis iseloomustavad sagedamini esinevaid hoovuste ja tuule suundi. Eristuvad kolm sagedamini esinevat tuult, mis on SSE (ligikaudu 20% kõikidest tuulesuundadest), SSW (30%) ja WSW (10%) tuuled. Üldiselt hoovuse suund on seoses tuulevektori suunaga antud mõõtmisjaamas olles pööratud tuulevektori suunast paremale 30 kuni 50 kraadi.

Seega vastavalt hoovuste kiirusvektorite roosile antud mõõtmisjaamas tuuled mõjutavad otseselt hoovusi (tekitades triivhoovuseid). Hoovuste prevaleerivat NE suunda põhjustavad tõenäoliselt prevaleerivad NNE suunas puhuvad tuuled. Vastavalt sügavusjaotusele (Joonis 3.2.1.1) lõunakaarte tuulte poolt (täpsemalt NNE suunas puhuvad tuuled) tingitud hoovustele põhja topograafia olulist mõju ei avalda ning hoovused järgivad vaadeldaval ajavahemikul tuulevektori suunda. Hoovuste ja tuule tugevuse vahelist korrelatsiooni hindame joonise 3.2.1.7 abil, üldjuhul hoovuse kiirus järgis tuule kiirust. Siiski esinesid mõned ajavahemikud, kus küll tuulevektori ja hoovusvektori suunad langesid kokku kuid kiirused ei korreleerunud (näiteks ajaperioodid 3/11-10/11, 27/12-3/1 ja 5/1-12/1). Keskmiselt moodustas hoovuse kiirus tuule kiirusest 0,7% (ehk siis 10 m/s tuulekiiruse puhul oleks hoovuse kiiruseks 7 cm/s).

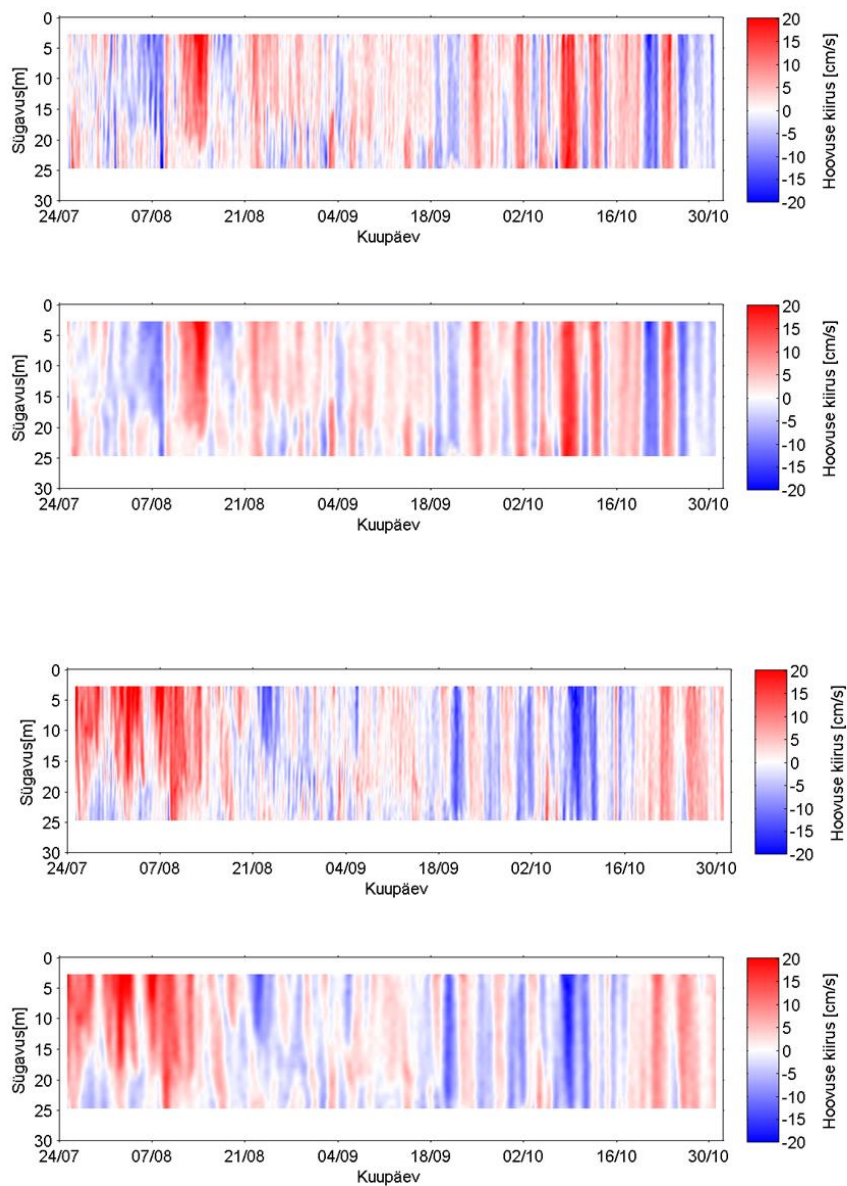


Joonis 3.2.1.7. KihnuW jaama tuulevektori ja hoovusvektori (6 meetri sügavusel) moodul (kiirus) ja suund (filtreeritud andmed, lühemad kui 36 h perioodid on välja filtreeritud ehk keskmistatud, tuulevektori suund näitab, mis suunas tuul puhub).

Teine mõõdistus (suvine periood)

Teine mõõtmisperiood hõlmas ligikaudu 3 kuud suvi-sügis perioodist (alates 25.07.2023 kuni 30.10.2023). Hoovusmõõtja ADCP (RDInstruments; 307,2 kHz) asetati merepõhjale samas mõõtmispunktis nagu esimese mõõdistuse korral, Kihnu saarest ligikaudu 18 km läänes (KihnuW). Mere sügavus mõõtmispunktis oli ligikaudu 30 m, esimesed mõõtmised saadi 25 m sügavuselt, mõõdeti vertikaalse sammuga 1 m kuni 3 m sügavuseni, seega kokku 23-lt horisondilt. Järgneva analüüsi käigus jälgime sama terminoloogiat ja materjali esitust, mida kasutasime esimese mõõdistuse andmete esitamisel.

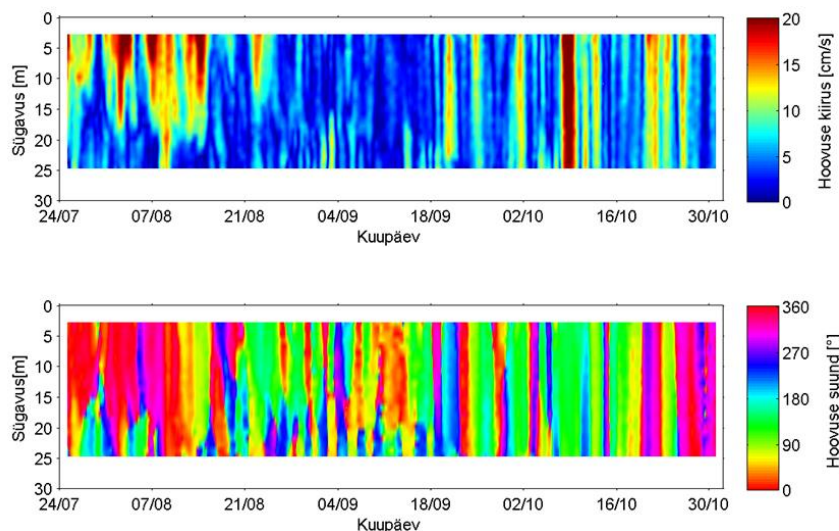
Kõigepealt vaatame hoovuse kiiruse vektori u- ja v-komponente. Hoovuste ida ja põhjasuunaliste komponentide sügavus-aeg jaotused on toodud joonisel 3.2.1.8. Joonistelt nähtub, et suvi-sügis perioodil madalas meres hoovus oli sügavusega kihistunud kuni tormiste ilmade alguseni oktoobri keskel. Tugevaid kõrgsagedusega perioodilisi võnkumisi esines vaid augustis. Seepärast siin edaspidi keskendume keskmistatud hoovuse kiiruse analüüsile nagu esimese mõõdistuse puhul.



Joonis 3.2.1.8. Suvi-sügis perioodil 2023. a. KihnuW jaamas keskmistamata kiiruse u-komponent ja üle 36 tunni keskmistatud u-komponent (vastavalt ülemised 1 ja 2 paneel). Keskmistamata kiiruse v-komponent ja üle 36 tunni keskmistatud v-komponent (vastavalt alumised 3 ja 4 paneel).

Hoovuse kiiruse ja suuna sügavuse-aja jaotus vaadeldava suvi-sügis vaatlusperioodi jooksul näitas, et esines neli lühemaajalist perioodi, mille kestel 36-h keskmistatud hoovuse kiirus ületas 20 cm/s (kokku 6 päeva vältel, joonis 3.2.1.9). Need suuremad kiirused vaadeldi kas NW või E suunal. Kuni oktoobri kuuni oli hoovus kahekihiline. Ülemises kihis, mis ulatus 10-20

meetriini, oli tunduvalt tugevam hoovus kui allpool (Joonis 3.2.1.9). Alumise kihi hoovus oli suunatud kuni 90 kraadi paremale võrreldes ülemise kihi hoovusega.

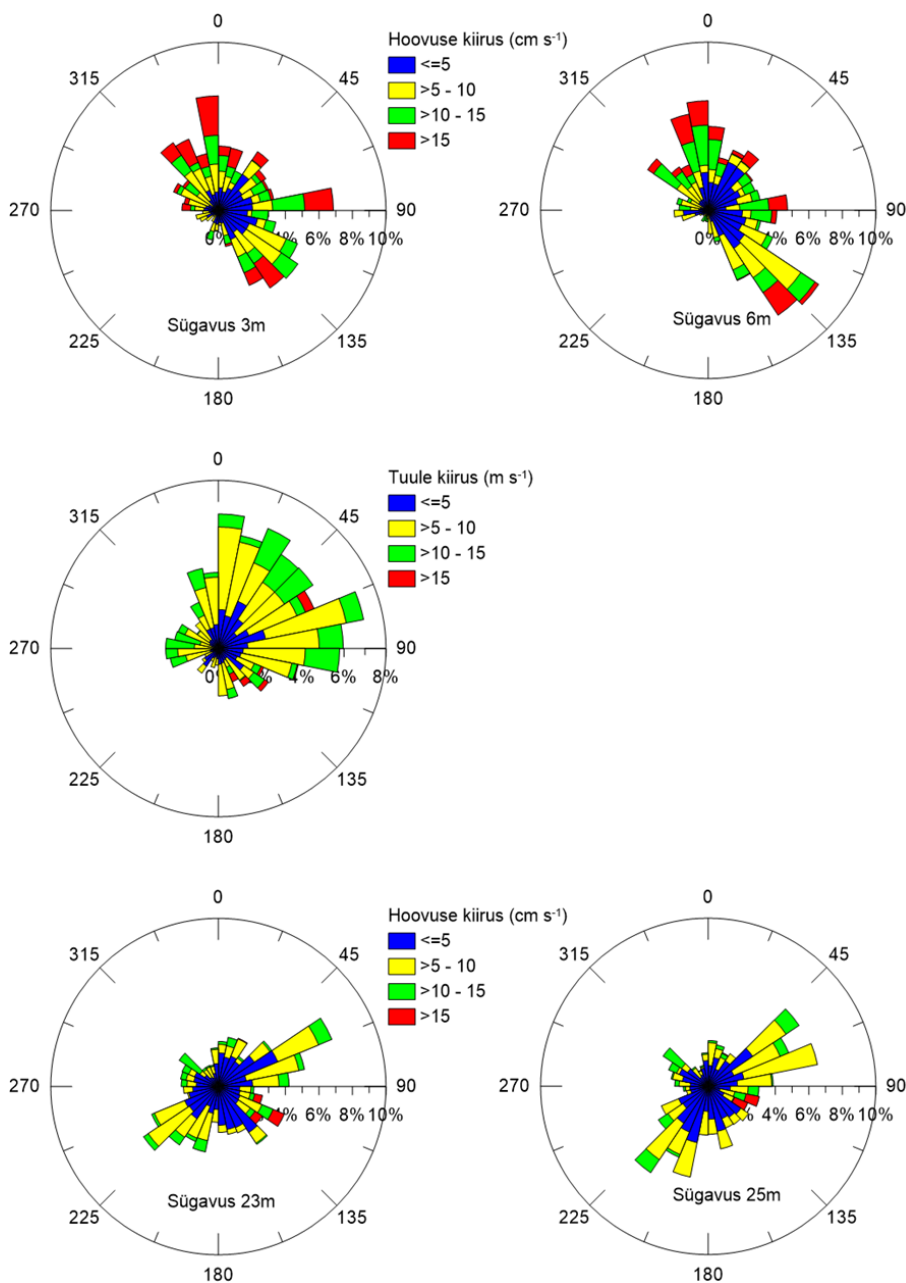


Joonis 3.2.1.9. Suvi-sügis perioodil KihnuW jaama hoovuse kiirus ja suund (filtreeritud andmed, lühemad kui 36 h perioodid on välja filtreeritud ehk keskmistatud).

Hoovusteroosi abil analüüsisime hoovuse suundade jaotust ja nendes suundades kiiruste jaotust kahel sügavusel ülemises kihis – vastavalt 3 ja 6 m sügavusel ja kahel sügavusel põhjalähedases kihis – vastavalt 23 ja 25 m sügavusel (joonis 3.2.1.10). Üldises plaanis oli hoovus suunatud ülemises kihis sektoritesse NNW ja SE ning alumises kihis sektoritesse SW ja ENE. Põhjalähedases kihis kõige tugevamad hoovused olid NNW suunas ja põhjalähedases kihis ESE suunas.

Sarnaselt esimese mõõdistusega iseloomustame kogu mõõtmisperioodi keskmisi hoovuseid nende keskmise kiiruse, maksimaalse kiiruse, vektorkeskmise kiirusvektori suuruse ja suuna ning hoovuse suuna püsivuse parameetrite abil (tabel 4). Hoovuse keskmine kiirus oli suurim pinnakihis – 8,1 cm/s ja väiksem põhjakihis – 5,2 cm/s. Suurim maksimaalne kiirus mõõdeti 5 m sügavusel 26,0 cm/s; väikseim maksimaalne kiirus mõõdeti põhjalähedases kihis 25m sügavusel 19,3 cm/s. Mõõtmisperioodi resultantkiiruse (vektorkeskmise kiiruse) moodul muutus sügavusega pinnalt põhjani vastavalt 2,5 ja 0,8 cm/s. Hoovuse püsivuse parameeter oli pinnakihis suurim; ligikaudu 30% ja põhjakihis väiksem, 15%. Pinnakihis vaadeldud

hoovuse püsivuse parameetri väärtused on võrreldavad Soome lahe pinnakihi väärtustega, mis on 30 % ümbruses.



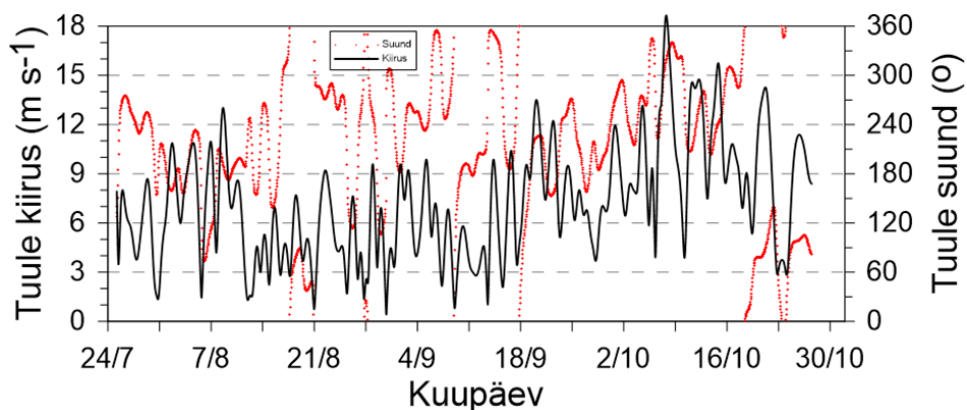
Joonis 3.2.1.10. Suvi-sügis perioodil KihnuW jaama hoovusteroos pinnalähedastel sügavustel 3 ja 6 m (ülemised kaks alamjoonist) ja põhjalähedastel sügavustel 23 ja 25 m (alumised kaks alamjoonist). Keskmine alamjoonist näitab tuulevektori suundi mõõtmisperioodil.

Tabel 4. Hoovuse kiiruse keskmised, maksimaalsed väärtused ning hoovuse suuna püsivus vastavalt mõõtmis sügavusele (tähistused on samad, mis Tabelis 3)

Süg (m)	k_m (cm/s)	max_m (cm/s)	k_u (cm/s)	k_v (cm/s)	k_vm (cm/s)	Püs (%)
3	8.1	23.8	1.6	1.9	2.4	30.
4	8.0	24.2	1.6	1.9	2.5	31.
5	7.7	26.0	1.6	1.8	2.3	30.
6	7.6	23.9	1.5	1.6	2.2	29.
7	7.3	23.1	1.5	1.5	2.1	29.
8	7.1	23.7	1.4	1.4	2.0	28.
9	7.0	23.5	1.4	1.3	1.9	27.
10	6.8	23.5	1.4	1.2	1.9	27.
11	6.6	23.4	1.3	1.1	1.7	25.
12	6.5	23.5	1.3	0.9	1.6	24.
13	6.3	23.0	1.2	0.9	1.5	24.
14	6.2	23.0	1.2	0.8	1.4	22.
15	6.0	22.6	1.1	0.7	1.3	21.
16	5.8	23.1	1.2	0.7	1.4	23.
17	5.9	21.8	1.1	0.5	1.2	20.
18	5.6	22.1	1.1	0.5	1.2	21.
19	5.6	21.9	1.2	0.4	1.2	22.
20	5.4	21.3	1.0	0.2	1.0	18.
21	5.3	21.2	1.0	-0.1	1.0	18.
22	5.2	21.2	0.8	-0.3	0.9	16.
23	5.3	21.4	0.7	-0.5	0.8	15.
24	5.3	20.7	0.9	-0.4	1.0	18.
25	5.2	19.3	0.9	-0.4	0.9	18.
kesk	6.4	22.7			1.6	24

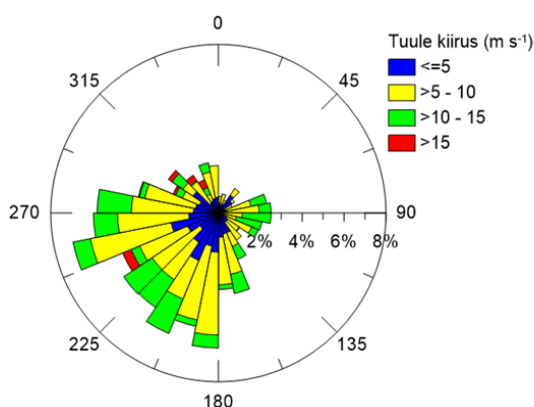
Ligikaudu kolme kuu pikkust suvi-sügist mõõtmisperioodi iseloomustasid perioodi esimeses pooles puhuvad mõõdukad tuuled (ainult 9/08 puhus tuul üle 12 m/s). Alates 21/09 kuni

perioodi lõpuni vaheldusid tugevad tuuled üle 12 m/s nõrgemate tuultega. Tuul puhus üle 18 m/s 9. oktoobril (joonis 3.2.1.11). Keskmine tuule kiirus mõõtmisperioodi jooksul oli 7,2 m/s.



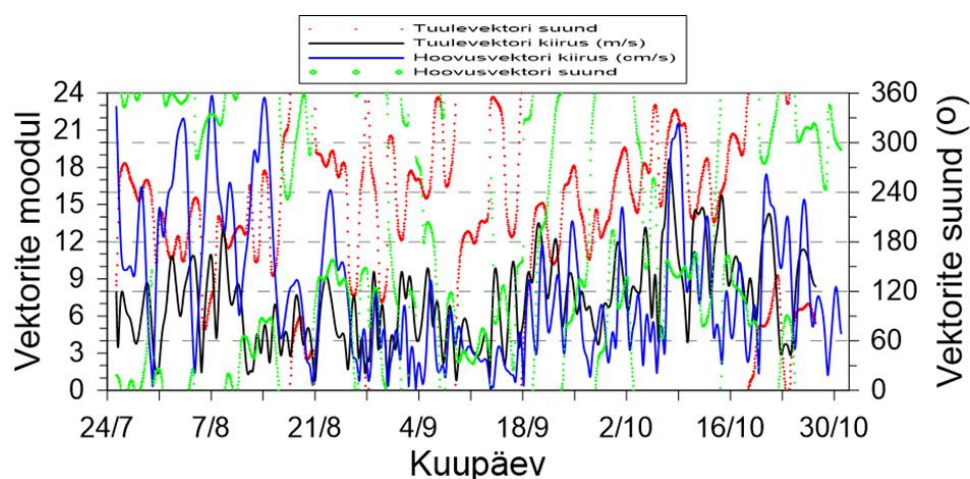
Joonis 3.2.1.11. Tuule kiirus ja suund (filtreeritud andmed, lühemad kui 36 h perioodid on välja filtreeritud ehk keskmistatud, tuule suund näitab, mis suunast tuul puhub).

Hoovuse seost tuultega vaatleme joonise 3.2.1.12 abil, mis iseloomustavad sagedamini esinevaid hoovuste ja tuule suundi. Sagedamini esinevad tuuled on lõuna ja lääne vahelisest sektorist (joonis 3.2.1.12). Kuna suvisel perioodil on voolamine kahekihiline, siis põhjalähedased hoovused on suunatud pigem vastutuult. Ülakihis hoovused otseselt tuulevektori suunda ei jälgi, st hoovused on mõjutatud ka teistest teguritest peale tuule poolt tekitatud triivi (joonis 3.2.1.12).



Joonis 3.2.1.12. Tuulteroosi joonisel on esitatud suvi-sügis mõõtmisperioodi tuulte suunad ja tuulte kiiruste jaotus vastavalt värviskaalaga eristatud klasside jaoks.

Hoovuste ja tuule tugevuse vahelist korrelatsiooni hindame joonise 23 abil. Hoovuse kiirus järgis tuule kiirust alates 16. augustist. Mõõtmisperioodi 3 esimese nädala jooksul jälgiti perioodiliselt (perioodiga 2 kuni 4 päeva) väga tugevaid hoovuseid suhteliselt mõõduka tuule tingimustes. Samasse ajavahemikku jäid ka kõrgsagedusega perioodilised hoovuse võnkumised. Keskmiselt moodustas pinnalähedase kihi hoovuse kiirus tuule kiirusest 1.1% (ehk siis 10 m/s tuulekiiruse puhul oleks hoovuse kiiruseks 11 cm/s).



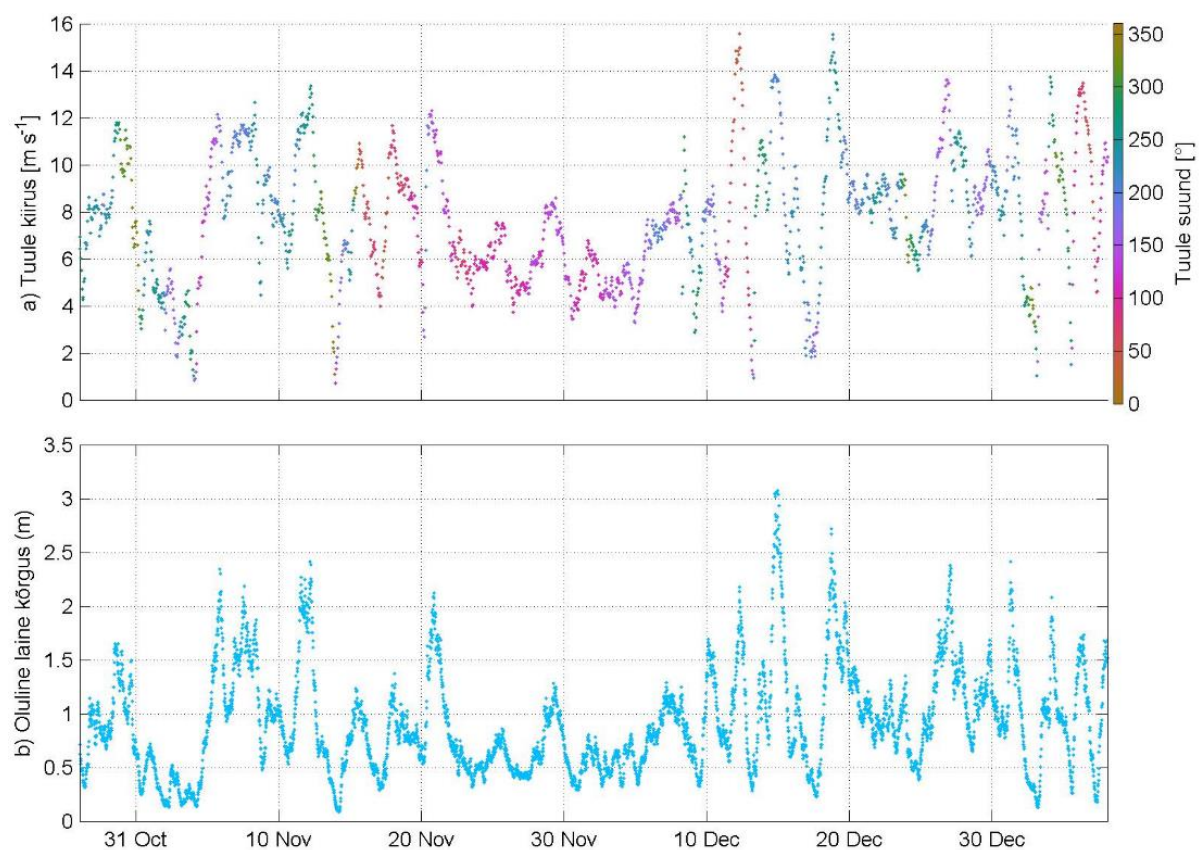
Joonis 3.2.1.12. Suvi-sügis perioodil KihnuW jaama tuulevektori ja hoovusvektori (3 meetri sügavusel) moodul (kiirus) ja suund (filtreeritud andmed, lühemad kui 36 h perioodid on välja filtreeritud ehk keskmistatud).

3.2.2. Lainetus

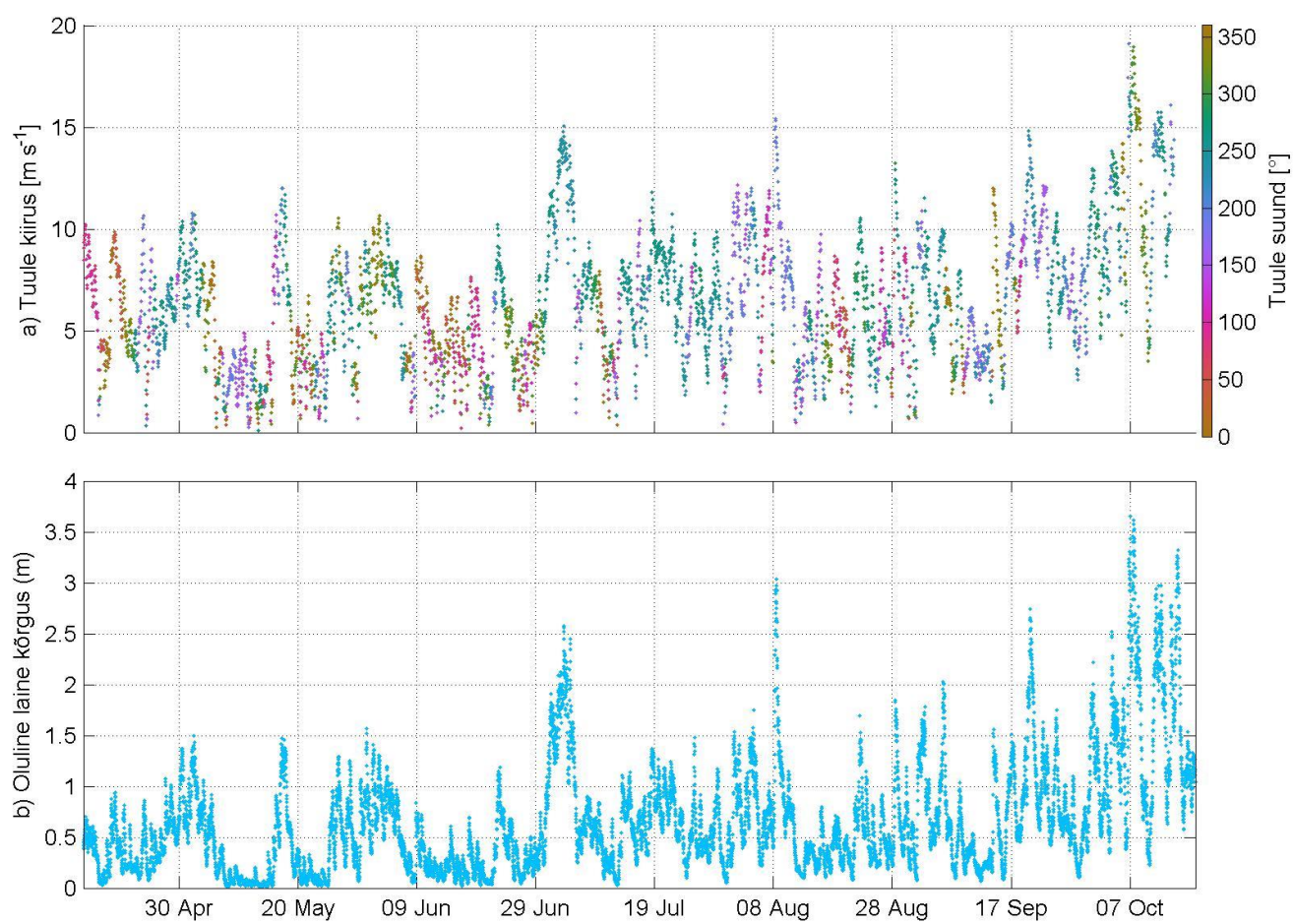
Mõõdetud olulise laine kõrguse aegrida asukohas KW perioodil oktoober 2022 kuni jaanuar 2023 on toodud joonisel 3.2.2.1. Perioodi keskmine oluline laine kõrgus oli 0,91 m; mis on üle modelleerimise põhjal hinnatud pikaajalise keskmise (Tuomi et al., 2010). Aegreast on näha, et suurimad lained esinevad piirkonnas lõuna-, edela ja läänekaarte tuultega. Kõige kõrgem oluline laine kõrgus (3,1 m) registreeriti, kui edelatuule 1-h keskmine kiirus ulatus 15 m/s.

Mõõdetud olulise laine kõrguse aegread jaamades KR ja KW, perioodil aprill kuni oktoober 2023 on toodud joonistel 3.2.2.2 ja 3.2.2.3. Perioodi keskmine oluline laine kõrgus mõlemas

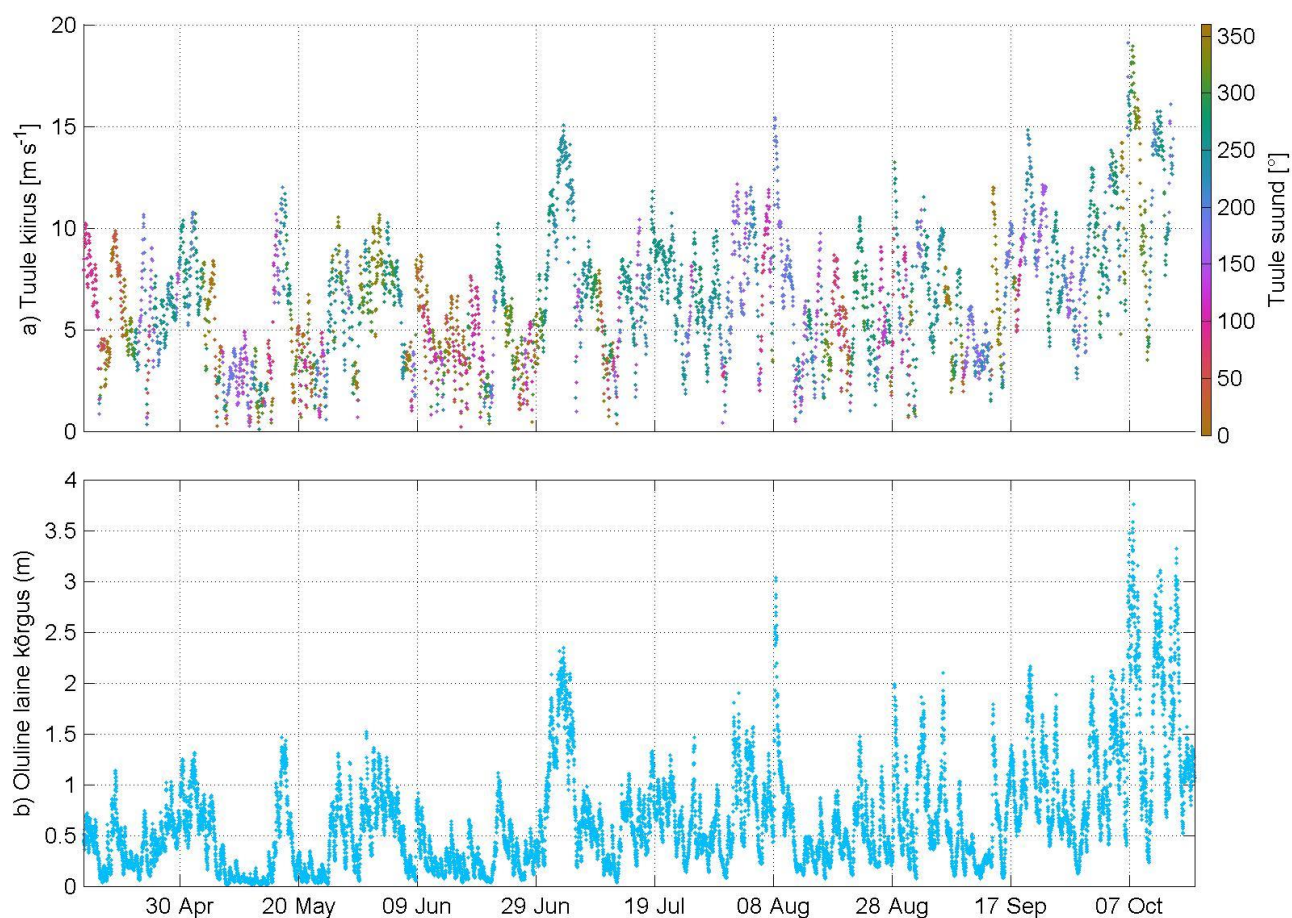
asukohas oli 0,65 m. Kuni juuli alguseni ei ulatunud oluline laine kõrgus üle 1,5 m. Juuli algul aset leidnud tugevam edela-läänekaare tuuleimpulss tõstis olulise laine kõrguse 2,3 m ja 8. augustil aset leidnud lõunatuule sündmus üle 3 m. Augusti lõpust oktoobri alguseni leidis aset mitmeid sündmuseid kui oluline laine kõrgus tõusis 1,9-2,1 m. Oktoobri esimesel pooles toimus lühikese perioodi jooksul kolm tormi, kui tuule kiirus ületas 15 m/s ja oluline laine kõrgus 3 m. Seejuures 6-7. okt ületas 1-h keskmine tuule kiirus 19 m/s ja oluline laine kõrgus ulatus 3,6-3,8 m. Antud sündmuse käigus puhusid kõigepealt tugevad edela- ja läänekaarte tuuled; seejärel ca pool päeva põhja-loodekaarte tuuled ja lõpuks uuesti lääne-, edelatuuled. Võttes arvesse, et piirkonnas võivad esineda oluliselt tugevamad edelakaarte tuuled, siis võib eeldada, et ka olulise laine kõrguse maksimum on suurem. 2005. jaanuaritormi ajal ulatus 10-min keskmine tuule kiirus Ruhnu meteojaamas 23 m/s (Suursaar et al., 2006). Tuomi et al. (2010) modelleerimistulemused viitavad, et maksimaalne oluline laine kõrgus Liivi lahe idaosas võib olla üle 5 m. Seda kinnitavad ka Copernicuse mereteenuse mudelprodukti andmed (<https://doi.org/10.48670/moi-00014>, väljavõte on tehtud jaamale KW lähimas mudelipunktis), mille põhjal on aastatel 1993-2022 olnud neli tormi, milles on oluline laine kõrgus piirkonnas olnud 5 m kandis või veidi enamgi. Seejuures kõige kõrgem laine kõrgus mudelarvutuste järgi esineski 2005. jaanuaritormi ajal ning viimane sündmus, kui oluline laine kõrgus tõusis 5 m kanti esines 26. septembril 2018.



Joonis 3.2.2.1. Tuule kiirus ja suund (1-h intervalliga); oluline laine kõrgus (ca 22 min intervalliga) oktoobrist 2022 jaanuarini 2023 KW jaamas.



Joonis 3.2.2.2. Tuule kiirus ja suund (1-h intervalliga); oluline laine kõrgus (arvutatud ca 22 min intervalliga) arpillist oktoobrini 2023 KW jaamas.



Joonis 3.2.2.3. Tuule kiirus ja suund (1-h intervalliga); oluline laine kõrgus (arvutatud ca 22 min intervalliga) arpillist oktoobrini 2023 KR jaamas.

3.2.3. Veesamba parameetrid

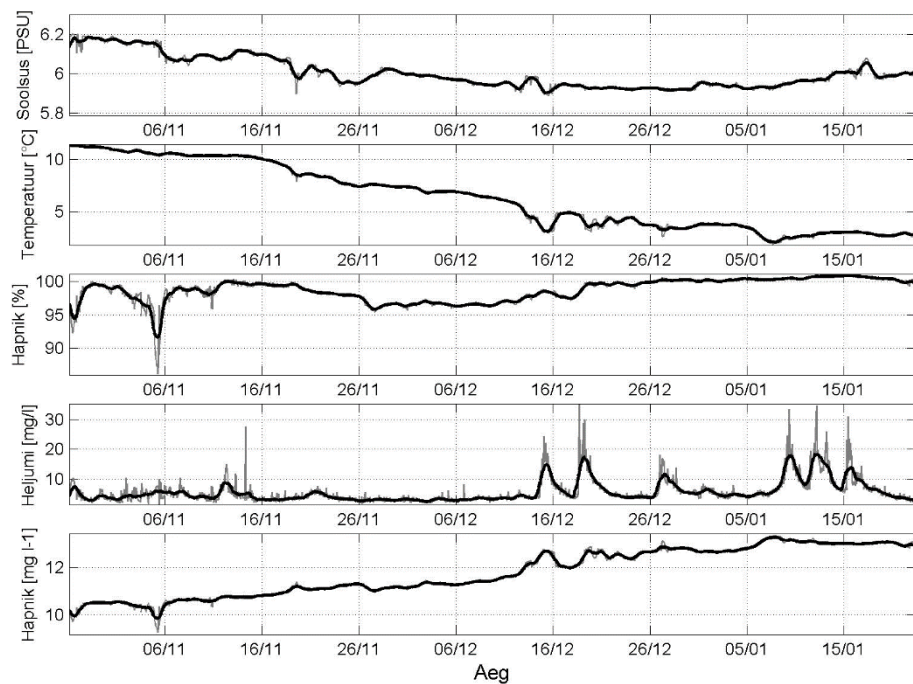
Sügis-talvine mõõdistus

Põhjalähedases kihis mõõdetud soolsus, temperatuur ja heljumi sisaldus oktoobrist 2022 kuni jaanuarini 2023 on esitatud joonisel 3.2.3.1. Temperatuur langes perioodil ca 11 °C oktoobri lõpus kuni ca 4-5 °C detsembris. Samal ajavahemikul on vaadeldav soolsuse langus ca 6,2 6,0 g/kg; mis tõenäoliselt markeerib vertikaalset segunemist. Ruhnu süvikus TalTechi poolt tehtud mõõtmised viitavad, et kogu Liivi lahe vesi segunes pinnalt põhjani läbi novembri teises pooles. Siin madalamas piirkonnas leidis see aset ilmselt mõnevõrra varem.

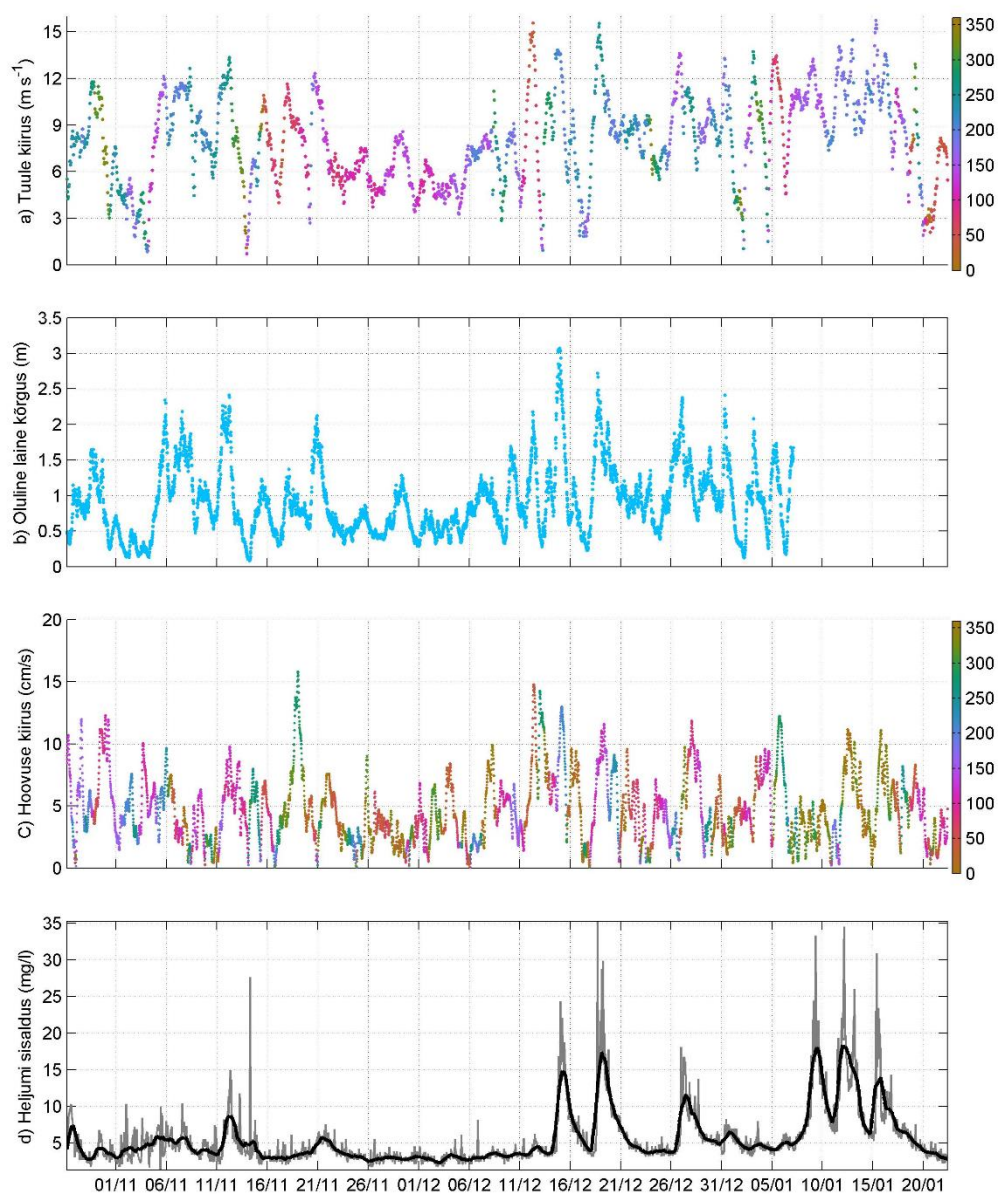
Detsembri teisest poolest alates on aegreas näha jahedama ja soojema vee vaheldumine, mis esialgu on näha ka soolsuse muutlikkuses. See varieerumine näitab ühest küljest mere jahtumist läbi soojusvahetuse atmosfääriga. Teisalt on näha naaberaladelt ja/või sügavamalt pärit soojema ja soolasema veemassi saabumist mõõtmispunkti. Avamerel jahtub vesi aeglasemini ja on võrreldes rannikuveega soojem ning võrreldes Pärnu lahest pärit veega soolasem. TalTechi poolt samal perioodil Ruhnu süviku põhjakihis (50 m sügavusel) mõõdetud soolsus muutus enamasti vahemikus 6-6,2 PSU (g/kg), st. arvestatavat haliinset stratifikatsiooni Liivi lahe põhjakihi ja käesolevas asukohas 28 m sügavuse vahel ei esinenud. Jaanuaris langes temperatuur 2-3 °C, st. temperatuur varieerus antud soolsusele vastavas maksimumtiheduse piirkonnas.

Põhjalähedane heljumi sisaldus oli enamasti vahemikus 2-7 mg/l (joonis 3.2.3.1). Heljumi kõrgemaid väärtuseid põhjustab potentsiaalselt sette resuspensioon lainetuse, tugeva hoovuse tõttu või sette kanne naabermerealadelt. Ei saa ka välistada kahe eelneva kombinatsiooni, st. naaberpiirkonnas (nt. madalamas piirkonnas) toimub resuspensioon ja hiljem kantakse heljumirikas vesi edasi mõõtmispiirkonda. Heljumi tõus 10 mg/l toimus korduvalt; kogu aegreast moodustas periood, kui heljumi sisaldus oli 10 mg/l või enam ca 10%. Mõõtmisperioodil esines viis juhtumit kestusega mõned tunnid kuni ööpäev, mil heljumi sisaldus ületas 20 mg/l.

Juhtumid leidsid aset detsembris ja jaanuaris, ja need saab siduda tugeva tuule sündmustega. Lainetuse aegrida katab neist ainult kaks sündmust ja mõlemal juhul on heljumi leviku ajalise maksimumi ajal ka laine kõrguse maksimum. Esimesel juhul ulatus oluline laine kõrgus 3,1 m ja teisel juhul 2,8 m. Kõigil viiel juhtumil puhusid edela- või lõunakaarte tuuled kiirusega vähemalt 13 m/s. Selliste tuule suundadega on lainete hoovõtumaa piisavalt pikk sedavõrd kõrgete lainete genereerimiseks vastupidiselt näiteks idakaarte tuulele. Nt 11-12. detsembril ida-kirde tuule impulss kiirusega 15-16 m/s tõstis olulise laine kõrguse vaid 2,2 m lähedale ja märkimisväärset heljumi sisalduse tõusu ei esinenud. Viiest kõrge heljumi kontsentratsiooni juhtumist neljal on näha ka tugevamat (11-13 cm/s) põhjalähedast hoovust (4 m põhjast). Samas on aegreas ka mitmeid sündmuseid kui hoovuse kiirus oli vähemalt sama suur ja sedavõrd suurt tõusu heljumi leviku sisalduses ei kaasnud. Seega võib eeldada, et tugevamad heljumi leviku sisalduse tõusu juhtumid sügis-talvisel perioodil olid seotud pigem lainetusest tingitud sette resuspensiooniga.



Joonis 3.2.3.1. Soolsus, temperatuur, heljumi sisaldus ja hapniku sisaldus oktoobrist 2022 jaanuarini 2023 jaamas KW. Mõõtmistulemused on toodud 1-h sammuga (hall), samuti on toodud 24-h filtriga silutud väärtused (must).



Joonis 3.2.3.2. Tuule kiirus ja suund; oluline laine kõrgus, põhjalähedase hoovuse kiirus ja suund, ja heljumi sisaldus oktoobrist 2022 jaanuarini 2023, jaamas KW. Tuule kiirus ja suund on 36-h filtriga silutud. Heljumi sisalduse mõõtmiste puhul on toodud 1-h sammuga (hall) ja 24-h filtriga silutud väärtused (must). Hoovus on toodud 1-h ja lainetus ca 20 min intervalliga.

Suvine, sügisene mõõdistus

Veesamba parameetrite (temperatuur, soolsus, tihedus ja klorofüll-a sisaldus) vertikaalse jaotuse ajaline muutlikkus 25. juulist kuni 10. augustini on esitatud joonistel 3.2.3.3-3.2.3.6.

Temperatuur oli pinnal valdavalt 17-18 °C, mere põhja lähedal vahemikus 4-8 °C. Mõõdistusperioodi jooksul suurenes soojema ülemise kihi vertikaalne ulatus 15 meetrilt 20 meetrini. Sarnane tendents on näha ka soolsuse jooniselt, kus ülemise magedama veekihi paksus suurenes ja sügavamal soolasema veekihi paksus vähenes. Tiheduse andmete järgi tulevad kõige paremini välja lühiajalised intensiivsed vertikaalse segunemise või daunvellingu perioodid, mil veesamba parameetrid on peaaegu kogu ulatuses homogeensed. Sellised episoodid esinesid 25-26. juulil ja 1. ning 8. augustil.

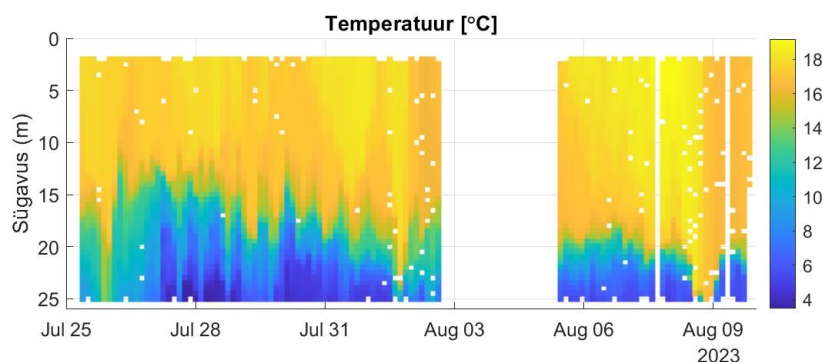
Joonistelt 3.2.3.3-3.2.7 on näha, et üldiselt segunenud kihi paksus kasvas ajas, kuigi on märgata ka lühiajalist muutlikkust. Lõuna ja edelatuulte mõju tingib profileerija piirkonnas mereveetaseme tõusu ja seetõttu liigub termokliin sügavamale. 8. augusti tugeva lõunatuule sündmusega liikus termokliin veel sügavamale ja toimus veesamba segunemine. Kuna aga stratifikatsioon taastus, siis oli põhjani peaaegu homogeenne veemass tingitud pigem daunvellingust. Juuli lõpu, augusti alguse pinnaalused soolsuse maksimumid on seletatavad soolasema vee levikuga Suurest väinast. Juuli keskel esines põhjakaarte tuuli, mis võis tingida soolasema veemassi liikumise Suurest väinast lõunapoole, Liivi lahe poole. Sellele järgnesid tuuled edelast, mis võisid veemassi liigutada edasi mööda Liivi lahe kirde osa lõuna poole.

Augusti algusest kuni 23. septembrini püsis merepinna temperatuur valdavalt üle 17 kraadi (joonis 3.2.3.9, ERA5 andmete põhjal), tuule kiirused jäid enamasti alla 8 m/s. Merepõhja punktmõõdistuse (2 meetrit põhjast) andmete põhjal püsis soolsus 6 PSU (g/kg) ümber, temperatuur 5-7 kraadi vahel ja hapnik langes 8 mg/l kuni ~1 mg/l (joonised 3.2.3.8). Eelneva põhjal võib järeldada, et põhjalähedane kiht oli stratifitseeritud, mis tõttu füüsikalised parameetrid jäid üsna sarnaseks augusti algusest 23. septembrini ja mis põhjustas hapniku languse antud piirkonnas (ülemisest veesambast eraldatud põhjakihis saab hapnik langeda kui orgaanilise materjali lagunemise käigus kasutatavale hapnikule ei tule piisavalt lisa nt vertikaalse segunemise käigus). 23. septembrist kuni 3. oktoobrini toimus kaks sündmust, mille käigus põhjalähedane temperatuur ja hapnikusisaldus suurenesid ja soolsus vähenes. See on seletatav valdavate lõunatuulte esinemisega, mis suurendasid vertikaalset segunemist, põhjustasid termokliini sügavamale liikumist ja/või põhjustasid daunvellinguid.

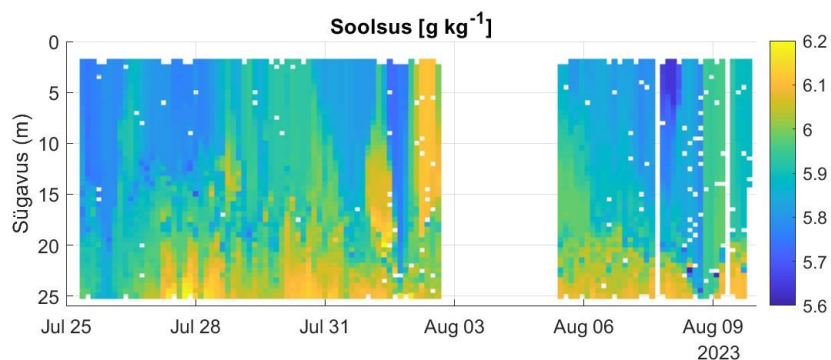
Peale septembri teise poole tugevamaid lõunatuule episoodide, kus oluline lainekõrgus oli kohati üle 3 meetri (joonis 3.2.3.10), tõusid põhjalähedased hapnikusisaldused ~100%-ni, temperatuur oli valdavalt üle 10 kraadi ja soolsus 5,8-6 PSU (g/kg). ERA5 andmetel langes merepinna temperatuur septembri teisest poolest oktoobri keskpaigani 16 kraadilt 10 kraadini (joonis 3.2.3.9). Septembri lõpust oktoobri keskpaigani esinesid tugevamad tuuled. Kuigi antud

perioodi kohta puuduvad vertikaalsed profiilid, võib väita, et veesamba sügisene läbisegunemine leidis aset oktoobri keskel.

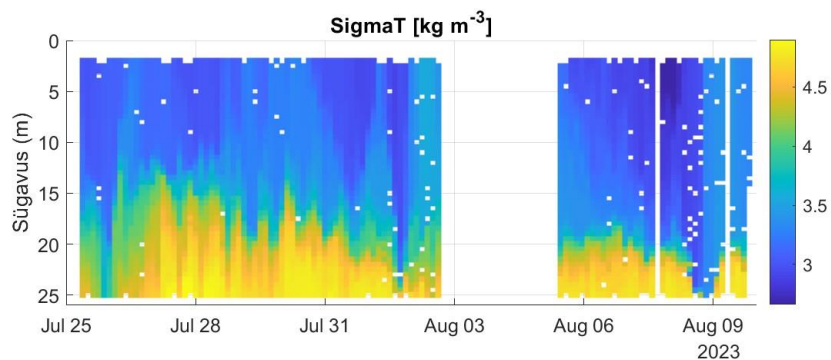
Sarnaselt esimese mõõditusperioodile olid kõrged heljumi sisalduse sündmused seotud tugevate tuulte poolt genereeritud laine- ja hoovussündmustega. Kui oluline laine kõrgus ületas 3 m, ulatusid heljumi aegrea maksimumid samaaegselt üle 30 mg/l, kohati üle 40 mg/l.



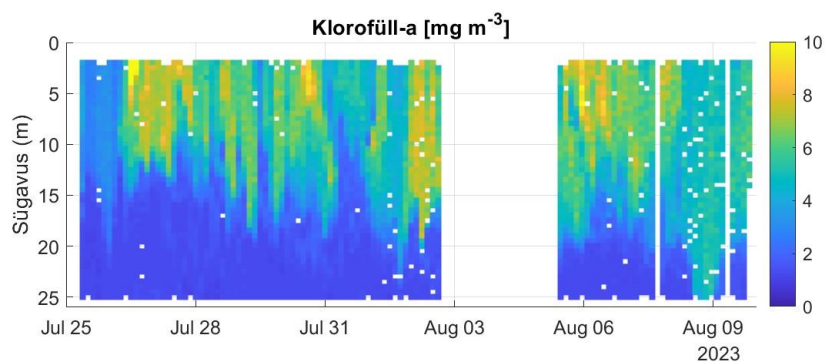
Joonis 3.2.3.3. Temperatuuri vertikaalse jaotuse ajaline muutlikkus.



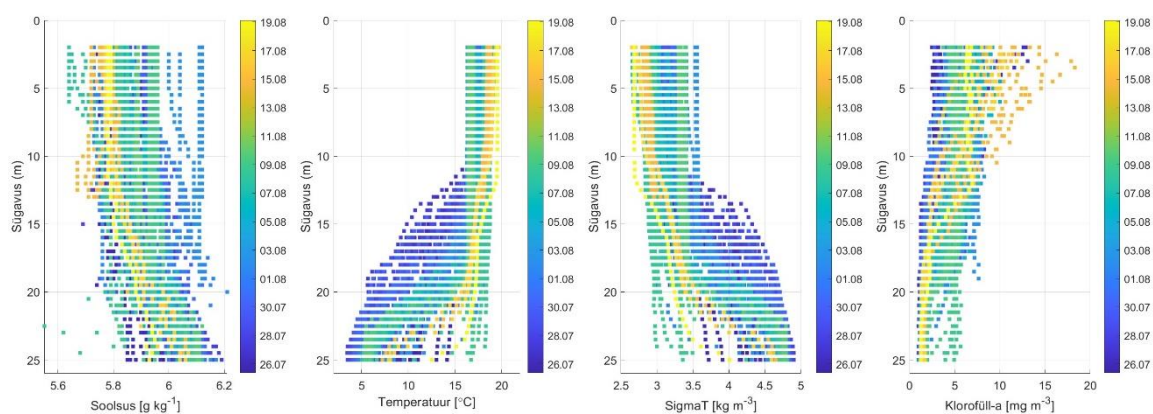
Joonis 3.2.3.4. Soolsuse vertikaalse jaotuse ajaline muutlikkus.



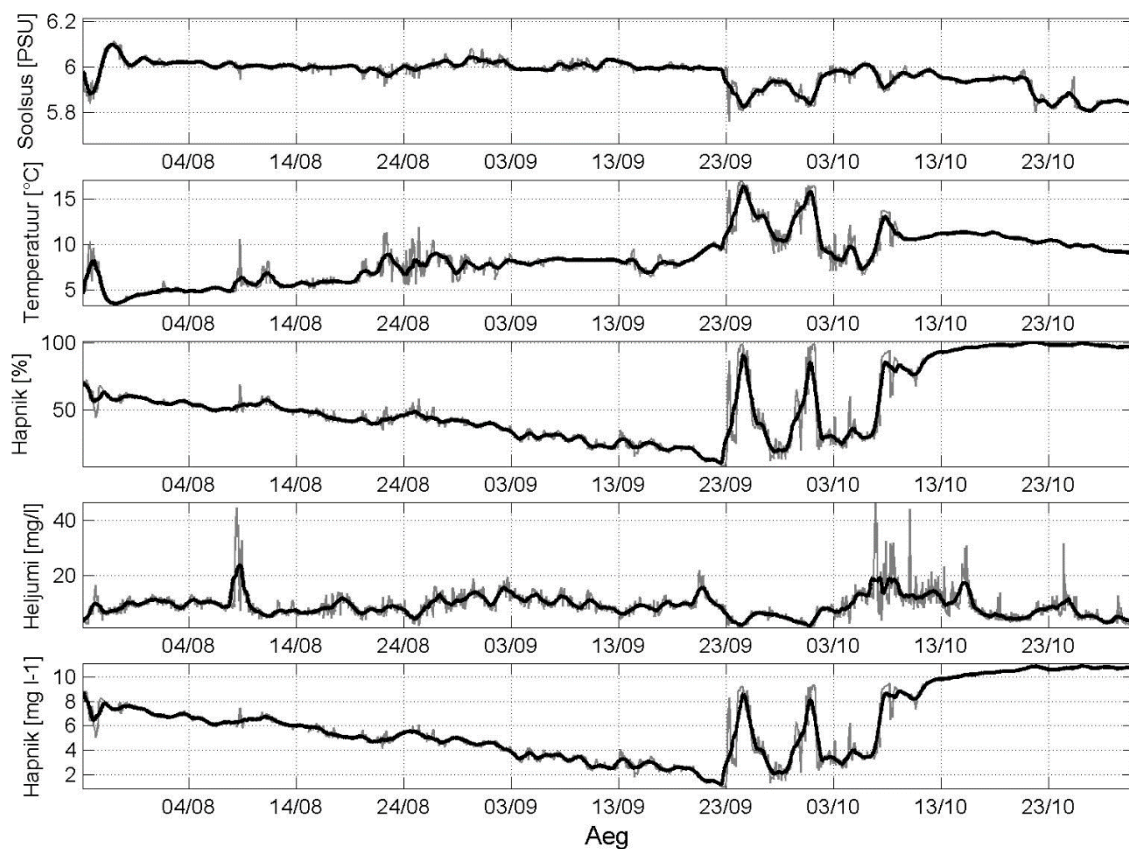
Joonis 3.2.3.5. Tiheduse vertikaalse jaotuse ajaline muutlikkus.



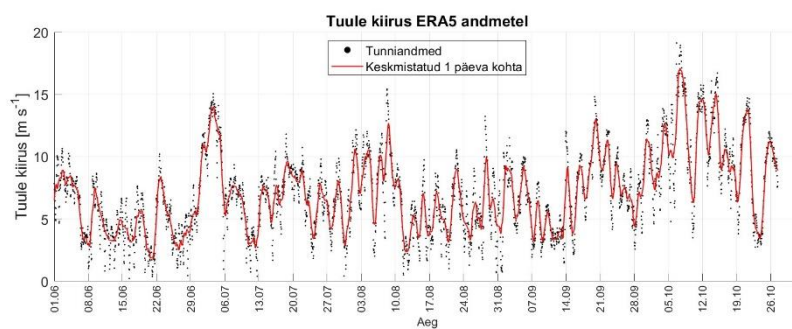
Joonis 3.2.3.6. Klorofüll-a vertikaalse jaotuse ajaline muutlikkus.

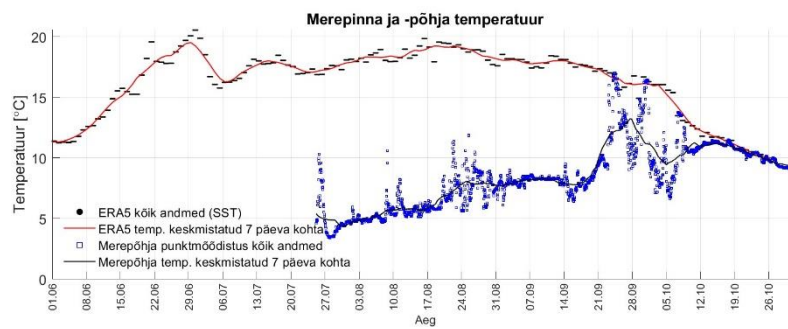


Joonis 3.2.3.7. Soolsuse, temperatuuri, tiheduse ja klorofüll-a vertikaalsed profiilid 25. juulist kuni 19. augustini 2023.

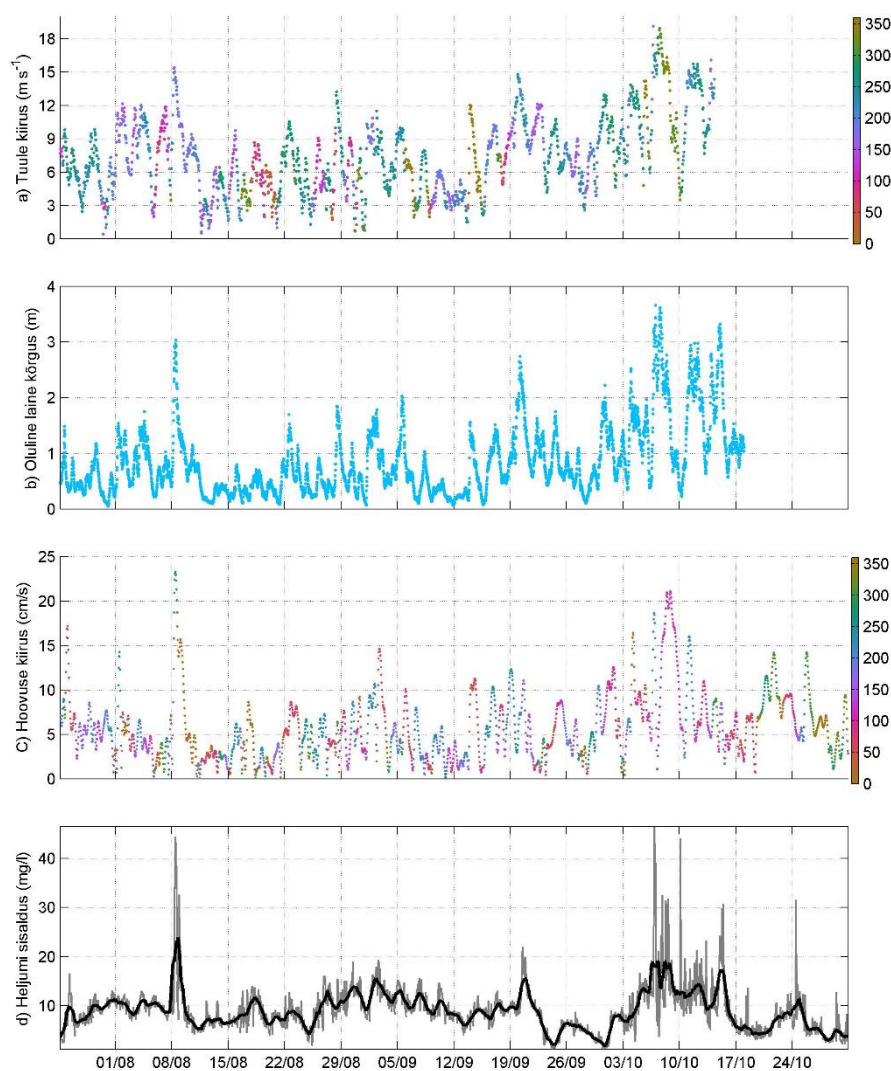


Joonis 3.2.3.8. Soolsus, temperatuur, heljumi sisaldus ja hapniku sisaldus juulist oktoobrini 2023 jaamas KW. Mõõtmistulemused on toodud 1-h sammuga (hall), samuti on toodud 24-h filtriga silutud väärtused (must).





Joonis 3.2.3.9. Tuule kiirus (tunniantmed ja 1-päeva libisev keskmine) ERA5 andmetel (ülemine paneel). Merepinna temperatuur ERA5 andmetel ja mere põhjalähedane temperatuur jaamas KW (tunniantmed ja 7-päeva libisev keskmine).

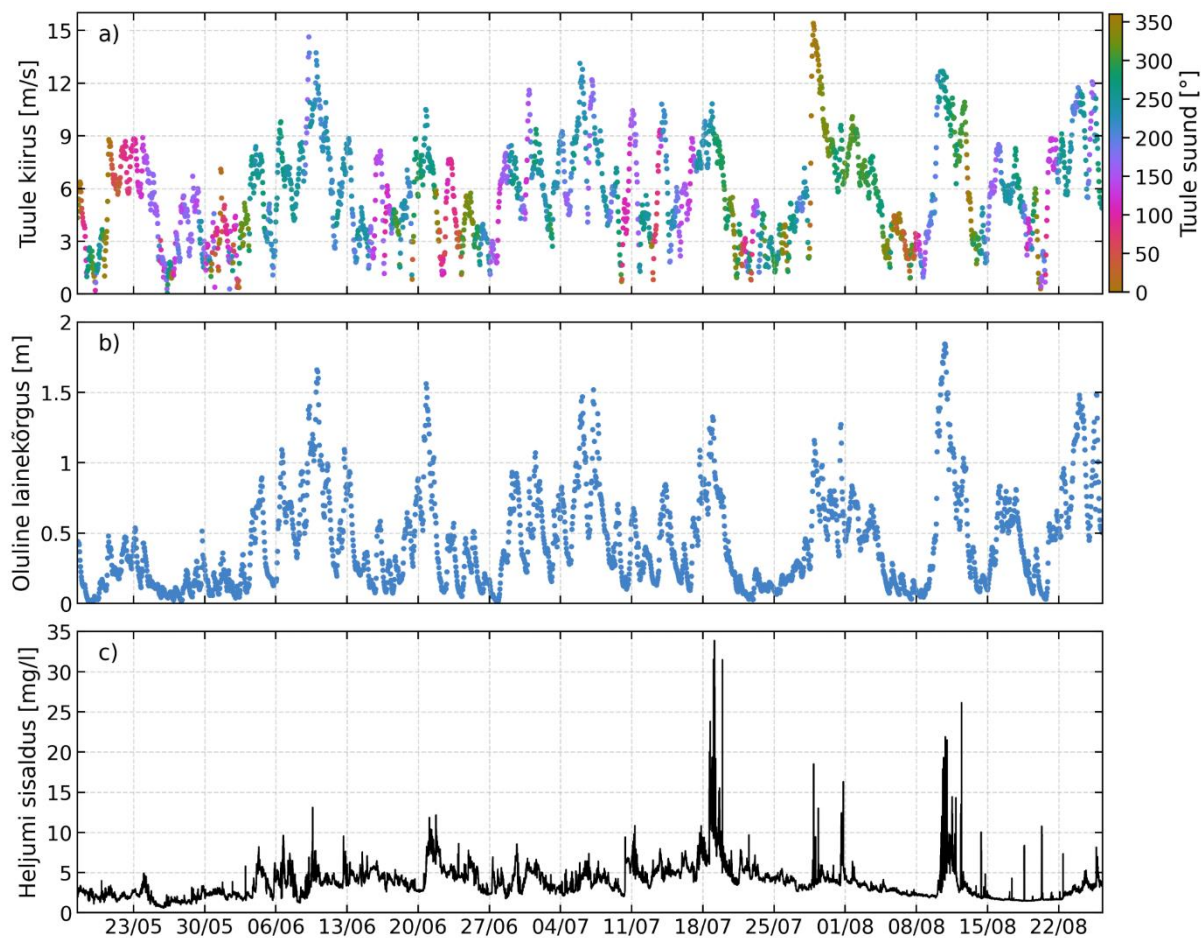


Joonis 3.2.3.10. Tuule kiirus ja suund; oluline laine kõrgus, põhjalähedase hoovuse kiirus ja suund, ja heljumi sisaldus juulist oktoobrini 2023, jaamas KW. Tuule ja hoovuse kiirus ja suund on 36-h filtriga silutud. Heljumi sisalduse mõõtmiste puhul on toodud 1-h sammuga (hall) ja 24-h filtriga silutud väärtused (must). Lainetus on toodud ca 20 min intervalliga.

Mõõdistus kaablitrossil

2024. maist augustini mõõtis eksportkaablitrossil hägusust poijaamaga installeeritud andur. Anduri näidud kalibreeriti veeproovidest määratud heljumi sisaldusega. Alloleval joonisel

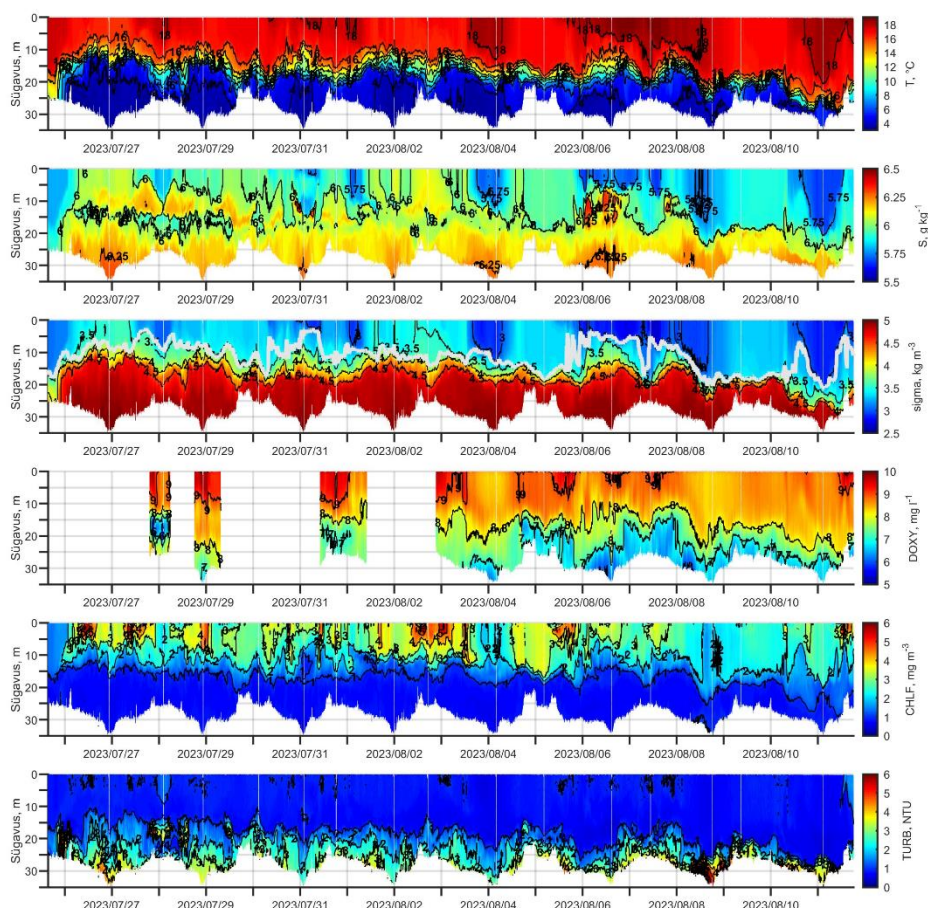
3.2.3.11 on väärtused esitatud heljumi sisaldusena. Heljumi sisaldus oli valdavalt kuni 5 mg/l, kuid leidis ka sündmuseid, mis kontsentratsioon tõusis >10 mg/l. Aegreas esines kaks sündmust, kui sisaldus tõusis >20 mg/l. Suuremad heljumi sisalduse tõusud olid seotud tugevama tuule- ja kõrgema lainetuse sündmustega. Mitte päris iga tuule ja laine sündmus ei kergitanud heljumi sisaldust võrdväärselt kõrgeks. Ilmselt mängis sündmuste juures rolli ka hoovuse suund ja kiirus. Selge on, et arvestavad heljumi sisalduse tõusu sündmused esinevad kaablitrassi piirkonnas ka looduslikult.



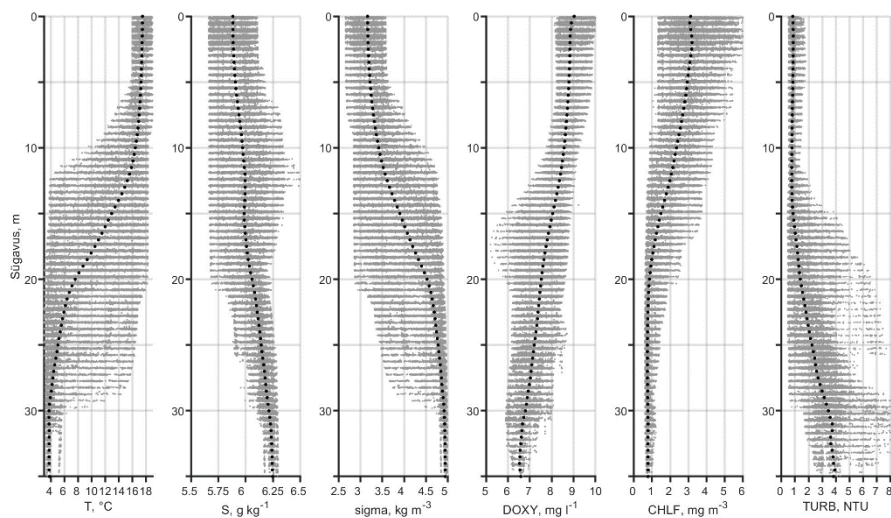
Joonis 3.2.3.11. Tuule kiirus ja suund; oluline laine kõrgus ja heljumi sisaldus kaablitrassi piirkonnas. Tuule andmed pärinevad ERA 5 reanalüüsi produktist ja laine kõrgused lähipiirkonnast Copernicuse mereteenusest.

3.3. Liuguri mõõtmised

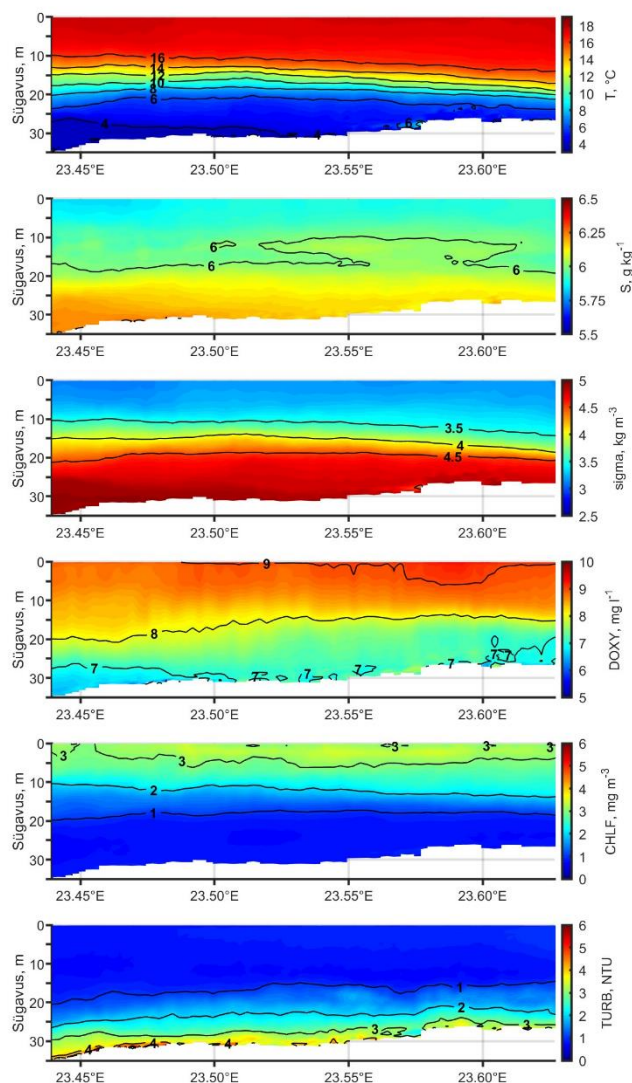
Järgnevas peatükis on käsitletud liuguri mõõdistuse tulemusi. Joonisel 3.3.1 ja 3.3.2 on esitatud mõõdetud temperatuur, soolsus, tihedus, hapniku kontsentratsioon, klorofüll-*a* fluorestsents ja hägusus perioodil 25.07.2023–13.08.2023 ning joonisel 3.3.3 nimetatud parameetrid mõõdistuslõikel ajas keskmistatult.



Joonis 3.3.1. Liuguri mõõdistatud parameetrite jaotused perioodil 25.07.2023–13.08.2023. Ülevalt alla on esitatud temperatuur (°C), soolsus (g/kg), tihedus (kg/m³), hapnik (mg/l), klorofüll-*a* fluorestsents (mg/m³) ja hägusus (NTU). Tiheduse paneelil on heleda joonega näidatud ülemise segunenud kihi paksus.



Joonis 3.3.2. Liuguri mõõdistatud parameetrite profiilid perioodil 25.07.2023–13.08.2023. Paremt vasakule on esitatud temperatuur (°C), soolsus (g/kg), tihedus (kg/m³), hapnik (mg/l), klorofüll a fluorestsents (mg/m³) ja hägusus (NTU). Halliga on esitatud mõõtmised lõigetel ning mustaga missiooni keskmine profiil.



Joonis 3.3.3. Ajas keskmistatud liuguri mõõdistuslõige perioodil 25.07.2023–13.08.2023. Ülevalt alla on esitatud temperatuur (°C), soolsus (g/kg), tihedus (kg/m³), hapnik (mg/l), klorofüll a fluorestsents (mg/m³) ja hägusus (NTU).

Suvist veesammast iseloomustab Läänemere madalamatel aladel kahekihiline struktuur, kus püknokliin takistab erinevate veemasside segunemist. Mõõdistusperioodil oli merepinna temperatuur (≤ 4 m) keskmiselt 17–18 °C ja soolsus 5,9–6,0 g/kg. Põhjalähedases kihis (≥ 30 m) oli temperatuur keskmiselt 3,8 °C ja soolsus 6,2 g/kg.

Ülemise segunenud kihi paksus oli 12 ± 4 m, olles muutlikum augustis. Suvel on veesamba struktuur muutlik, sõltudes tuulest ja hoovustest. Kui juuli lõpus oli tuul mõõdukas (~ 5 m/s) ning domineerisid edelatuuled, siis augustiks pöördus tuul lõunakaarde, olles vahemikus 1.–10. augustini pigem tugev (~ 8 m/s).

Segunenud kihis on näha soolasema ja magedama veemassi vaheldumist. Lisaks, Liivi lahes esineb pinnaaluseid soolsuse maksimume, mis on tingitud soolase ja soojema vee levikuga Läänemere avaosast Liivi lahte (Liblik et al., 2017). Mõõtmisperioodi jooksul oli näha pinnaaluseid soolsuse maksimume juuli lõpus edelatuulte domineerimise perioodil ja 6. augustil, millele eelnes samuti edelatuulte impulss. Soolsuse väärtused olid viimasel juhul kõrgemad (6,2–6,3 g/kg), milles võis roll olla ka tuule ajutises nõrgenemises.

Hapnikutingimused veesambas olid mõõtmisperioodi jooksul võrldemisi head, kuid põhjalähedases kihis oli hapniku kontsentratsioon ikkagi alla küllastustaseme, 6–7 mg/l.

Klorofüll a fluorestsents kõrgemad väärtused ulatusid 6 mg/m. Kõrgemad väärtused esinesid ülemises segunenud kihis. Tuleb silmas pidada, et päeval ajal mõõdetud klorofüll a fluorestsentsi väärtused võivad olla mõnevõrra väiksemad tegelikust peale langeva valguse liiasuse tõttu.

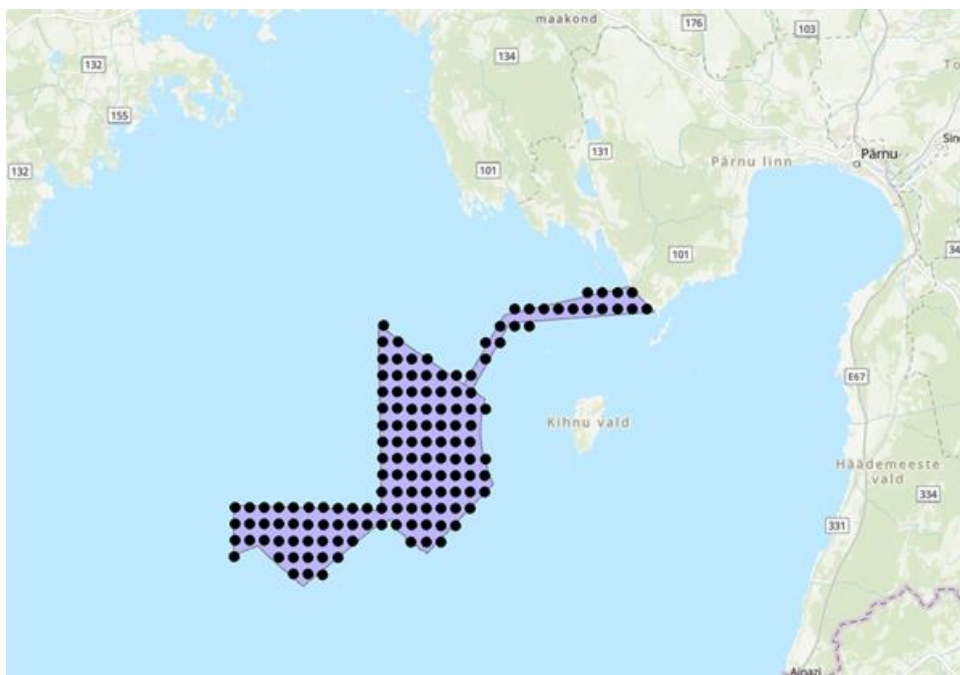
Hägususe väärtused on kõrged põhjalähedases kihis, ulatudes kuni 10 NTU. Kõrgeid väärtusi on eelkõige näha 25. juulil ja 8. augustil. 27.–28. juulil esines ajutiselt kõrgemaid väärtusi 20–25 m sügavusel, mil põhja lähedal olid väärtused väiksemad. See periood langeb kokku madalamate hapniku väärtustega (5–6 mg/l) veesambas. Viimane võib viidata hägusa kihi tekkele seoses redokskliinis toimuvate protsessidega (Schmale et al., 2016).

Keskmiselt olid tingimused mõõdistatud perioodi jooksul kogu mõõdistuslõikel sarnased. Kõige enam muutub ruumis soolsus. Pinnal on vesi magedam lõike läänepoolses osas ning lõike idapoolses osas on näha soolasema vee intrusiooni 10–20 m sügavusel. Lisaks on pinnal hapniku väärtused kõrgemad lõike idapoolses osas. Üldiselt saab järeldada, et arendusalade mastaabis on ruumiline varieeruvus võrdlemisi tagasihoidlik, oluline on ajaline muutlikkus, mis omakorda paljuski seotud atmosfääri muutlikkusega.

3.4. Piirkonna jääolude kirjeldus

3.4.1. Kasutatud andmed

Jääolude iseloomustamiseks piirkonnas on kasutatud Copernicus mereteenuse (CMEMS) produkti `BALTICSEA_MULTIYEAR_PHY_003_011` (info produkti kohta: https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-BAL-PUM-003-011_012.pdf) ja Läänemere jääteenistuse (<https://www.bsis-ice.de/statistik/StatistikSt8111.html>) andmeid. Mudelandmed on perioodist 1993-2021 ja jääteenistuse kogutud andmed perioodist 2001-2021. Copernicuse andmetest on iga mudeli võrgupunkti jaoks (ruumilise lahutusega 1x1 meremiil) iga päeva kohta välja võetud jää esinemise (jää tihedus suurem kui 0,15) ja paksuse andmed. Kõikide talvede jaoks on leitud jää tekke, lõpliku jää mineku, jääperioodi pikkuse, jää esinemist ja jää paksust iseloomustavad andmed. Andmed on jagatud talvedeks, näiteks andmed 1993. aasta sügisest 1994. aasta kevadeni iseloomustavad 1994. aasta talve jne. Aruandes toodud CMEMS jääolude statistika on esitatud joonisel 3.4.1 märgitud alalt. Jääteenistuse andmetest on analüüsitud laevatee Pärnu laht – Irbe väin andmeid ja leitud jää tekke, lõpliku jää mineku, jääperioodi pikkuse, jääga päevade arvu ja maksimaalse jää paksuse andmed.



Joonis 3.4.1. Jääolude iseloomustamiseks kasutatud Copernicus mereteenuse andmete väljavõtte ala (andmepunktid tähistatud mustade ringidega).

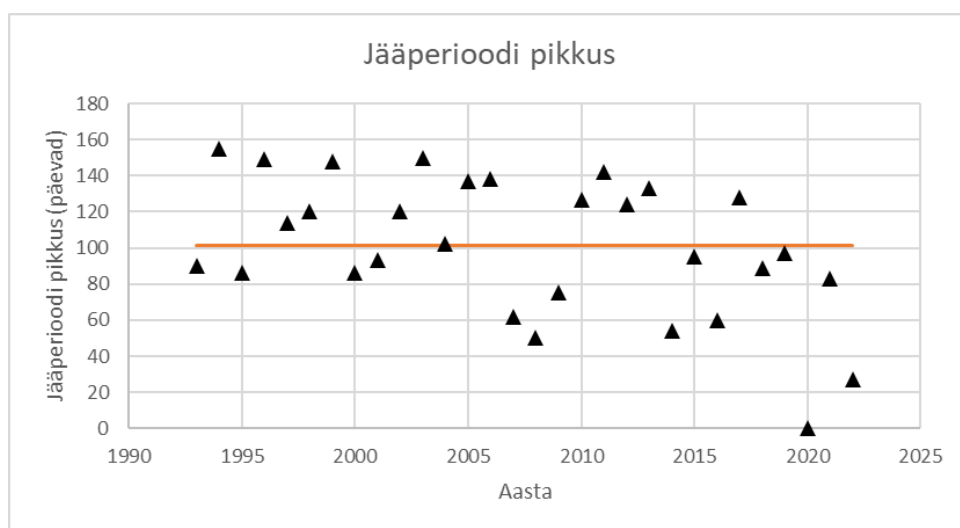
3.4.2. Jääolude iseloomustus 1993-2021 mudelandmete põhjal

CMEMS mudelandmete põhjal aastatest 1993-2021 on jää kavandatava tuulepargi piirkonnas esinenud kõikidel aastatel, välja arvatud 2020. a talvel (tabel 5 ja joonis 3.4.2). Jää on tekkinud keskmiselt 15. detsembril ja lõplikult on jää läinud keskmiselt 11. aprillil. Varaseim jäätekke kuupäev analüüsitud perioodil oli 12. november (talvel 2016/2017) ja hiliseim jäämineku kuupäev 1. mai (talvel 1995/1996). Keskmine jääperioodi pikkus aastatel 1993-2021 oli 101 päeva (maksimaalne 155 päeva, talvel 1993/1994). Jooniselt 3.4.2 on näha, et jääperioodi pikkus on aastatega vähenenud ja alates aastast 2014 on jääperioodi pikkus valdavalt väiksem kui viimase 30 aasta keskmine (101 päeva).

Tabel 5. Jää esmise tekke ja lõpliku mineku kuupäevad aastatel 1993-2021 Copernicus mereteenuse andmetel. Analüüsitud ala on näidatud joonisel 3.3.1.

Aasta	Esmane jää teke	Lõplik jääminek	Jääperioodi kestus
1993	01/01/1993	01/04/1993	90
1994	17/11/1993	21/04/1994	155
1995	17/12/1994	13/03/1995	86
1996	04/12/1995	01/05/1996	149
1998	05/12/1997	04/04/1998	120
1999	16/11/1998	13/04/1999	148
2000	21/12/1999	16/03/2000	86
2001	27/12/2000	30/03/2001	93
2002	26/11/2001	26/03/2002	120
2003	30/11/2002	29/04/2003	150
2004	02/01/2004	13/04/2004	102
2005	25/11/2004	11/04/2005	137
2006	09/12/2005	26/04/2006	138
2007	23/01/2007	26/03/2007	62
2008	04/01/2008	23/02/2008	50
2009	26/12/2008	11/03/2009	75
2010	15/12/2009	21/04/2010	127
2011	28/11/2010	19/04/2011	142

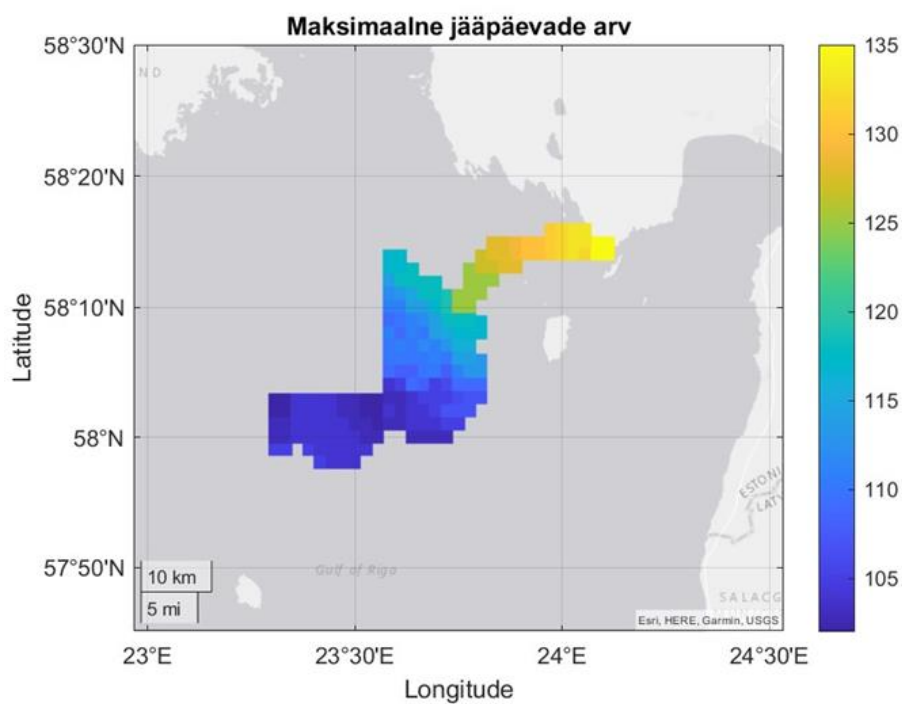
2012	29/11/2011	01/04/2012	124
2013	11/12/2012	23/04/2013	133
2014	16/01/2014	11/03/2014	54
2015	02/12/2014	07/03/2015	95
2016	03/01/2016	03/03/2016	60
2017	12/11/2016	20/03/2017	128
2018	13/01/2018	12/04/2018	89
2019	15/12/2018	22/03/2019	97
2020	-	-	0
2021	09/01/2021	02/04/2021	83
2022	04/12/2021	31/12/2021	27



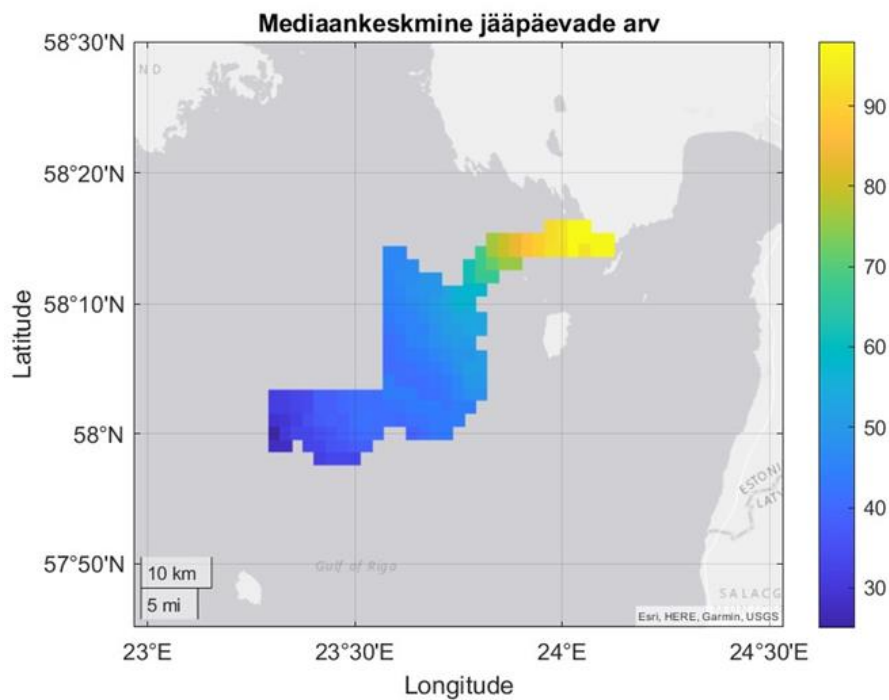
Joonis 3.4.2. Jää esinemise perioodi pikkus aastatel 1993-2021 Copernicus mereteenuse andmetel (analüüsitud ala on toodud joonisel 3.4.1) Oranži joonega on märgitud 1993-2022 keskmine jääperioodi pikkus.

Joonistel 3.4.3, 3.4.4 ja 3.4.5 on esitatud jää esinemist iseloomustavate parameetrite jaotus projekti alal. Maksimaalsed jääperioodid üle 140 päeva on esinenud Kihnust põhja poole jääval, Eesti mandriosale lähimal merealal (kavandatava merealuse kaabli piirkonnas, joonis 3.4.3). Samuti on jääperioodi pikkuse mediaankeskmised väärtused suuremad sellel merealal (joonis 3.4.4). Projekti piirkonnas erinevad jääperioodi pikkuse mediaankeskmised üle 60 päeva – jääperiood on lühem ala edelaosas (Liivi lahe avaosas). Jää esinemise tõenäosus on analüüsitud

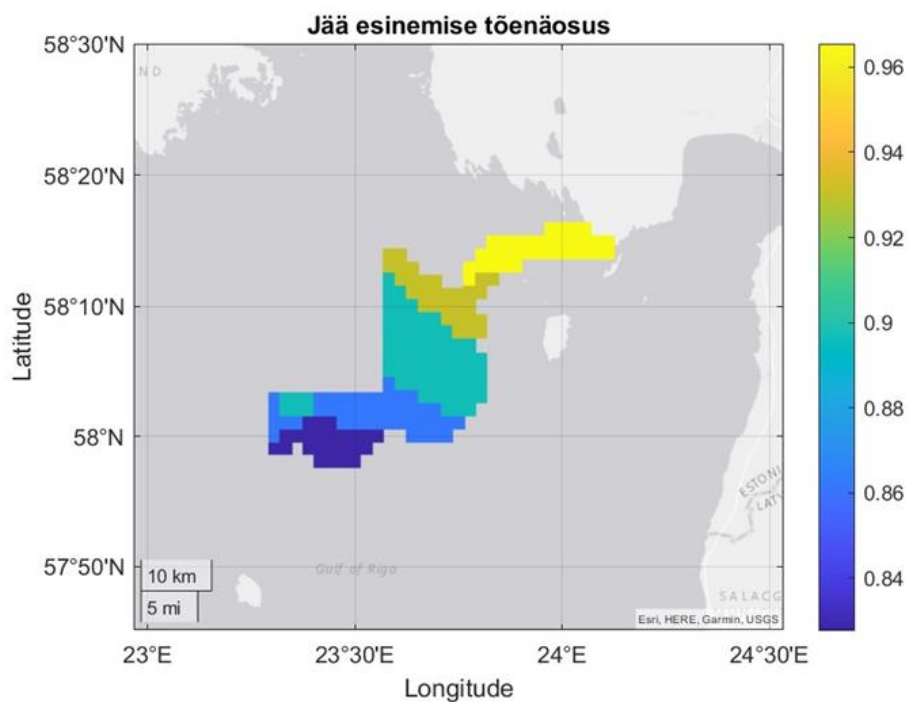
alal sarnase jaotusega kui jääperioodi pikkuse jaotus – jää esinemise tõenäosus on väiksem Liivi lahe keskosa suunas jääval alal. Kuid jää esineb suure tõenäosusega vähemalt korra talve jooksul mingil kujul kõikides analüüsitud ala osades – tõenäosus on vahemikus 0,80-0,97. Suurima tõenäosusega esineb jääd ala idapoolses osas (mandrile lähimal alal) (joonis 3.4.5).



Joonis 3.4.2. Maksimaalne jääpäevade arv ühel talvel perioodil 1993-2021 Copernicus mereteenuse andmetel analüüsitud alal.

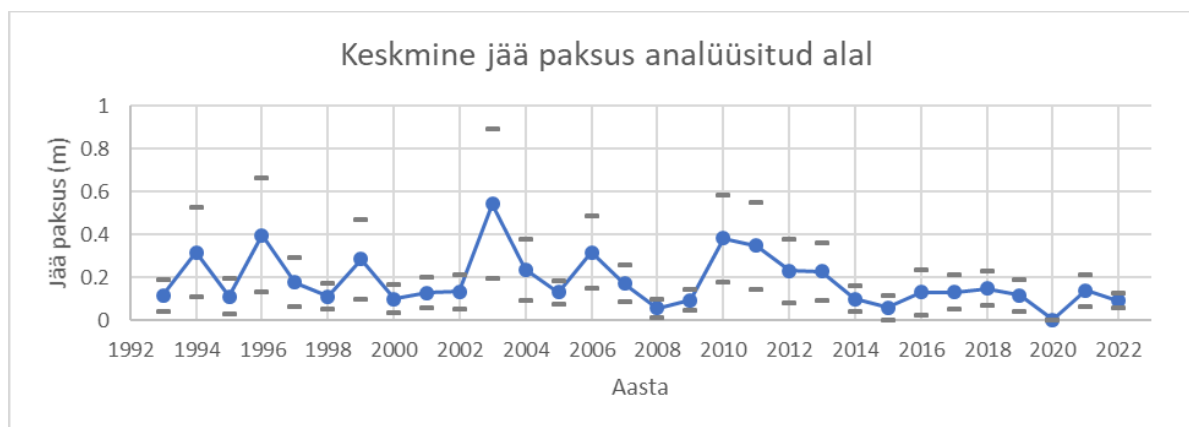


Joonis 3.4.3. Mediaankeskmine jääpäevade arv ühel talvel perioodil 1993-2021 Copernicus mereteenuse andmetel analüüsitud alal.



Joonis 3.4.4.. Jää esinemise tõenäosus (vähemalt korra talve jooksul) perioodil 1993-2021 Copernicus mereteenuse andmetel analüüsitud alal.

Jää paksuse iseloomustamiseks on toodud joonised 3.4.6 analüüsitud ala keskmiste jääpaksustega aastate kaupa. Jää esinemisel on olnud selle paksus keskmiselt vahemikus 10-20 ja vaid harvadel aastatel ületanud 30 cm. Üksikutel aastatel on keskmine jää paksus olnud peaaegu 40 cm (1996, 2010, 2011) või üle selle (2003). Jää keskmine paksus on sarnaselt jääperioodi pikkusele viimasel ajal vähenenud.



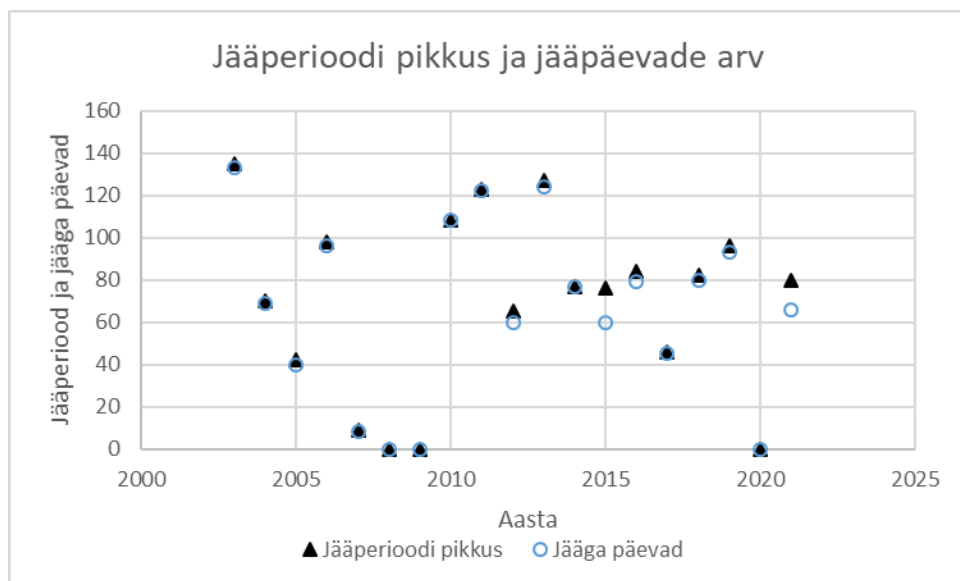
Joonis 3.4.5. Keskmine jää paksus Copernicus mereteenuse andmetel analüüsitud alal perioodil 1993-2021. Sinise joonena ja punktidega on toodud ala keskmine ja hallide kriipsudega standardhälbed (üle ala).

3.4.3. Jääolude iseloomustus Läänemere jääteenistuse andmete põhjal

Läänemere jääteenistuse andmete põhjal on Pärnu lahe – Irbe väina veeteel jää esinenud 16 aastal 19st perioodil 2003-2021 (tabel 6 ja joonis 3.4.7). Aastatel 2008, 2009 ja 2020 jääd ei esinenud. Andmeperioodi keskmine jääperioodi pikkus oli 69 päeva aastas ja keskmine jääga päevade arv 66 päeva aastas. Varaseim jäätekke kuupäev perioodil 2003-2021 registreeriti talvel 2002/2003 (16. detsembril). Hiliseim jääminek registreeriti 2006. aasta talvel (29. aprillil). Maksimaalne jääperioodi pikkus oli 135 päeva (2003. aastal).

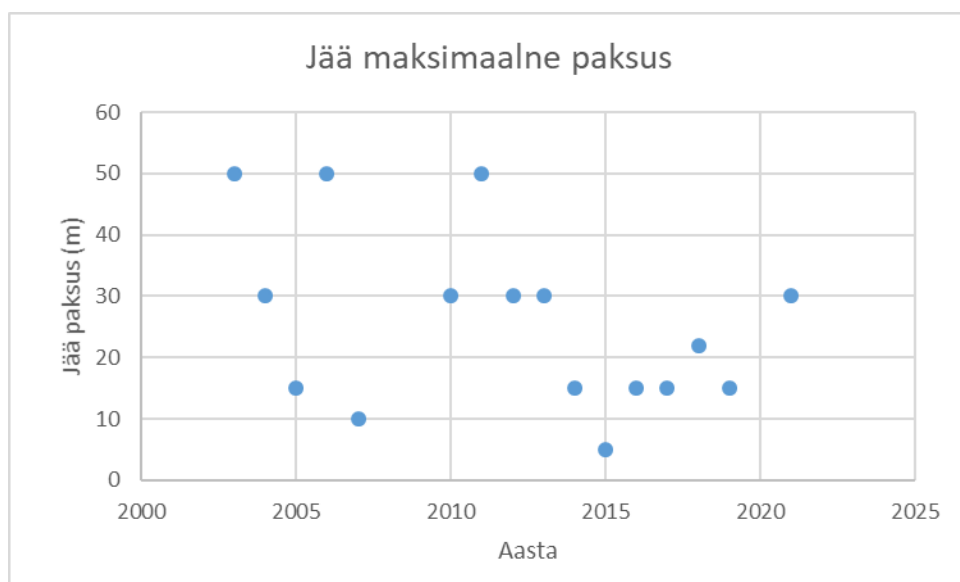
Tabel 6. Jää esmase tekke ja lõpliku mineku kuupäevad aastatel 2003-2021 Läänemere jääteenistuse andmetel Pärnu lahe – Irbe väina veeteel.

Aasta	Jää esmase tekke päev	Jää lõpliku mineku päev	Jääperioodi pikkus	Jääga päevade arv	Jää maksimaalne paksus (cm)
2003	16.12.2002	29.04.2003	135	133	50
2004	02.02.2004	11.04.2004	70	69	30
2005	22.02.2005	04.04.2005	42	40	15
2006	22.01.2006	29.04.2006	98	96	50
2007	21.02.2007	01.03.2007	9	8	10
2008	-	-	0	0	0
2009	-	-	0	0	0
2010	10.01.2010	27.04.2010	108	108	30
2011	26.12.2010	27.04.2011	123	122	50
2012	18.01.2012	22.03.2012	65	60	30
2013	18.12.2012	23.04.2013	127	124	30
2014	16.01.2014	02.04.2014	77	77	15
2015	07.01.2015	23.03.2015	76	60	5
2016	05.01.2016	28.03.2016	84	79	15
2017	02.02.2017	19.03.2017	46	45	15
2018	21.01.2018	12.04.2018	82	80	22
2019	25.12.2018	30.03.2019	96	93	15
2020	-	-	0	0	0
2021	15.01.2021	04.04.2021	80	66	30



Joonis 3.4.6. Jääperioodi pikkus ja jääpäevade arv aastatel 2003-2021 laevateel Pärnu laht – Irbe väin Läänemere jääteenistuse andmetel.

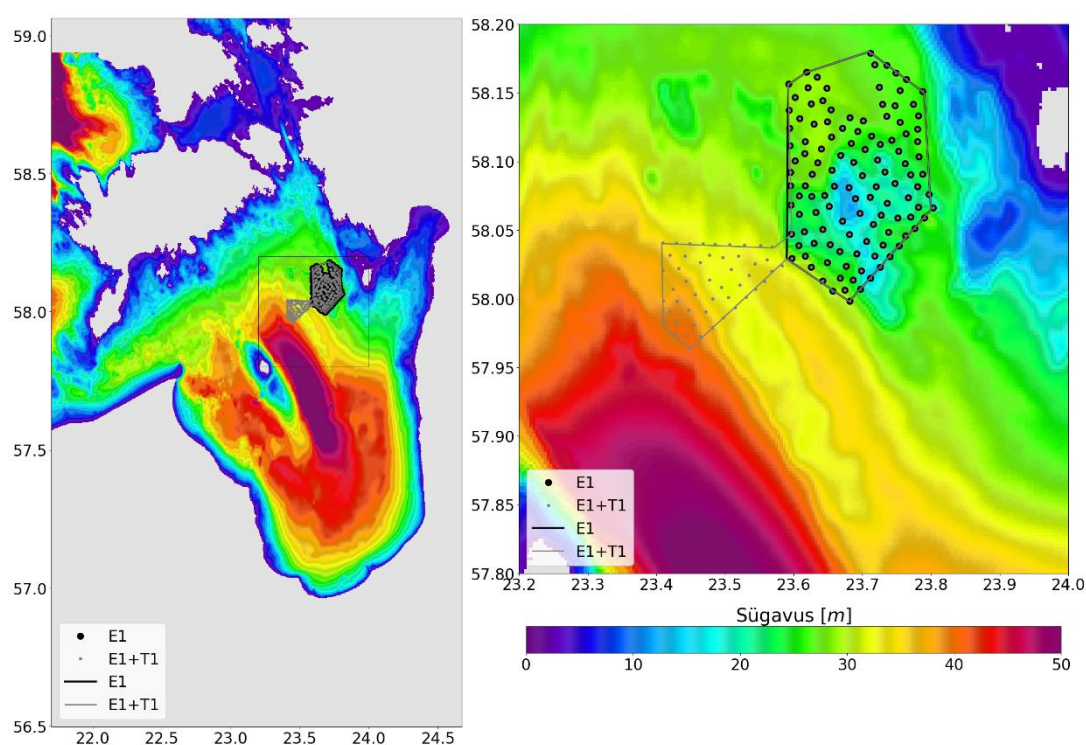
Viimase ligi 20 aasta maksimaalne jää paksus Pärnu laht – Irbe väin veeteel on olnud 50 cm (tabel 6 ja joonis 3.4.7). Viimase kümne aasta jooksul ei ole üle 30 cm iseloomuliku jää paksust enam registreeritud.



Joonis 3.4.7. Maksimaalne iseloomulik jää paksus aastatel 2003-2021 laevateel Pärnu laht – Irbe väin Läänemere jääteenistuse andmetel.

4. Mõju analüüs

Käesolevas töös kasutame mõjuhindangu andmiseks arvutustulemusi numbrilisest mudelist hetkeolukorra (A0) ning erinevate alternatiivide jaoks. Mõju kvantitatiivse hinnangu esitamiseks kasutame pikemaajalisi ja sesoonseid ajalisi keskmisi ja ruumis keskmistatud aegridu tuuleparkide piirkonnast. Joonisel 4.1 on näidatud keskmistamisel kasutatud piirkonnad. Esialgse tuulepargiala (E1) mõjule hinnangu andmiseks keskmistame kõiki vaadeldud alternatiive ainult esialgse ala piirkonnas. Täiendava ala puhul keskmistame mõju esialgsel ja täiendaval alal kokku (E1+T1).



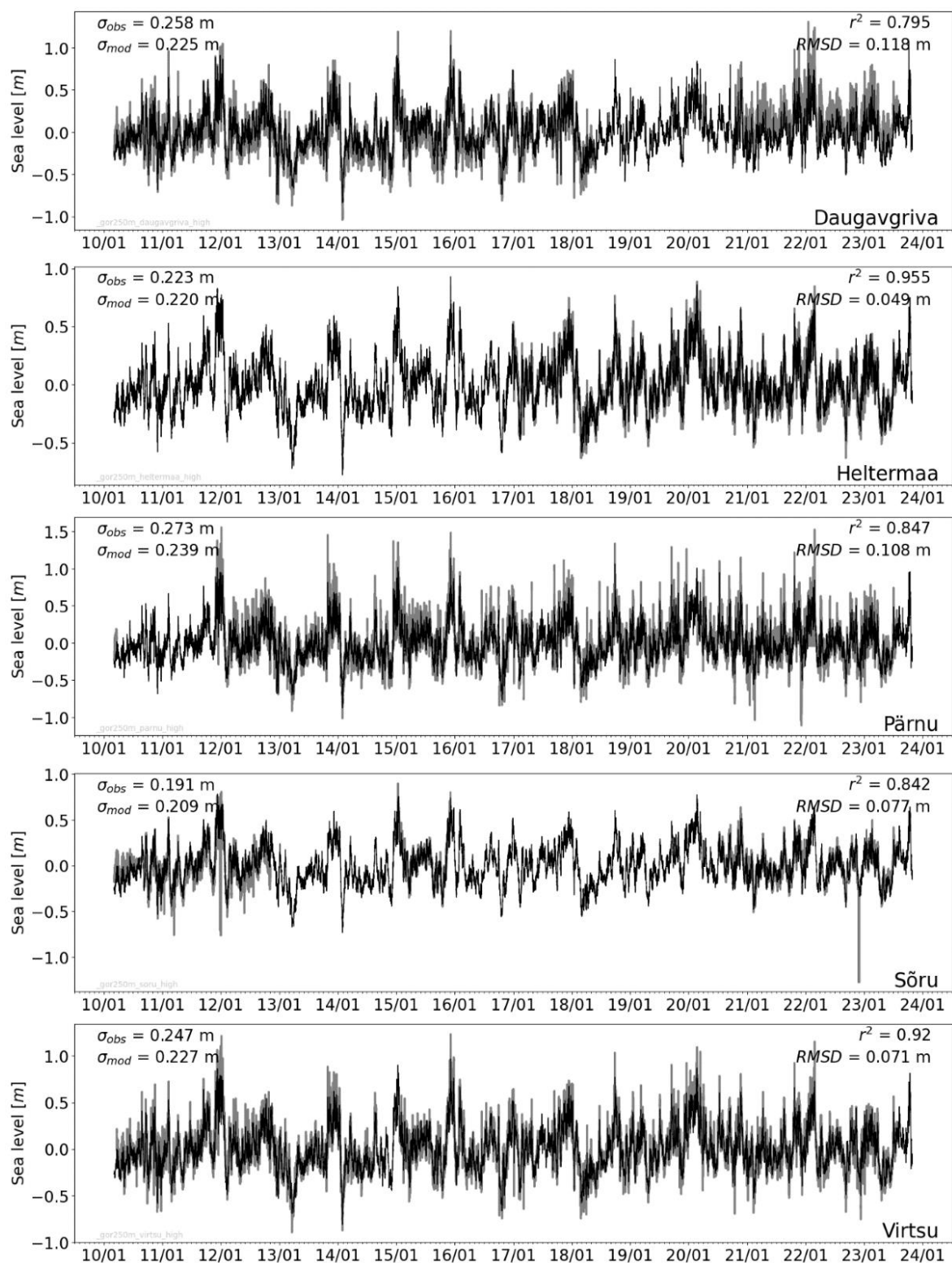
Joonis 4.1: Tuulikute asukoht alternatiivides E1 ja E1+T1. Musta joonega on näidatud mõju analüüsiks kasutatud keskmistamispiirkond E1 ning halli joonega keskmistamispiirkond E1+T1.

4.1. Hoovused

4.1.1. Esialgne ala

Mudelarvutustega hinnatud tsirkulatsiooni usaldusväärsuse hindamiseks vaatame pikaajalist barotroopset veevahetust ehk veetasemeid mõningates rannikujaamades perioodil 2010-2023 (Joonis 4.1.1.1) ning modelleeritud ja mõõdetud hoovuse kiiruse komponentide ja kogu kineetilise energia jaotust veesambas (Joonis 4.1.1.2).

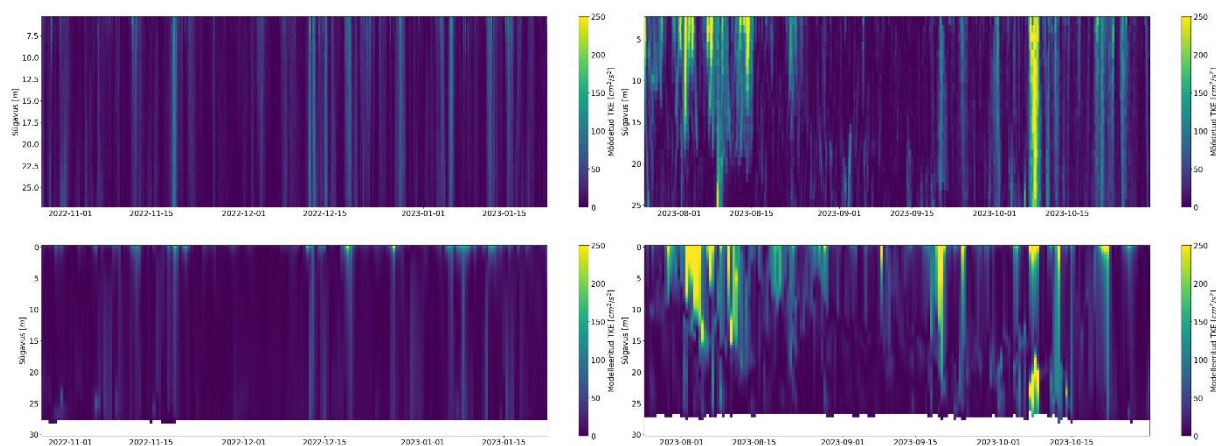
Üldiselt on modelleeritud ja mõõdetud veetasemete kokkulangemine väga hea. Väikseim korrelatsioonikordaja; 0,89 (determinatsioonikordaja 0,795); saadi Daugavgriva jaamas ning suurim; 0,98 (determinatsioonikordaja 0,955); Heltermaa jaamas. Mõõdetud ja modelleeritud veetasemete standardhälvete erinevus on väiksem kui 4 cm ning suurim ruutkeskmise erinevus alla 11 cm (Pärnu). Seega, on keskmine pikaajaline barotroopne tsirkulatsioon ja veevahetus Liivi lahes modelleeritud hästi.



Joonis 4.1.1.1: Modelleeritud ja mõõdetud veetasemete võrdlus automaatjaamades 2010-2023.

Joonisel 4.1.1.2 on toodud modelleeritud ja mõõdetud kogu kineetilise energia (TKE) võrdlus KW jaamas 2022. ja 2023. aastal. Suuremad väärtused mõõdeti 2023. aasta sügisel ning märgatavalt väiksemad väärtused 2022. aastal. Mudel reprodutseerib TKE muutlikkust,

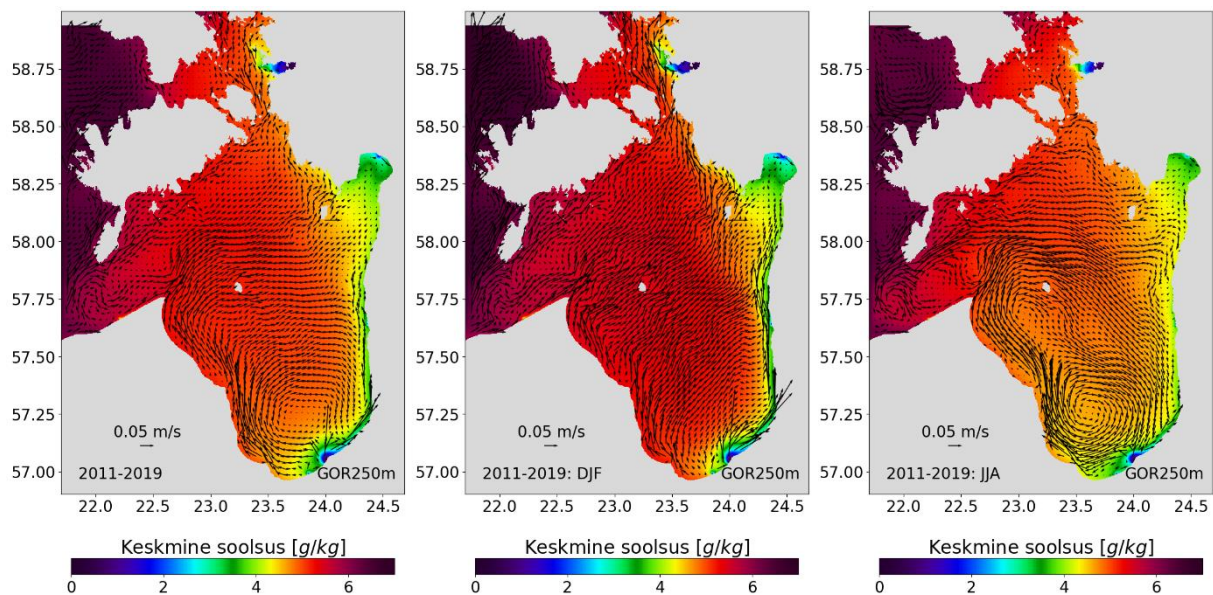
suuremad väärtused 2023. aasta augustis ja oktoobris esinevad ka simulatsioonides, lisaks reprodutseerib mudel ka lühiajalisi pulsatsioone (triibud joonisel 4.1.1.2). Sarnased on tulemused ka 2022. aasta jaoks - kõrgemad väärtused on tuvastatavad, aga võib esineda mõningane ajaline nihe, mida saab selgitada ajalis-ruumilise nihkega mudeli ja mõõtmiste vahel st. mesomastaapsed nähtused (keerised, jugahoovused) ei pruugi mudelis ilmnedä täpselt samal ajamomendil samas punktis vaid mõningase viivituse või samal ajahetkel lähedal asuvas ruumpunktis.



Joonis 4.1.1.2: Mõõdetud (ülemised paneelid) ja modelleeritud (alumised paneelid) kogu kineetiline energia 2022. (vasakul) ja 2023. (paremal) aastal.

Liivi lahe keskmise pinnatsirkulatsiooni kirjeldamiseks kasutame pikaajalisi mudeltulemusi perioodist 2011-2019 ning pinnakihi hoovuse ja soolsuse ajalisi keskmisi. Üldiselt on tsirkulatsioon Liivi lahe lõunaosas antitsükloonaalne – voolamine piki Liivi lahe lääneosa on suunatud põhja ning piki idaosa lõunasse. Eriti tugev on antitsükloonaalne voolamine suvisel perioodil (juuni-august ehk JJA), mil ka hoovuse kiirused piki rannikut on suuremad ning lõunaosa antitsüklon selgelt eristatav (Joonis 4.1.1.3). Talvisel perioodil (detsember-veebruar ehk DJF) on pinnakihi keskmine tsirkulatsioon seotud tuulterežiimiga – voolamine on valdavalt kirdesse (enim-esinevad tuuled Läänemeres on edelatuuled) ning antitsükloonaalset keerist ei moodustu/ei erista. Lisaks on talvisel perioodil lahe idaosas täheldatav tugev voolamine põhjasuunda ning domineeriv vee transport läbi Suure väina Väinamerre ja sealt edasi Läänemere avaosasse.

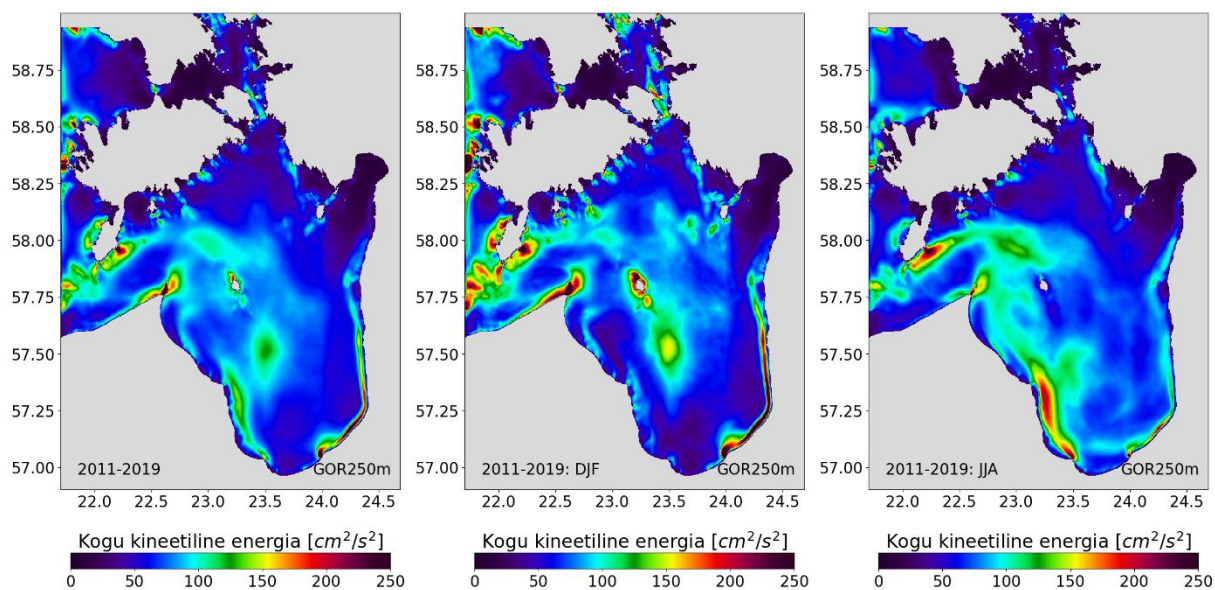
Soolsuse jaotus Liivi lahes on samuti muutlik ning iseloomulik on tugev lõuna-põhja ja ida-lääne suunaline gradient, kus suurimad väärtused on lahe lääne ja loodeosas ning väikseimad lahe lõuna ja idaosas. Sesoonselt on pinnakihis suurimad väärtused talvisel ning väikseimad suvisel perioodil.



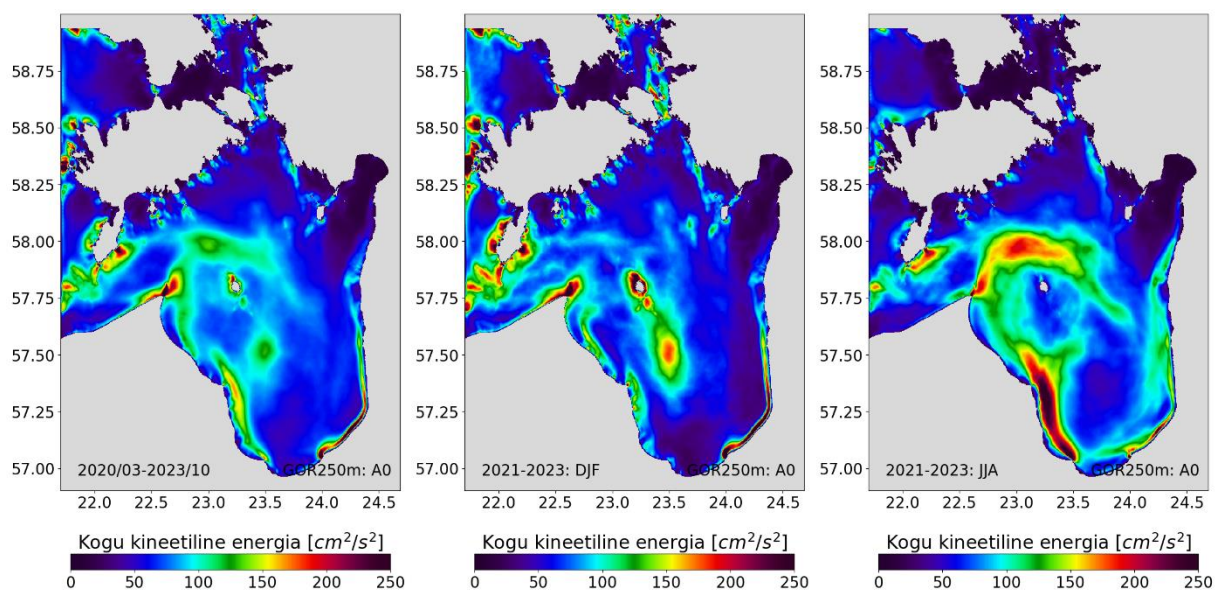
Joonis 4.1.1.3: Keskised pinnakihi hoovused kogu perioodi 2011-2019 ning suvise ja talvise perioodi jooksul koos soolsusega.

Pikaaajalise (2011-2019) arvutuse põhjal hinnatud pinnakihi kogu kineetilise energia jaotus on toodud joonisel 4.1.1.4 ning mõju hindamiseks kasutatud perioodi (2020-2023) jaotus joonisel 4.1.5. Mõlemal perioodil eristuvad samad kõrgema kineetilise energiaga piirkonnad. Selgelt energeetilisemad piirkonnad (kõrgema keskmise kineetilise energiaga) on rannikutsoonis ja väinades. Kineetilise energia jaotus tuulepargi esialgse arenduse rajamise järel on toodud joonisel 4.1.6. Võrdlus olemasoleva olukorra ja tuulepargiga olemasolul vahel näitab, et Liivi lahe basseinimastaapi kineetilise energia jaotuseid pargi rajamine oluliselt ei muuda.

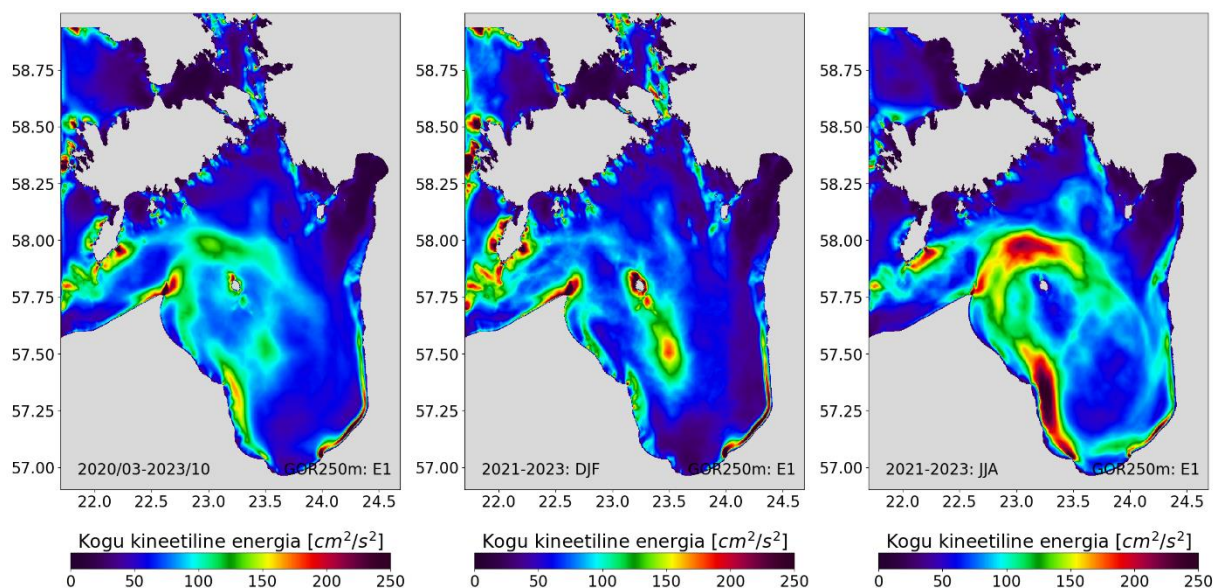
Kineetilise energia erinevus alternatiivide E1 ja A0 vahel tuulepargi lähipiirkonnas on toodud joonisel 4.1.1.7. Selgelt võib eristada kineetilise energia vähenemist tuulepargi piirkonnas talvel. Tuulepargi naaberaladel võib aset leida ka kineetilise energia kasvu. Suvisel perioodil annab simulatsioon tuulepargi ala põhjaosas suuremad hoovuskiirused tuulepargi põhjaosas ning väiksemad lõunaosas.



Joonis 4.1.1.4: Keskmise pinnakihi kogu kineetiline energia kogu perioodi 2011-2019 kohta ning sama perioodi suviste ja talviste väärtuste keskmine.

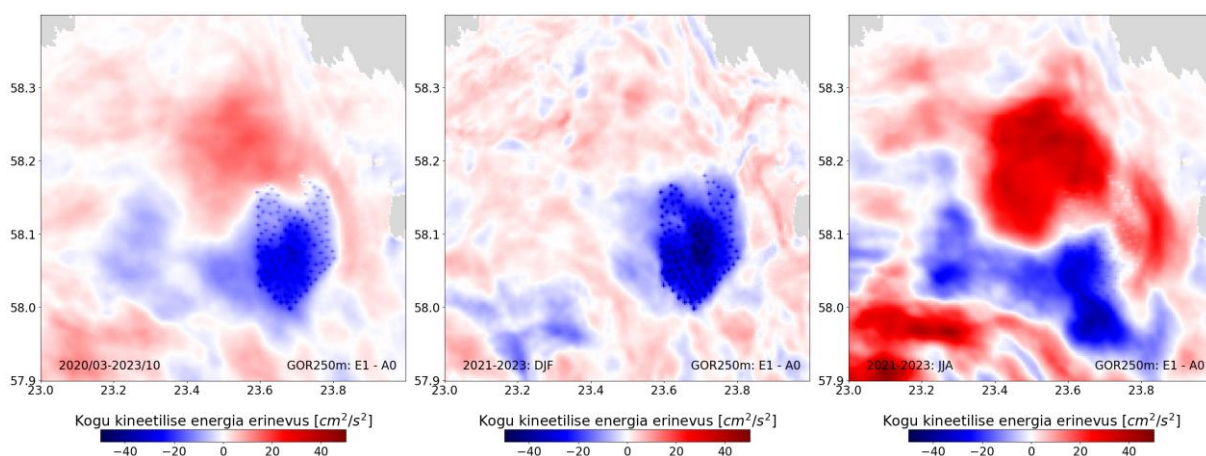


Joonis 4.1.1.5: Keskmise pinnakihi kogu kineetiline energia kogu perioodi 2020/03-2023/10 kohta ning sama perioodi suviste ja talviste väärtuste keskmine alternatiivis A0.

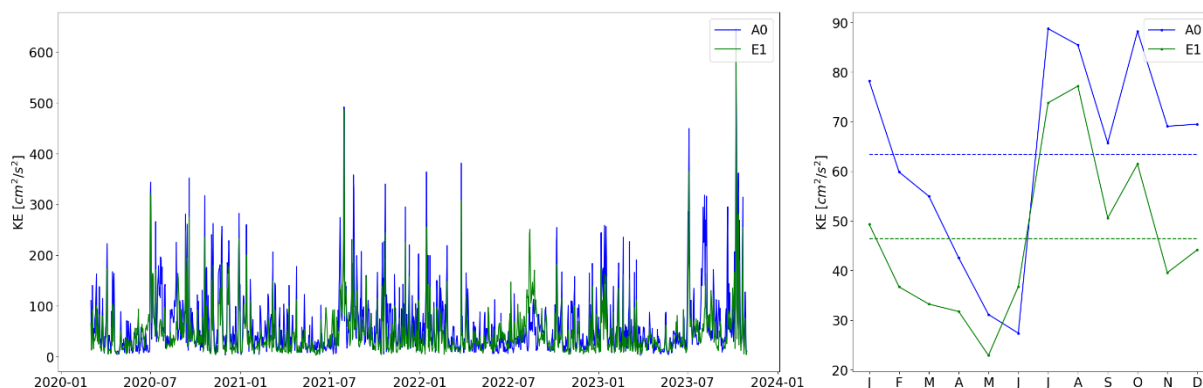


Joonis 4.1.1.6: Keskmine pinnakihi kogu kineetiline energia kogu perioodi 2020/03-2023/10 ning sama perioodi suviste ja talviste väärtuste keskmine alternatiivis E1.

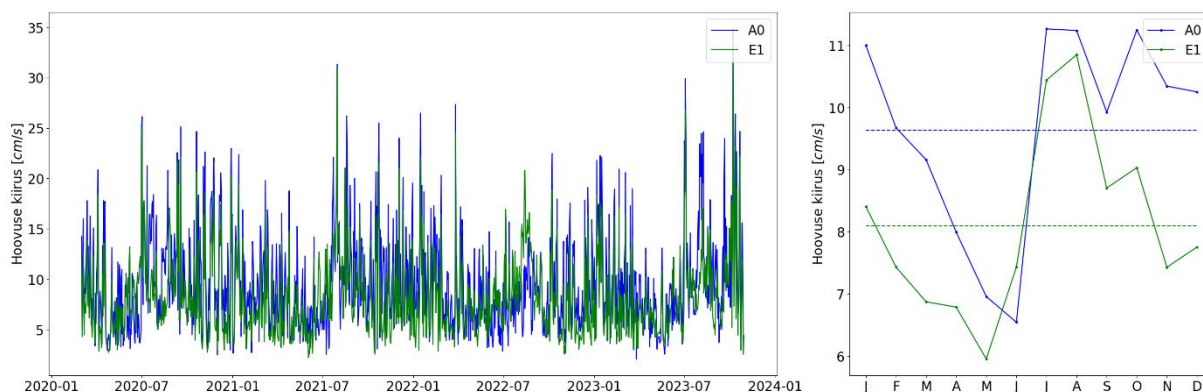
Kogu kineetilise energia ajaline käik esialgses alas alternatiivides A0 ja E1 on toodud joonisel 4.1.1.8 ning hoovuse kiiruse ruumilise keskmise ajaline käik joonisel 4.1.1.9. Tuulikute rajamine vähendab mõlemat parameetrit arvestataval määral sügis-talvisel perioodil, mõnevõrra vähem kevad-suvisel perioodil. Kuu keskmine pinnakihi hoovuskiirus võib väheneda kuni 2,5 cm/s. Hoovuskiiruste vähenemine tuulikute mõju piirkonnas on oodatav, sest merele rakenduv tuulepinge väheneb. Sarnasele tulemusele on jõutud ka mujal maailmas (Paskyabi, 2015; Raghukumar et al., 2023).



Joonis 4.1.1.7: Keskmise pinnakihi kogu kineetilise energia erinevus kogu perioodi 2020/03-2023/10 ning sama perioodi suviste ja talviste väärtuste keskmiste vahel alternatiivides A0 ja E1.



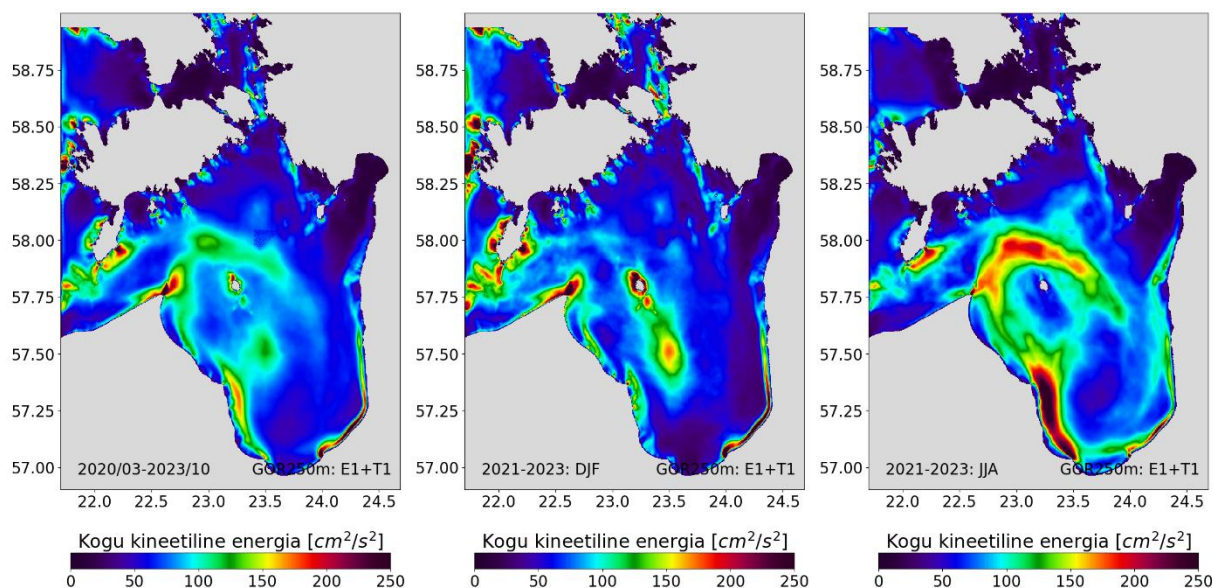
Joonis 4.1.1.8: Pinnakihi kineetilise energia ajaline käik tuulepargi E1 piirkonnas (vasakul) koos sesoonse käiguga (paremal) alternatiivide A0 ja E1 korral.



Joonis 4.1.1.9: Pinnakihi hoovuse kiiruse ajaline käik tuulepargi E1 piirkonnas (vasakul) koos sesoonse käiguga (paremal) alternatiivide A0 ja E1 korral.

4.1.2. Esialgne ala ja täiendusala

Joonisel 4.1.2.1 on toodud pinnakihi kogu kineetilise energia keskmine kui rajatakse tuulikud ka täiendavale alale (E1+T1). Üldiselt on energia jaotus sarnane ainult esialgse ala (E1) tuulikute või hetkeolukorra jaotusega (A0). Suurimad väärtused jäävad lahe lääneossa ning Daugava jõevee levikuga seotud piirkondadesse.

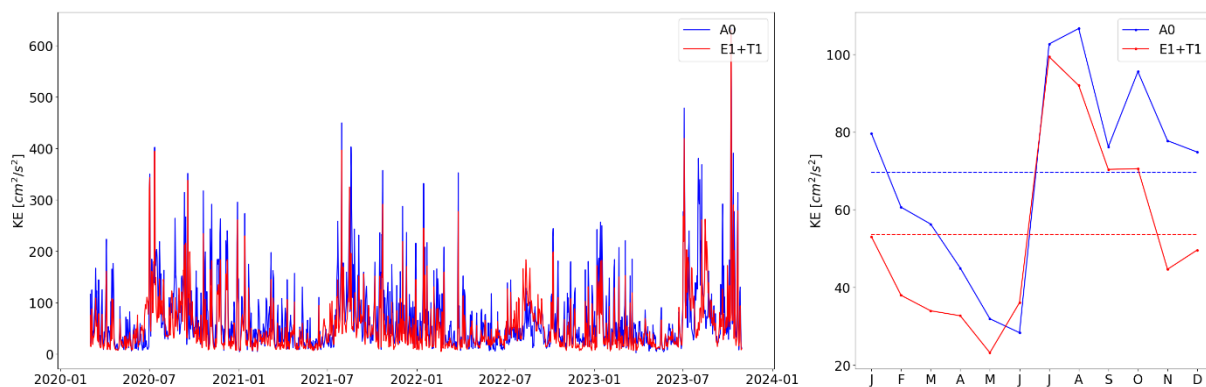


Joonis 4.1.2.1. Keskmine pinnakihi kogu kineetiline energia kogu perioodi 2020/03-2023/10 ning sama perioodi suviste ja talviste väärtuste keskmine alternatiivis E1+T1.

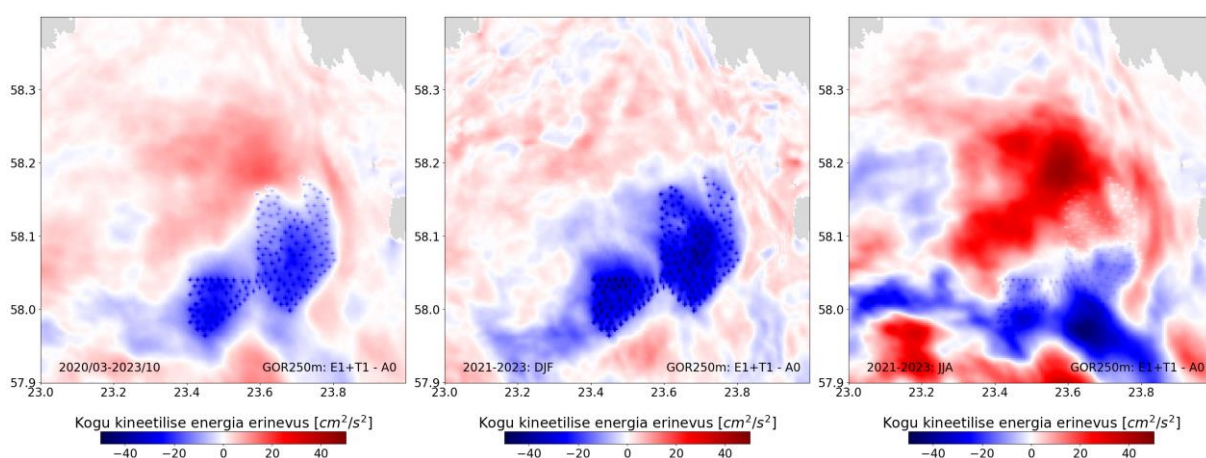
Ruumiliselt keskmistatud kineetilise energia ajaline käik koos sesoonse käiguga on toodud joonisel 4.1.2.2 ning erinevus hetkeolukorra ja täiendusala (E1+T1) alternatiivi vahel joonisel 4.1.2.3.

Sarnaselt esialgse ala alternatiiviga (E1) esineb tuulepargi alal arvestatav hoovuskiiruse vähenemine talvel, kui pinnakihi keskmine kineetiline energia väheneb kuni $40 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Kogu perioodi keskmine muutus on alla $30 \text{ cm}^2/\text{s}^2$. Sarnaselt E1 rakendumisele tekitab E1+T1 rajamine suvisel perioodil põhjaosas suuremad hoovuskiirused tuulepargi põhjaosas ning väiksemad lõunaosas.

Tuulepargist eemal annab simulatsioon samuti muutuse signaali, kuid võib eeldada, et need häiritused on simulatsiooni määramatuse piiril või sellest madalamal.

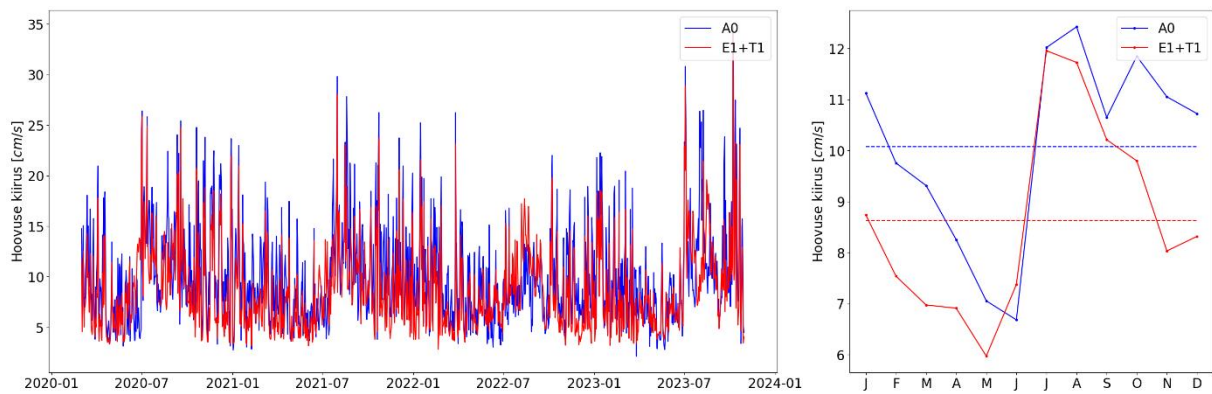


Joonis 4.1.2.2: Pinnakihi kineetilise energia ajaline käik tuulepargi E1+T1 piirkonnas (vasakul) koos sesoonse käiguga (paremal) alternatiivide A0 ja E1+T1 korral.



Joonis 4.1.2.3: Keskmise pinnakihi kogu kineetilise energia erinevus tuulepargi piirkonnas kogu perioodi 2020/03-2023/10 ning sama perioodi suviste ja talviste väärtuste keskmiste vahel alternatiivides A0 ja E1+T1.

Pinnakihi keskmise hoovuse kiiruse aegread on toodud joonisel 4.1.2.4. Sarnaselt E1 ala keskmistega on muutused tuulepargi aladel ilmsed sügis-talvisel perioodil kui keskmine pinnakihi hoovuse kiirus väheneb rohkem kui 2 cm/s detsembris-jaanuaris ning vähem kui 1 cm/s suvisel perioodil.



Joonis 4.1.2.4: Pinnakihi hoovuse kiiruse ajaline käik tuulepargi E1+T1 piirkonnas (vasakul) koos sesoonse käiguga (paremal) alternatiivide A0, E1 ja E1+T1 korral.

4.2. Lainetus

Tuule kiiruse vähendamine põhjustab laine energia vähenemist tuulikute allatuult. Allpool oleme joonistel 4.2.1-4.2.4 ja 4.2.6-4.2.9 välja toonud laine kõrguse kahanemise erinevate tuule suundade ning kiiruste korral vastavalt esialgsel alal ning esialgsel- ja täiendaval alal.

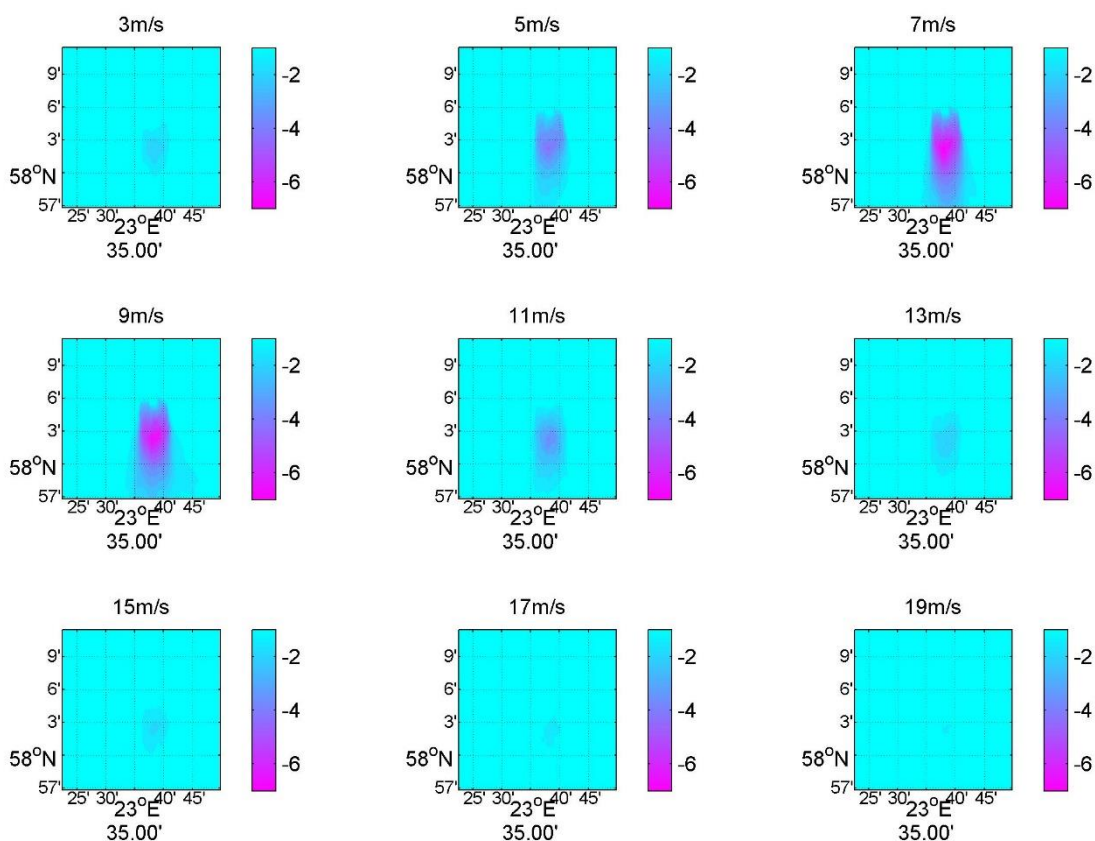
Tuulikute tekitatud varjuefekt on tagasihoidlikum tugevate tuule kiiruste juures, mistõttu jääb tuule kiiruse ≥ 13 m/s puhul mõju laine kõrgusele väga tagasihoidlikuks. Ka väiksemate tuule kiiruste puhul, alla 7 m/s, on mõju suhteliselt väike. Mõju on suurem keskmiste tuule kiiruste puhul. Laine oluline kõrgus väheneb keskmiste tuule kiiruste puhul vähemalt 5 cm, kohati ligi 10 cm. Mõju pikaajalisele keskmisele lainekõrguse väljale on oluliselt väiksem (joonised 4.2.5 ja 4.2.10), sest arvestatav mõju esineb üksnes siis, kui vaadeldav merepunkt jääb tuulikute allatuult ning kui tuule kiirus on eelkirjeldatud soodsas mõju vahemikus (vt. joonised 4.2.1-4.2.4 ja 4.2.6-4.2.9). Esineb perioode, kui mõju ei avaldu üldse või see on väga tagasihoidlik. Mõju on mõnevõrra suurem tuulepargist idas ja kirdes, sest valdavad tuuled puhuvad edelast, läänest.

Maismaa poolt puhuvate tuultega taastub laine kõrgus teatud distantsil peale tuulikute mõjualast väljumist. Marginaalne mõju (kuni paar cm olulise laine kõrguse vähenemist) võib soodsas kiirusvahemikus läänekaarte tuultega ulatuda Kihnu rannikuni. Keskmise olulise laine kõrguse vähenemine Kihnu rannikul on tõenäoliselt tuvastamatu. Marginaalne piiriülene mõju (kuni

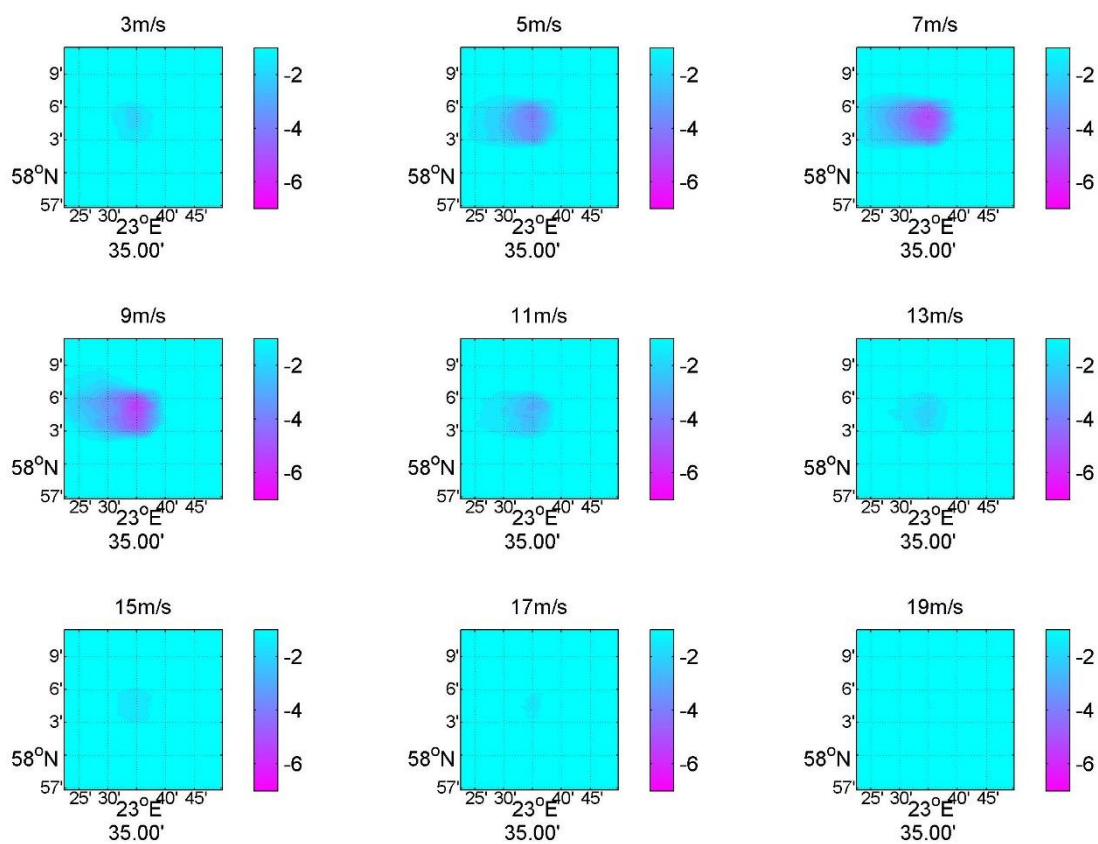
paar cm laine kõrguse vähenemist) võib avalduda loode- ja põhjakaarte tuultega, kuid laine kõrguse keskmine vähenemine riigipiiril on ilmselt tuvastamatu.

Täiendava ala kasutusele võtmisel mõju ruumiline ulatus suureneb. Samuti viitavad arvutustulemused, et lääne- ja edelakaarte tuultega suureneb täiendusala kasutusele võtmisel mõju ka esialgsel alal, st. mõju akumulatsioon.

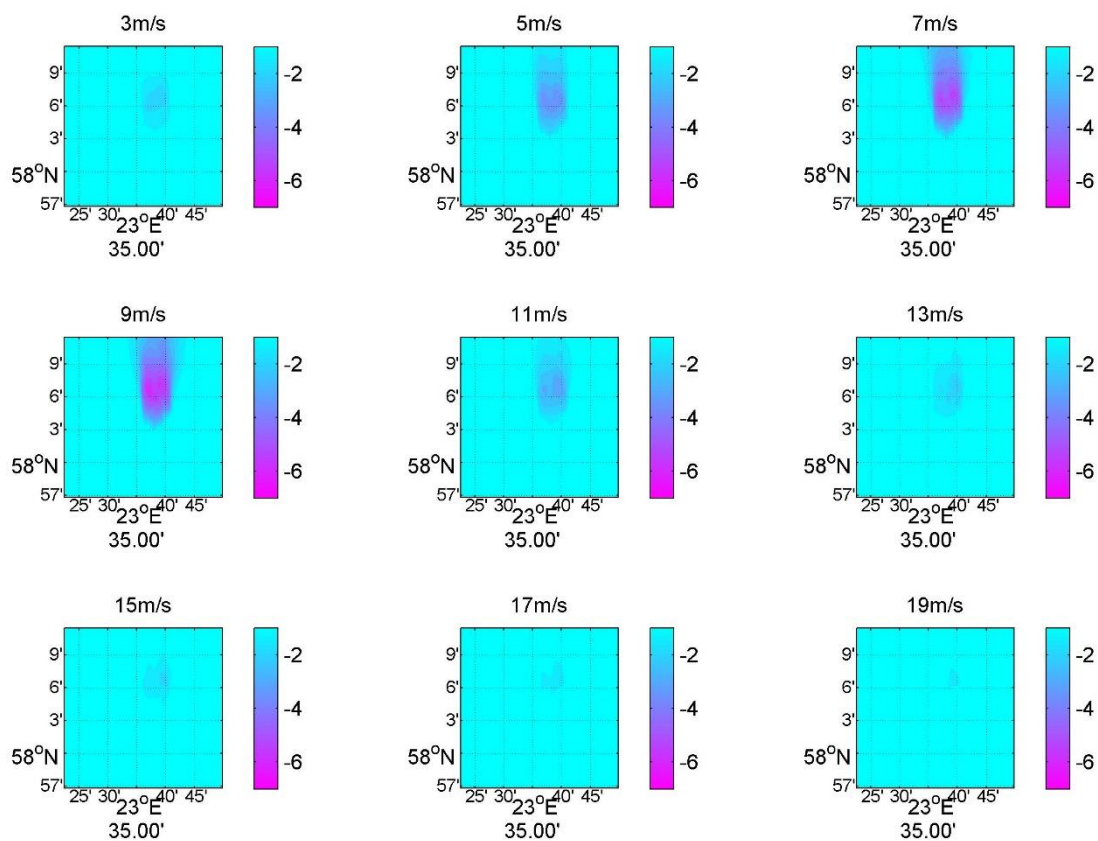
Kokkuvõttes tuleb nentida, et lainekliimat mõjutavate looduslike tegurite varieerumine on tunduvalt suurem, kui tuulepargi mõju. Kuna lainetust tekitav tuul on varieeruv, siis olulise lainekõrguse keskmine vähenemine tuulepargi sees on kuni paar cm (v.a. postide vahetus läheduses, kus on väga lokaalsed muutused). Võttes arvesse piirkonna keskmist olulist lainekõrgust ca 0,65-0,75 m; väheneb tuulepargi sees lainekõrgus keskmiselt kuni 3%. Sama suurusjärku mõju laine kõrgusele on tuvastatud nt. Põhjameres (Fischereit et al., 2022). Liivi lahte tervikuna silmas pidades on mõju tagasihoidlik.



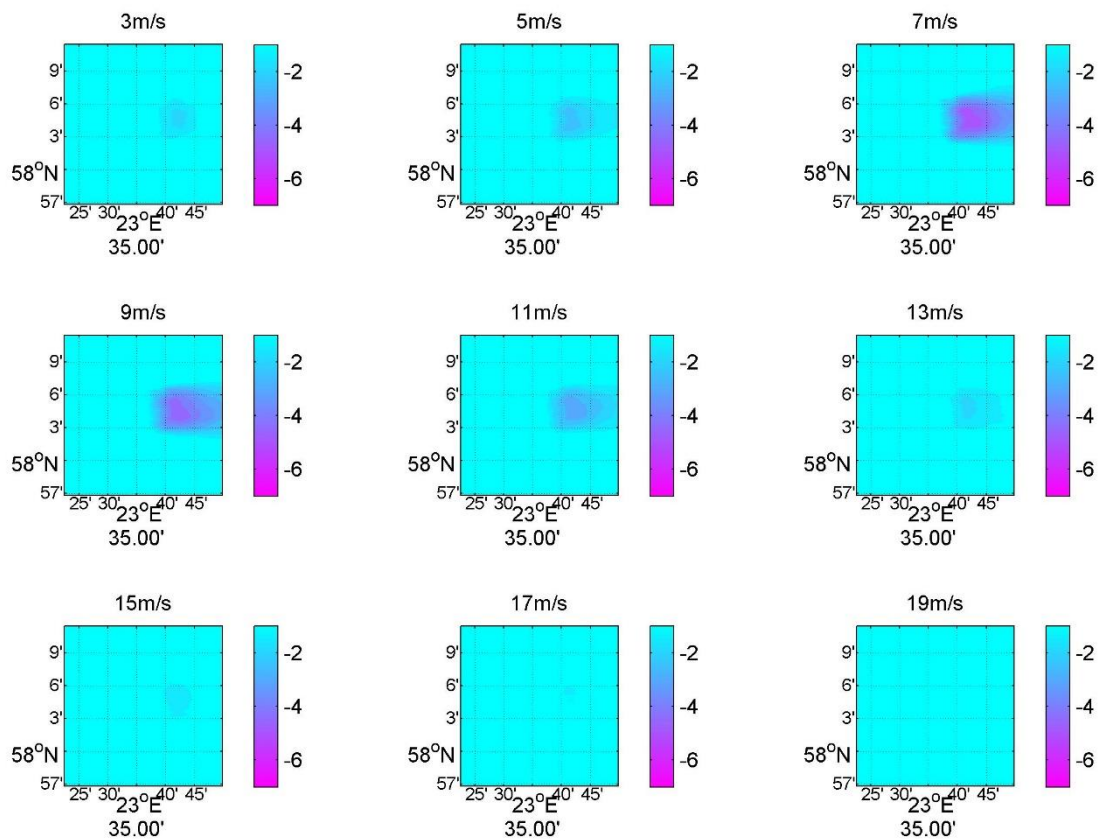
Joonis 4.2.1. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine põhjatuulega esialgsele alale paigutatud tuulikute korral.



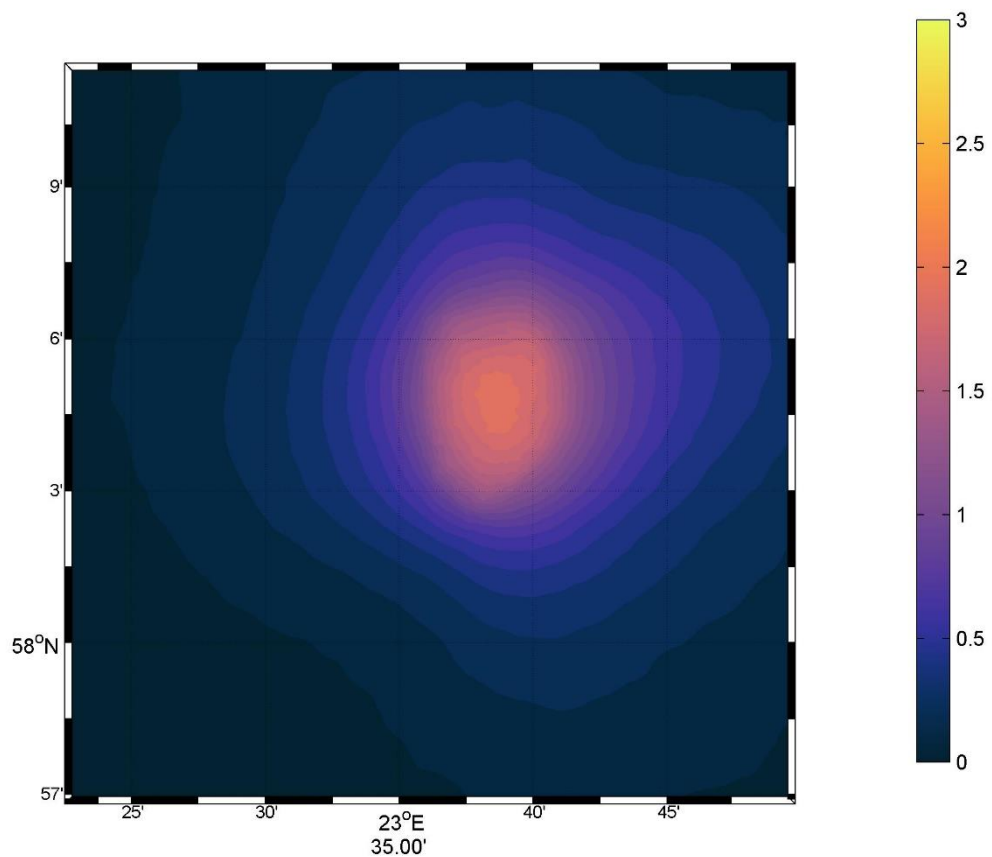
Joonis 4.2.2. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine idatuulega esialgsele alale paigutatud tuulikute korral.



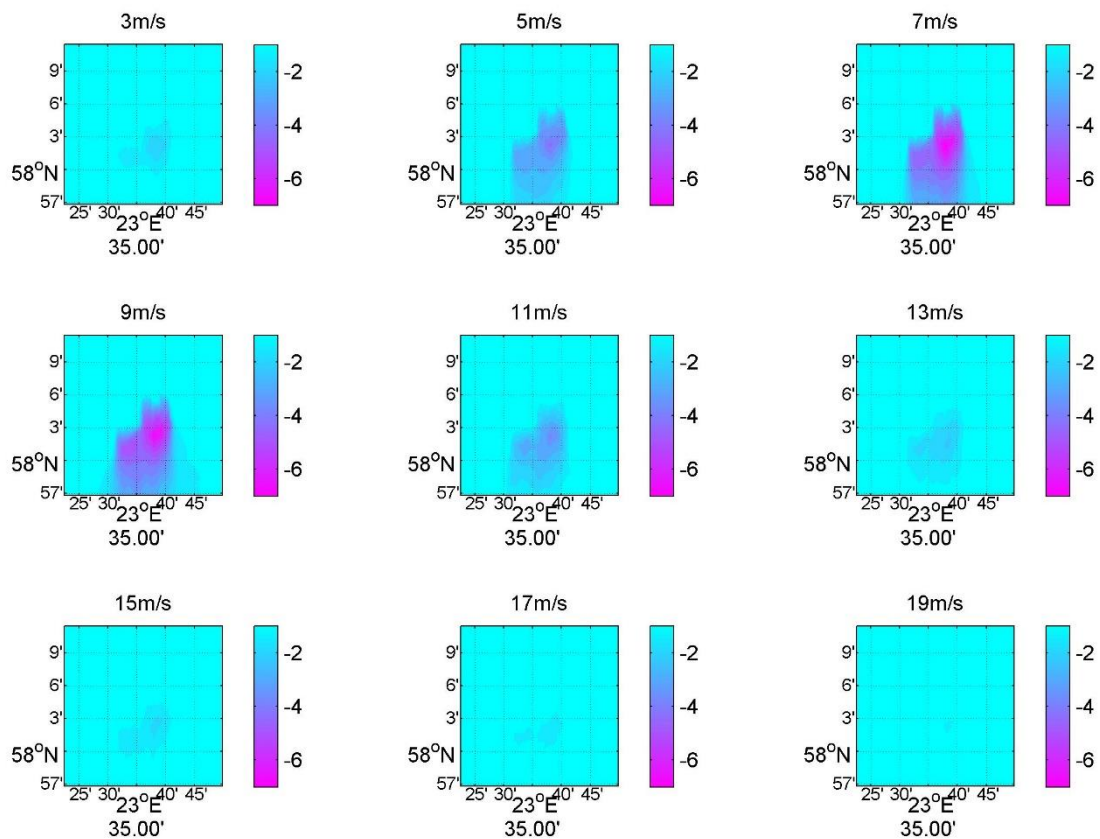
Joonis 4.2.3. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine lõunatuulega esialgsele alale paigutatud tuulikute korral.



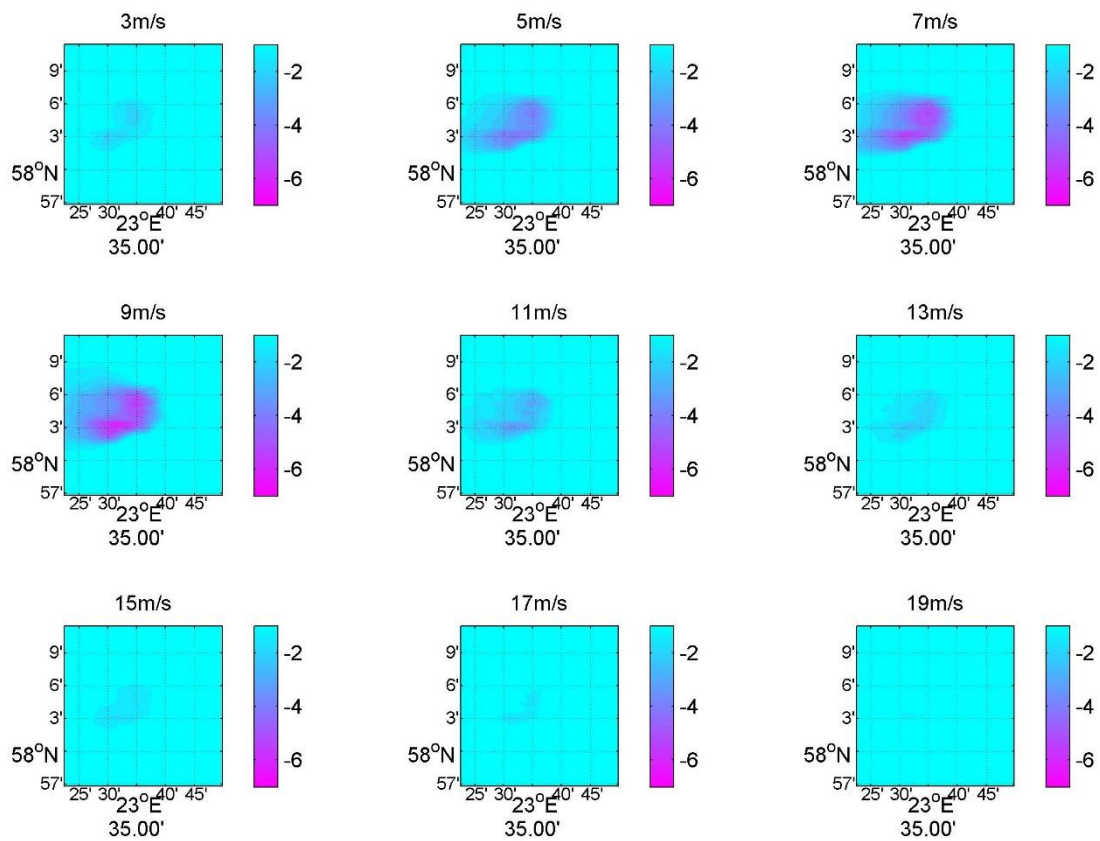
Joonis 4.2.4. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine läänetuulega esialgsele alale paigutatud tuulikute korral.



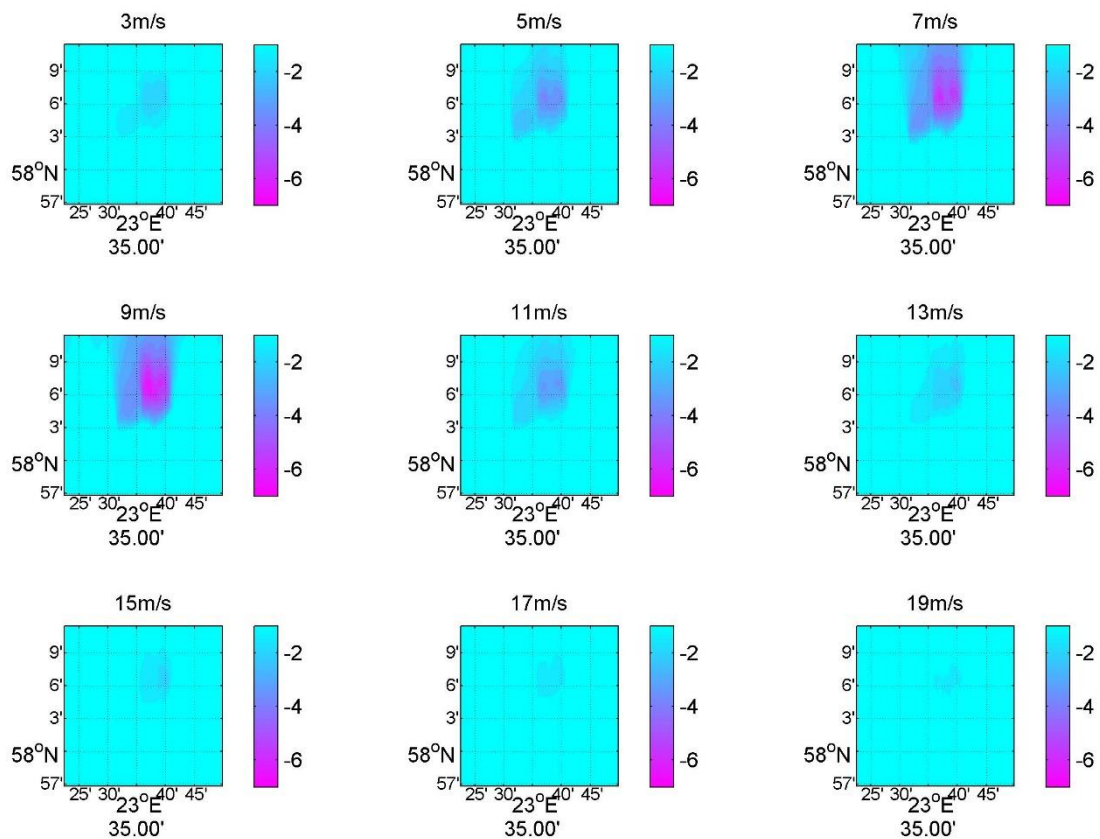
Joonis 4.2.5. Keskmine laine kõrguse muutus (cm) esialgsele alale paigutatud tuulikute korral. Arvutuses on kasutatud 1992-2021 ERA5 tuuleandmeid (Hersbach et al., 2020), kuid ei ole arvestatud jääkatet. Seega joonisel kujutatu on maksimaalne mõju. Aastatel, mil jääd oli rohkem võib mõju olla veelgi väiksem.



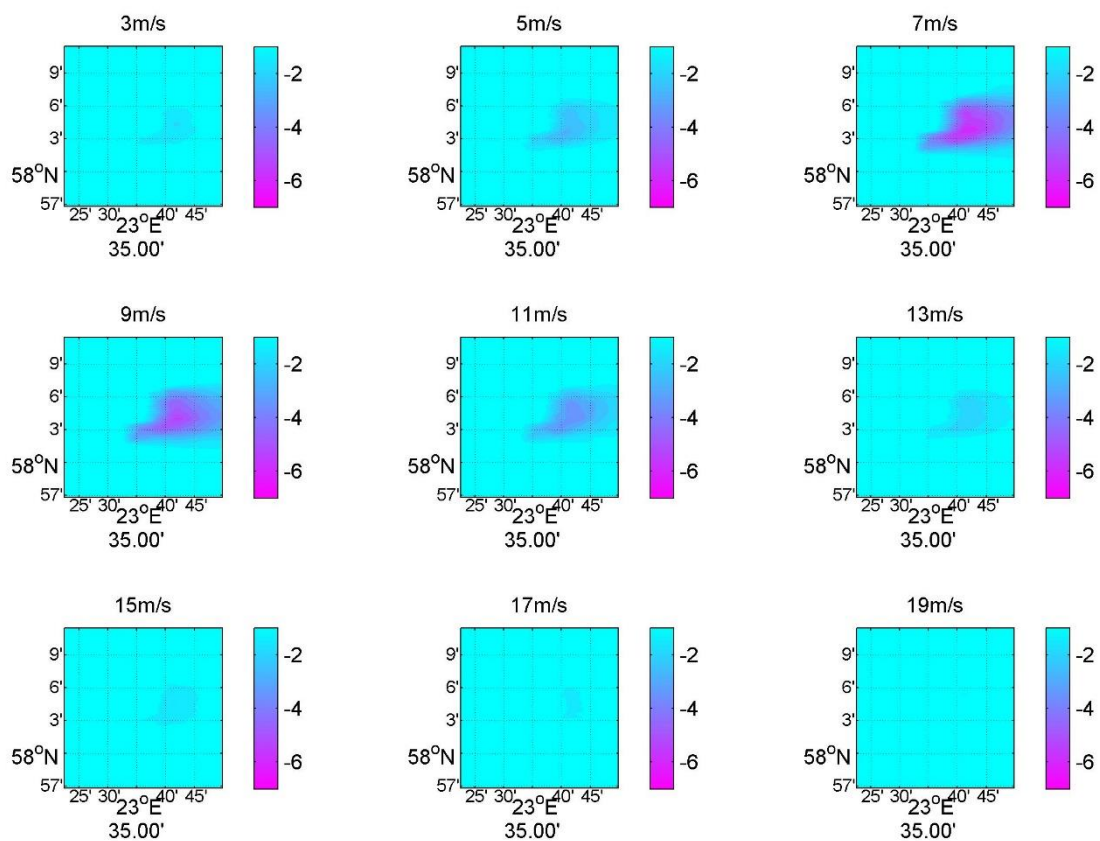
Joonis 4.2.6. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine põhjatuulega esialgsele alale ja täiendavale alale paigutatud tuulikute korral.



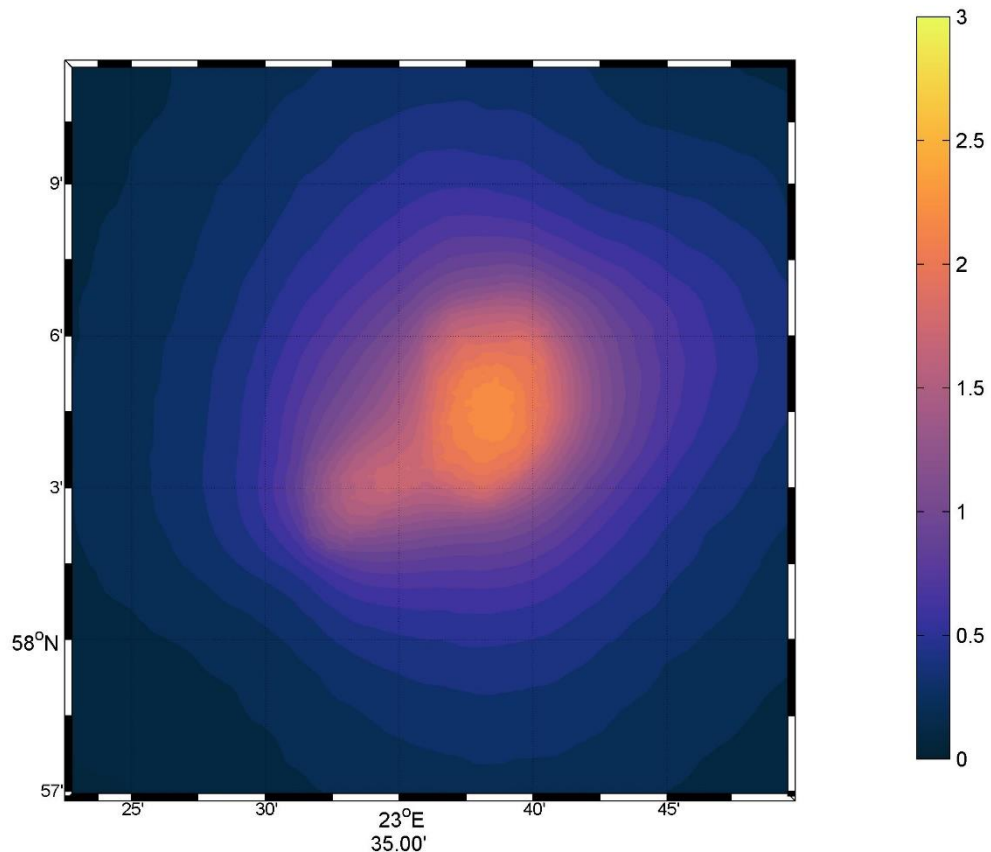
Joonis 4.2.7. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine idatuulega esialgsele alale ja täiendavale alale paigutatud tuulikute korral.



Joonis 4.2.8. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine lõunatuulega esialgsele alale ja täiendavale alale paigutatud tuulikute korral.



Joonis 4.2.9. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine läänetuulega esialgsele alale ja täiendavale alale paigutatud tuulikute korral.

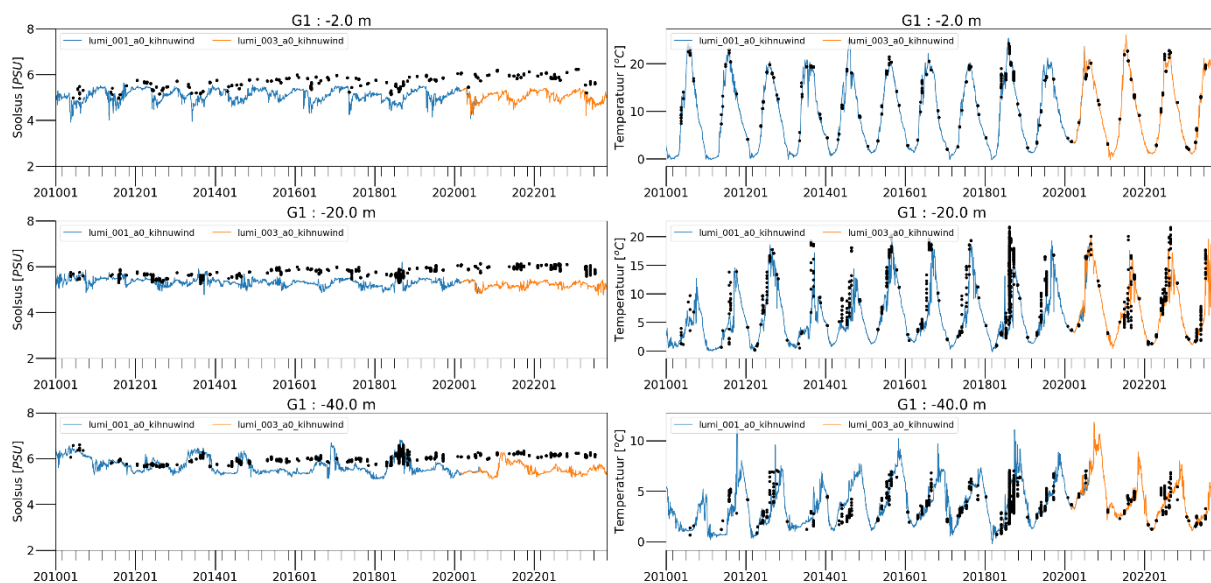


Joonis 4.2.10. Keskmine laine kõrguse muutus (cm) esialgsele alale ja täiendavale alale paigutatud tuulikute korral. Arvutuses on kasutatud 1992-2021 ERA5 tuuleandmeid (Hersbach et al., 2020), kuid ei ole arvestatud jääkatet. Seega joonisel kujutatud on maksimaalne mõju. Aastatel, mil jääd oli rohkem võib mõju olla veelgi väiksem.

4.3. Veesamba füüsikalised omadused

Temperatuuri ja soolsuse modelleerimistulemuste hindamiseks kasutati mõõtmisandmeid riikliku avamereseire jaama G1 lähistelt (23,30°E kuni 23,98°E ning 57,5°N kuni 57,80°N). Joonisel 4.3.1 on toodud modelleeritud soolsuse ja temperatuuri aegread pikaajalisest arvutusest perioodile 2010 kuni 2023. Üldiselt kirjeldab mudel pinna- ja põhjakihi temperatuuri muutusi hästi, kuid simuleeritud soolsuses esineb mõningaid kõrvalekaldeid - mudel alahindab soolsust nii põhja- kui pinnakihis. Keskmine erinevus on alla 0,5 g/kg. Mudelarvutuste tulemustele on iseloomulik suhteliselt suur varieeruvus – maksimaalse ja minimaalse soolsuse vahe on rohkem kui 1,5 g/kg ehk uuritavas piirkonnas on väga suur muutlikkus. Mõõtmistest tuvastatav varieeruvus on kuni 1 g/kg, aga samas on mõõtmiste ajaline lahutus ka oluliselt madalam (mõõtmisagedus keskmiselt kord kuus), mistõttu ei pruugi olla maksimaalsed,

minimaalsed olukorrad täpselt tabatud. Üllatavalt hästi on modelleeritud 2010. ja 2018. aasta kõrgemad põhjakihi soolsuse väärtused.



Joonis 4.3.1: Mõõdetud (punktid) ja modelleeritud (jooned) temperatuur ja soolsus avamerejaamas G1 erinevatel sügavustel pikaajalisest arvutusest (sinine) ja lühiajalisest (oranž) mõjuarvutusest A0.

4.3.1. Esialgne ala

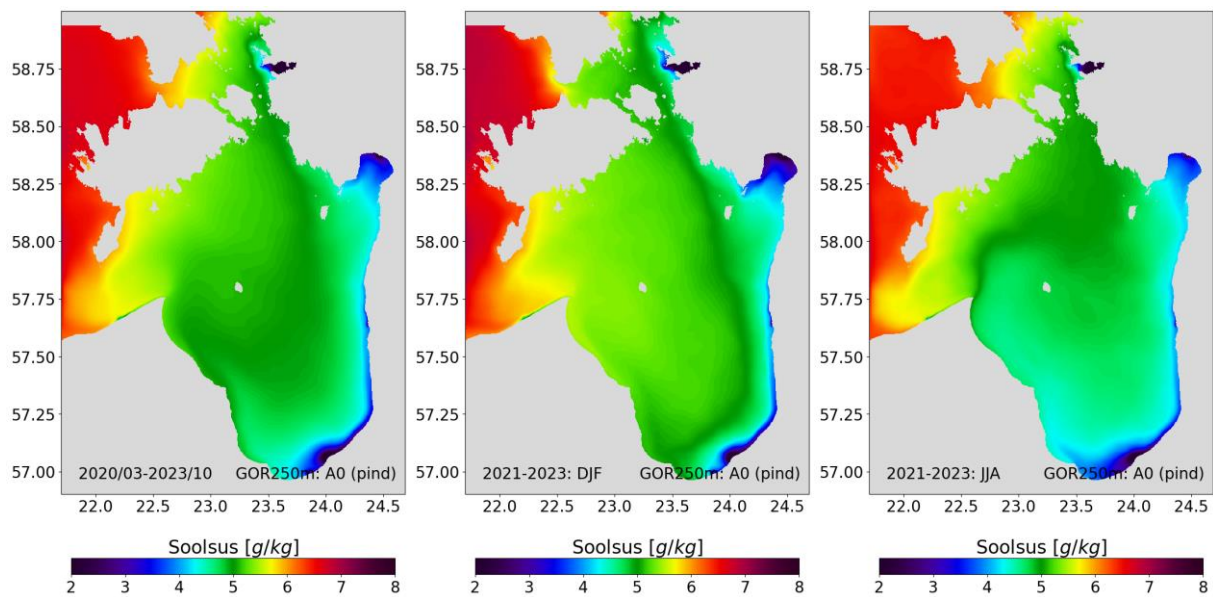
Veesamba elupaiga tingimused määravad ära temperatuur, soolsus, hapniku, toitainete, hõgususe ja muude ainete jaotused. Oluline on stratifikatsioon ja ainete vertikaalsed ja horisontaalsed gradiendid. Mõõtmiste põhjal võib järeldada, et (sub)mesomastaapi horisontaalsed gradiendid tuulepargi alal küll esinevad, kuid pikaajaliste keskmiste väljade gradiendid on tuulepargi piires tagasihoidlikud.

Lisaks hoovuse nõrgenemisele mõjutab veesamba karakteristikuid muutus vertikaalses segunemises. Vertikaalne segunemine omakorda on kõiki meresüsteemi komponente otseselt või kaudselt mõjutav protsess, sest vertikaalse segunemise abil toimub mere pindmise ja süvakihi vahel transport. See transport osaliselt defineerib mõlema kihi omadused, mis omakorda paneb paika pelagiaali elupaiga tingimused. Näiteks on vertikaalsel segunemisel oluline roll Läänemere ja ka Liivi lahe soolsusel. Põhjamerest tulev soolane veemass sukeldub mere alumistesse kihtidesse ning seguneb pindmise magedama veega. Jõgede suudmetest eemal

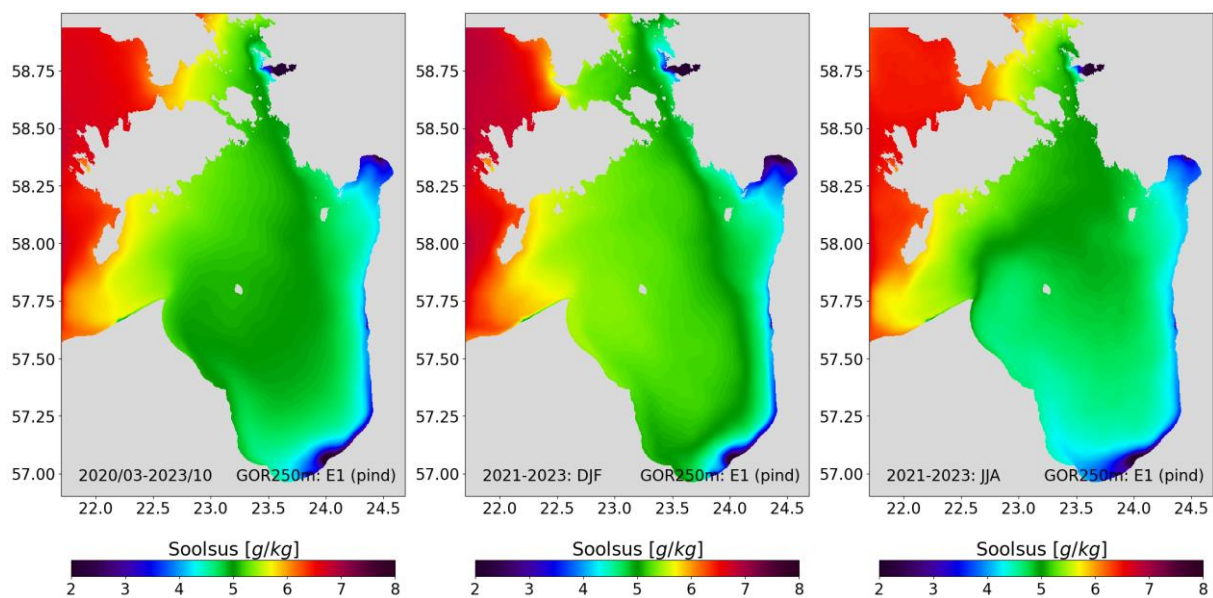
on primaarproduksioonile oluline vertikaalne toitainete transport, sest bioloogiliselt aktiivsel sesoonil tarbitakse mere ülakihis toitaineid limiteeriva aine (fosfor või lämmastik) lõppemiseni. Hapniku puudujääki põhjakihis soodustab muuhulgas vertikaalse segunemise vähenemine. Vertikaalse segunemise suurenemine vähendab stratifikatsiooni tugevust.

Ühest küljest põhjustavad tuulikupostid veesamba täiendavat segunemist ja stratifikatsiooni nõrgenemist (Grashorn and Stanev, 2016). Teisest küljest tuulepinge vähenemine merepinnal vähendab vertikaalset segunemist (Christiansen et al., 2023). Tuuleparkide mõju olulisust vertikaalsele segunemisele ja veesamba elupaikadele on viimastel aastatel näidanud mitmed uuringud. Uuringutes on saadud tulemuseks, et mõlemad vertikaalsele segunemisele vastastikku mõjuvat protsessi on olulised. On näidatud, et merre pandud struktuurid põhjustavad lokaalseid keeriseid ja suurendavad vertikaalset segunemist ja transport (Carpenter et al., 2016; Floeter et al., 2017; Rennau et al., 2012). Teisalt on ka leitud, et tuule vähenemine põhjustab muutuseid hoovuste struktuuris, vähendab vertikaalset segunemist ja aitab kaasa hapnikupuuduse tekkele (Christiansen et al., 2023; Daewel et al., 2022). Oluline on märkida, et enamuse tuuleparkide uuringuid on tehtud Põhjameres, mis on hüdrodünaamiliselt aktiivsem piirkond. Meie mõõtmiste põhjal oli tuulepargi piirkonnas keskmine hoovuse kiirus sõltuvalt sügavusest ja aastaajast vahemikus 5-8 cm/s. Põhjamere hoovuskiirused on tunduvalt suuremad (vt. Deyle et al., 2024) ning on lisaks tuulele genereeritud loodete poolt. On näidatud, et tõusumõõna hoovuse tugevusest sõltub ka tuulepargi mõju (Christiansen et al., 2022). Kuna loodete roll Läänemere dünaamikas on väga tagasihoidlik ja peamine hoovuste käivitaja on otseselt, või kaudselt läbi veetaseme gradientide või basseini omavõnkumiste tekitamise tuul, siis on tuule suhteline panus vertikaalsesse segunemisse siin nt. Põhjamerega suurem.

Joonisel 4.3.1.1 on toodud keskmine pinnakihi soolsuse jaotus alternatiivi A0 jaoks ning joonisel 4.3.1.2 alternatiivile E1, st. kui tuulikud rajatakse ainult esialgsele alale. Üldiselt on basseini mastaapi soolsuse jaotused mõlema alternatiivi kohal sarnased ning ilmneb Daugava ja Pärnu jõgede tugev mõju lahe soolsuse jaotusele. Väikseimad soolsuse väärtused esinevad lahe lõunaosas ja Pärnu lahes ning piki lahe idarannikut jäävad keskmise soolsuse väärtused väiksemaks kui 4 g/kg. Lahe keskosas on keskmine soolsus 5 g/kg ja Irbe väina lähistel üle 6 g/kg. Soolsusvälja iseloomustab ka tugev sesoonne muutlikkus – suurimad väärtused pinnakihi keskmises soolsuses on talvisel perioodil, kui veesammas on läbisegunenud.

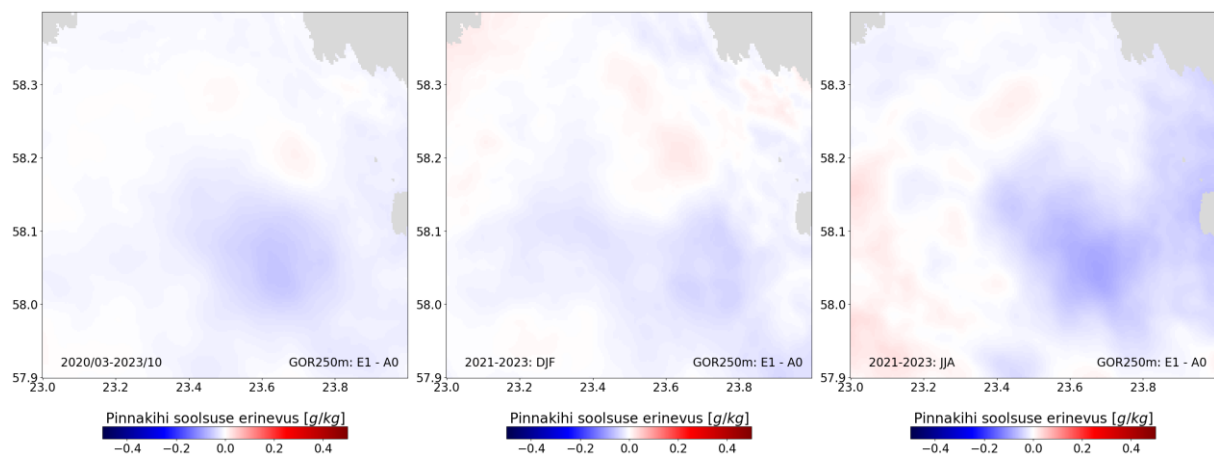


Joonis 4.3.1.1: Pinnalähedane soolsus alternatiivi A0 korral.



Joonis 4.3.1.2: Pinnalähedane soolsus alternatiivi E1 korral.

Erinevused pinnakihi soolsuses alternatiivi A0 ja E1 vahel on toodud joonisel 4.3.1.3. Mõju soolsusele tuulikute piirkonnas avaldub soolsuse vähenemisega, seejuures suurimad muutused on suvisel perioodil ning väiksemad talvisel perioodil.

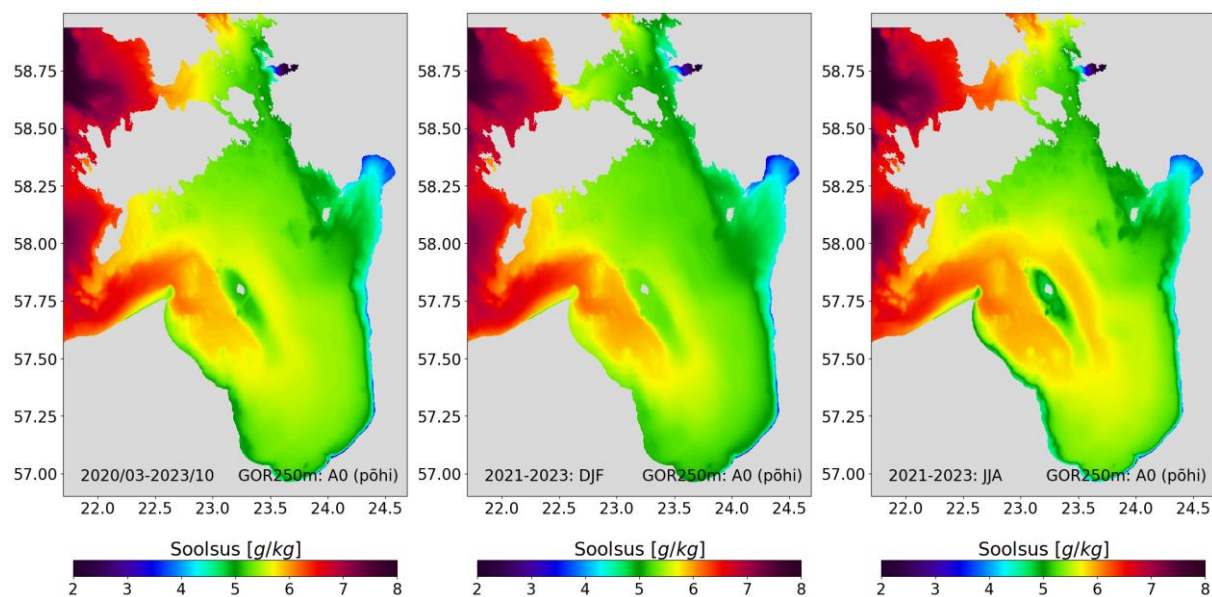


Joonis 4.3.1.3: Pinnakihi soolsuse erinevus alternatiivides A0 ja E1.

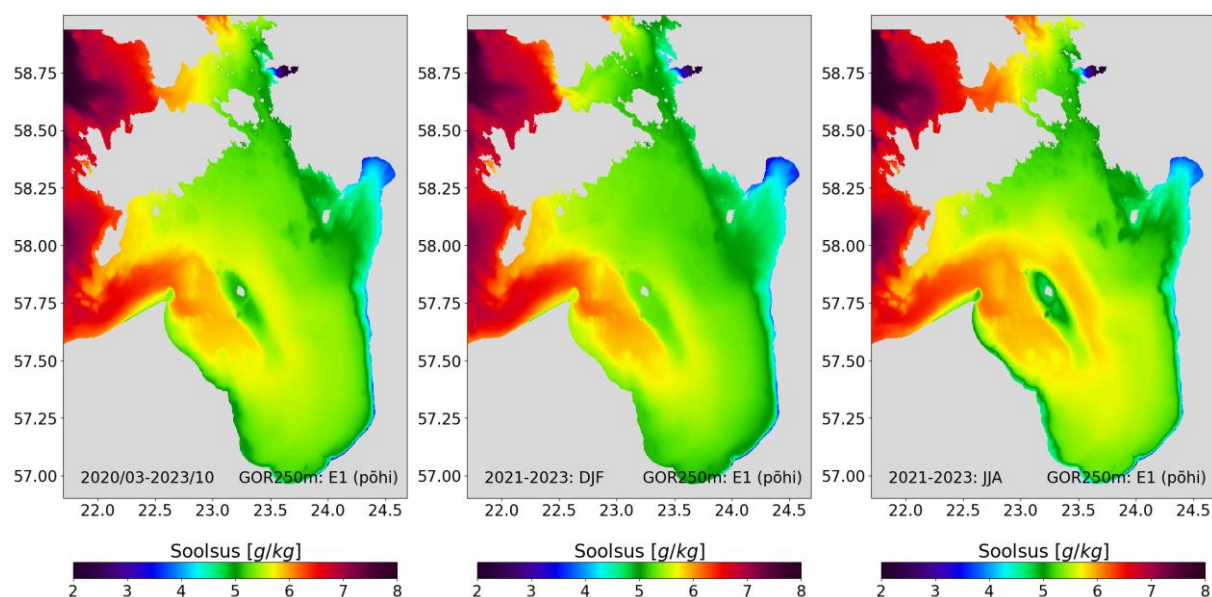
Keskmise põhjalähedase soolsuse jaotused koos erinevusega alternatiivide A0 ja E1 vahel sarnaselt pinnakihi soolsuse jaotusega on toodud joonistel 4.3.1.4 kuni 4.3.1.6. Suurimad põhjakihi soolsused on lahe lääneosas. Soolasem vee mass sirutub Irbe väinast lõunasse piki lahe läänerannikut. Suvisel perioodil suurenevad põhjalähedase soolsuse väärtused ka Ruhnust idapool ehk saare sügavaimates osades.

Põhjalähedase soolsuse muutused on sarnased pinnakihi muutustega – tuulikute piirkonnas soolsus väheneb (joonis 4.3.1.6). Tõenäoliselt on soolsuse vähenemise taga muutused adveksioonis, st. hoovustes. Teatud mõju võib olla ka vertikaalse segunemise mõjutamisel.

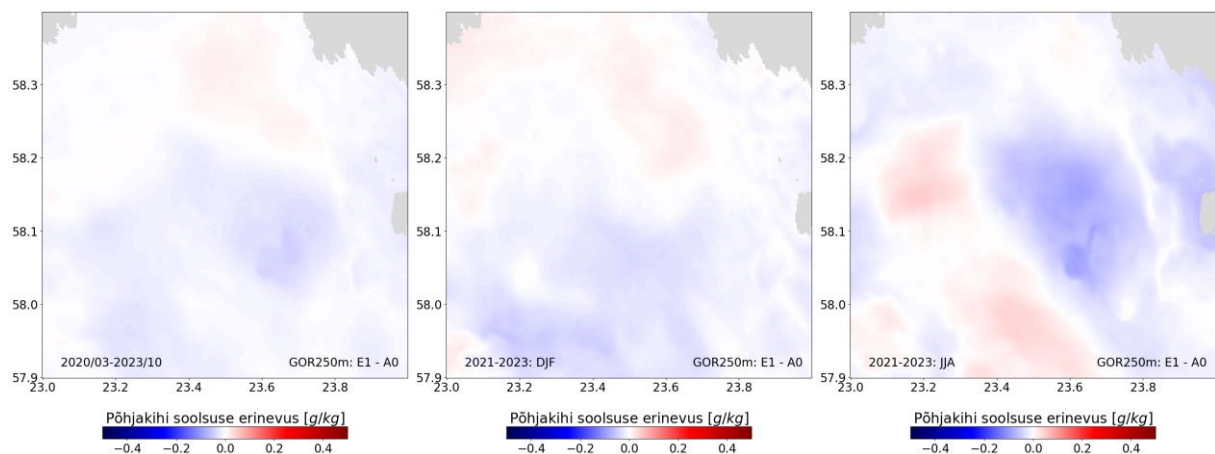
Võrreldes loodusliku varieeruvusega, mille amplituud on suurusjärgus 1-1,5 g/kg, on tuulepargi poolt tekitatud keskmine mõju soolsusele ca 20-30 korda väiksem. Basseinimastaapi soolsuse väljadele on mõju marginaalne.



Joonis 4.3.1.4: Põhjalähedane soolsus alternatiivi A0 korral.

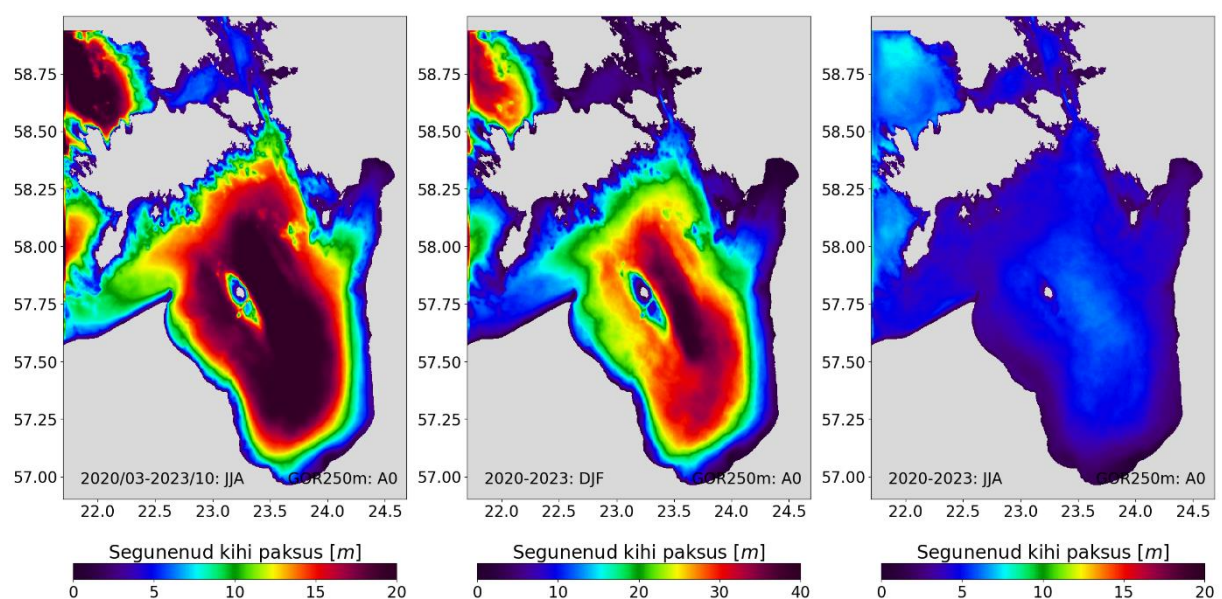


Joonis 4.3.1.5: Põhjalähedane soolsus alternatiivi E1 korral.

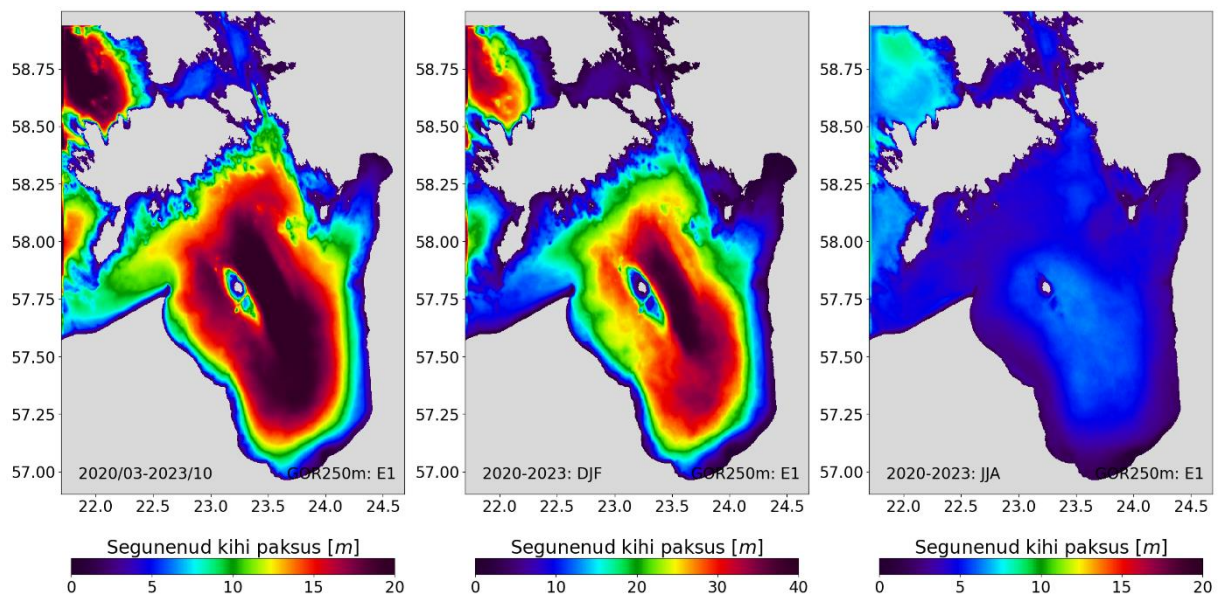


Joonis 4.3.1.6: Põhjalähedase soolsuse erinevus alternatiivides A0 ja E1.

Järgnevalt vaatame mõju olulisele stratifikatsiooni kirjeldavale parameetrile, ülemise segunenud kihi paksusele. Keskmine segunenud kihi paksuse ruumiline jaotus Liivi lahes alternatiivide A0 ja E1 korral on toodud joonistel 4.3.1.7 ja 4.3.1.8. Stratifikatsioon Liivi lahes on tugevaim suvel. Sel aastaajal on segunenud kihi paksus tunduvalt väiksem eufootsest kihi paksusest ning segunenud kihi paksus tavaliselt primaaproduktsiooni ei piira. Kihi paksus võib suvel sünoptilised mastaabis kõikuda vähemalt paarkümmend meetrit (Liblik et al., 2017). Talvisel perioodil on stratifikatsioon nõrk või olematu ning veesammas on enamasti läbi segunenud pinnalt põhjani. Ülemine segunenud kiht tekib kevadel tänu magedama vee adveksioonile (Stipa et al., 1999), kuid suvel on peamine roll veesamba stratifikatsioonis temperatuuri vertikaalsel gradiendil, soolsuse mõju on väiksem. Kevadel piisab juba nõrgast stratifikatsioonist, et tekiks kevadõitseng.

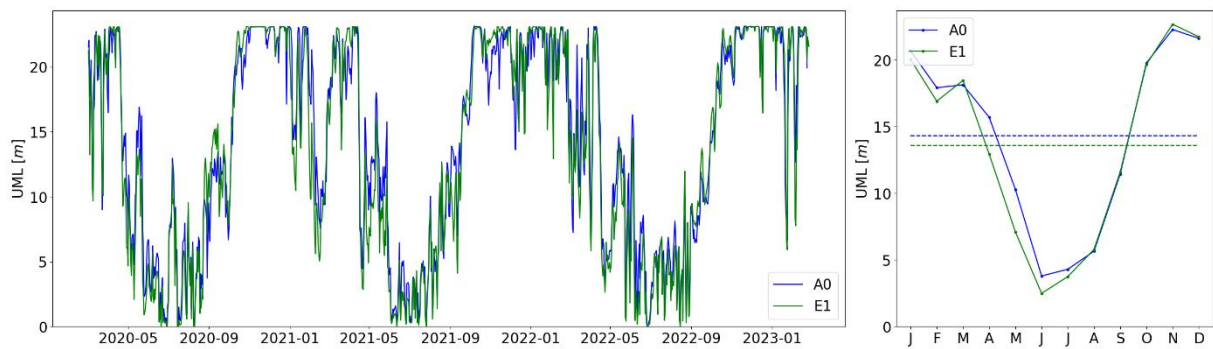


Joonis 4.3.1.7: Segunenud kihi paksus alternatiivis A0.



Joonis 4.3.1.8: Segunenud kihi paksus alternatiivis E1.

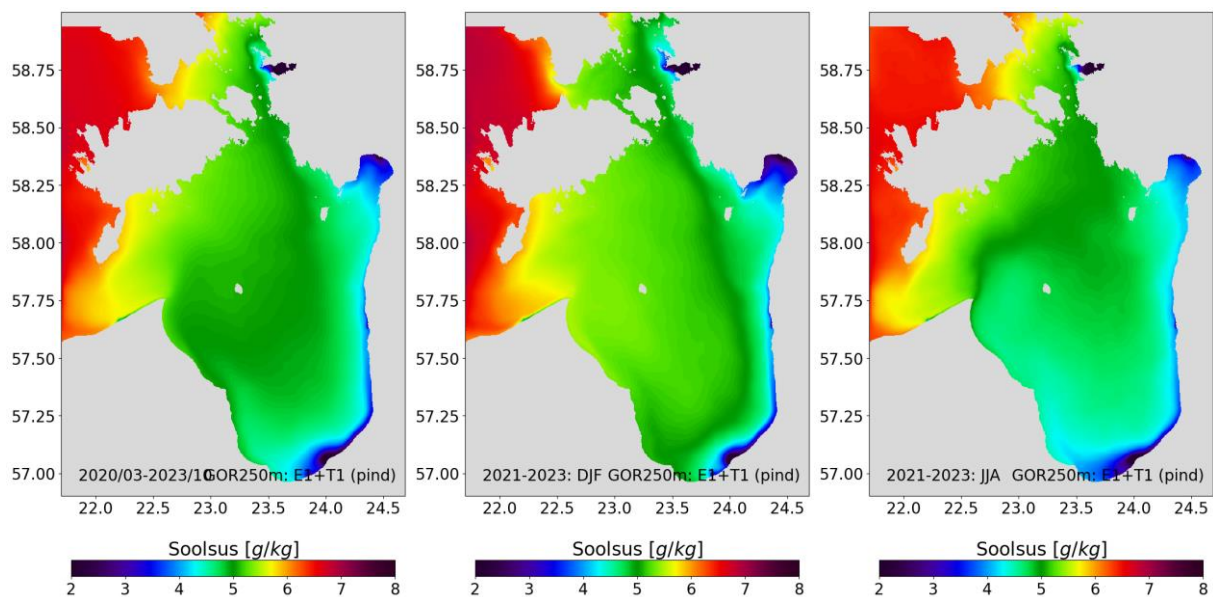
Esialgse tuulikute arendusala (E1) keskmise segunenud kihi paksuse ajaline käik koos sesoonse käiguga on toodud joonisel 4.3.1.9. Talvel ulatub simuleeritud segunenud kiht pea merepõhjani. Suvisel perioodil prevaleerib õhuke segunenud kiht. Ajaline varieeruvus sõltub tuule tekitatud vertikaalsest segunemisest, aga ka mesomastaapsete keeriste esinemisest ja tõenäoliselt ka submesomastaapsetest protsessidest piirkonnas. Tuule puudumisel on vertikaalne segunemine väga väike ning pinnakihi soojenemisel või magedama vee adveksiooni tõttu tekib ülakihis väga õhuke kiht, mis järgneva tuule sündmusega läbi segatakse. Sellist segunenud kihi varieeruvust ja ajalist käiku on registreeritud ka instrumentaalsete mõõtmistega (Liblik et al., 2017). Suurim tuulikute mõju segunenud kihi paksusele ilmneb kevad-suvisel perioodil, kui tuulikute rajamisega segunenud kihi paksus väheneb kuni 2 meetrit. Just kevadel on segunenud kihi dünaamika eriti oluline, sest sellel on oluline roll kevadõitsengul tekkel ja ajastusel (Purina et al., 2018; Stipa et al., 1999). Segunenud kihi paksuse vähenemine kevadel võib kaasa tuua varasema ja intensiivsema kevadõitsengu. Näiteks on tuvastatud, et Läänemere avaosas on viimastel aastakümnetel tänu kõrgematele pinnakihi temperatuuridele kasvanud periood, mil segunenud kiht on piisavalt õhuke planktoni efektiivseks kasvuks, mis omakorda on pikendanud kõrgema bioloogilise produktiivsusega perioodi mere ülakihis (Kahru et al., 2016). Pidades silmas simulatsioonide määramatust, ei ole võimalik usaldusväärselt anda kvantitatiivset hinnangut, kui palju segunenud kihi paksuse muutus võiks mõjutada kevadõitsengut või primaarproduktiooni tervikuna, kuid potentsiaal muutuseks on olemas.



Joonis 4.3.1.9: Tuulepargi piirkonna E1 alas ülemise segunenud kihi paksuse ajaline käik perioodil 2020-2023 alternatiivid A0 ja E1 korral koos sama perioodi sesoonse käiguga (paremal).

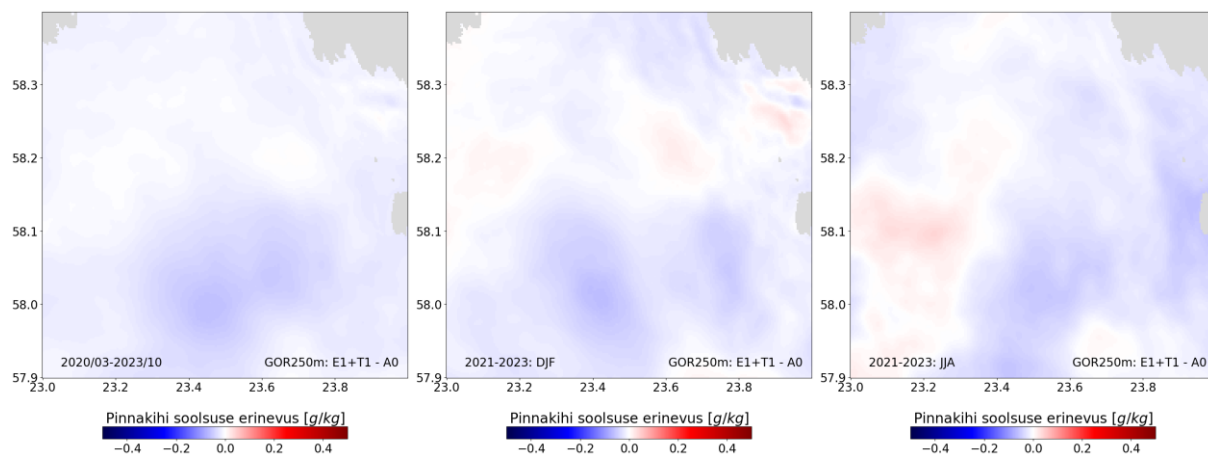
4.3.2. Esialgne ala ja täiendusala

Pinna- ja põhjakihi soolsus täiendusosalal koos vastavate muutustega on toodud joonistel 4.3.2.1 kuni 4.3.2.5. Suurimad muutused nii põhja- kui pinnalähedases soolsuses ilmnevad tuulepargi piirkonnas, kusjuures põhjalähedase soolsuse suuremad muutused leiavad aset suvisel perioodil.

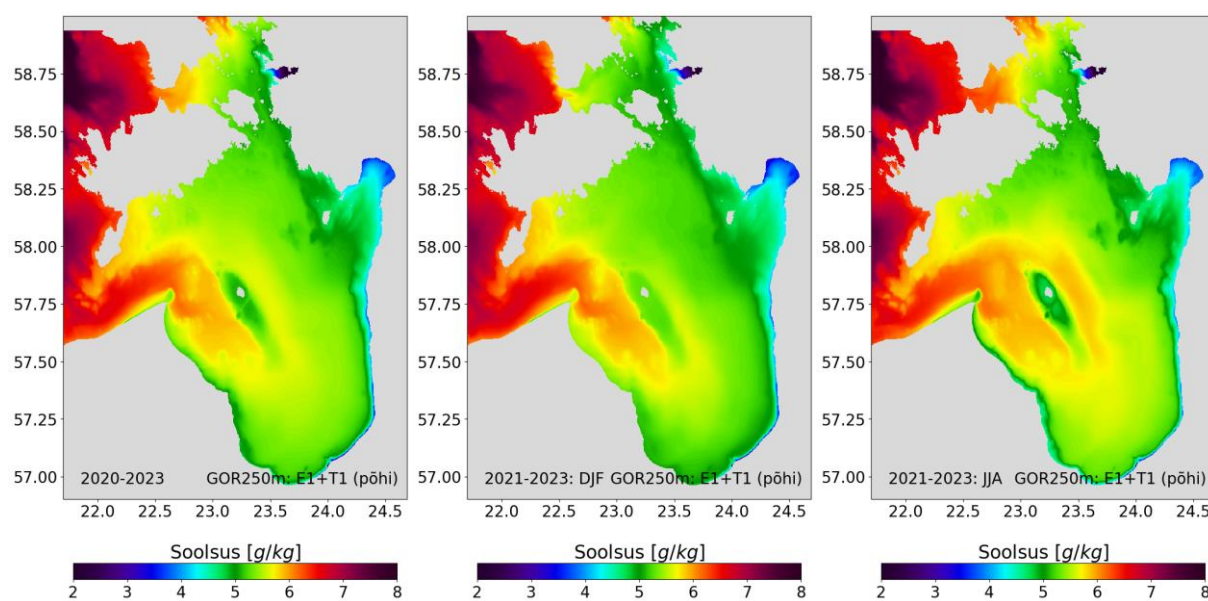


Joonis 4.3.2.1: Pinnalähedane soolsus alternatiivi E1+T1 korral.

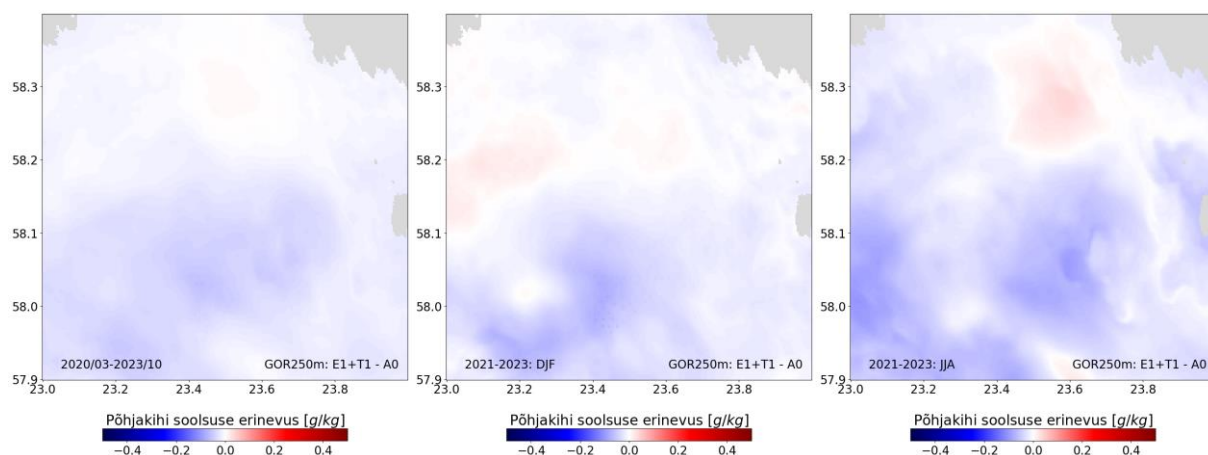
Tuulepargi piirkonnas soolsus väheneb kuni 0,05 g/kg, kuid võib suureneda tuulepargist eemal. Vähenenud soolsusega piirkond on E1+T1 alternatiivi puhul võrreldes E1 alternatiiviga ulatuslikum.



Joonis 4.3.2.2: Pinnalähedase soolsuse erinevus alternatiivide E1+T1 ja A0 korral.

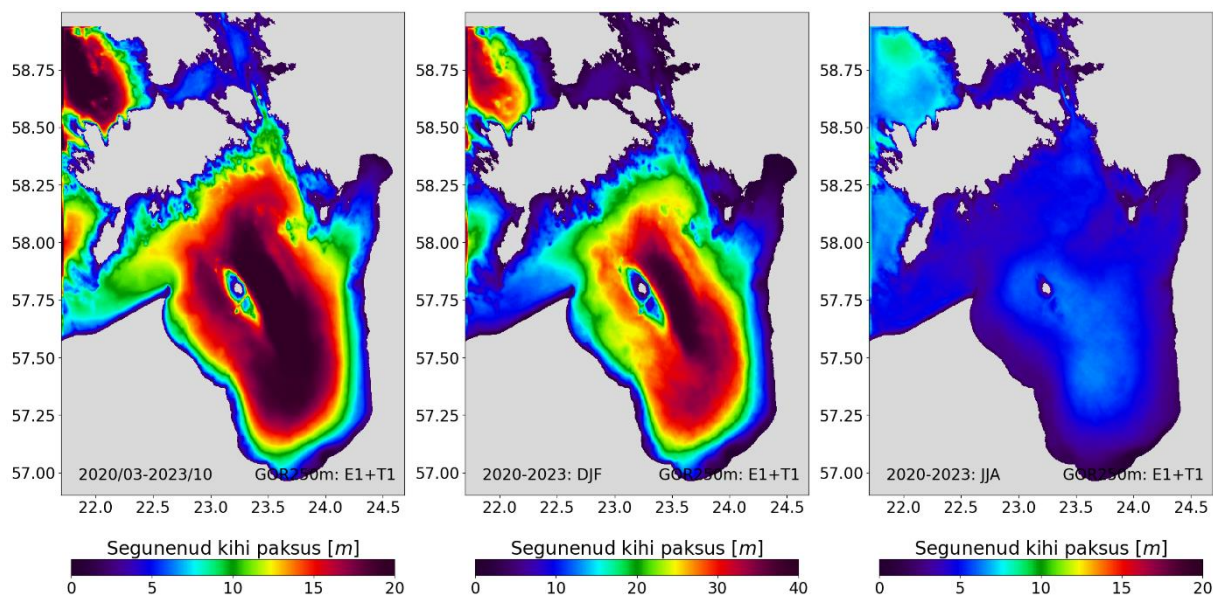


Joonis 4.3.2.3: Põhjalähedane soolsus alternatiivi E1+T1 korral.

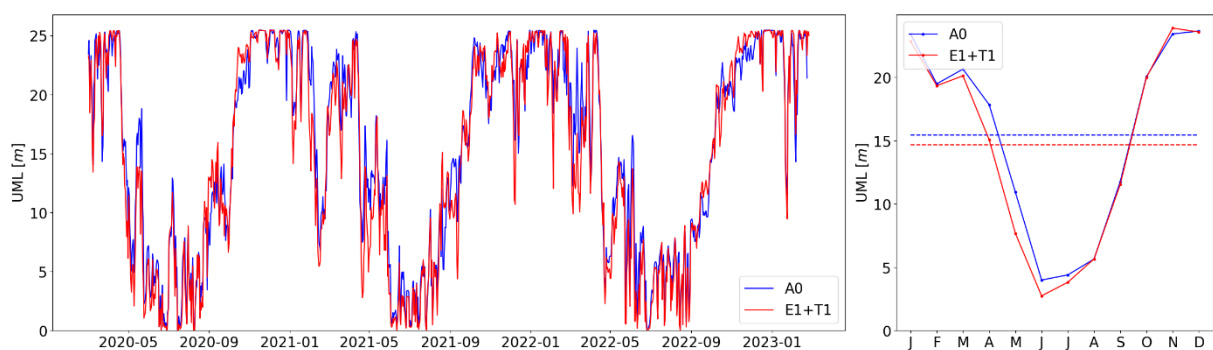


Joonis 4.3.2.4: Põhjalähedase soolsuse erinevus alternatiivide E1+T1 korral.

Keskmise segunenud kihi paksuse ruumilised jaotused on toodud joonisel 4.3.2.5 ning ajaline käik E1+T1 piirkonnas joonisel 4.3.2.6. Esinevad samad tendentsid, mis esialgse ala puhul, st. segunenud kihi paksus väheneb arvestatavalt kevadel ja suvel. Sügisel, talvel on mõju marginaalne. Võrreldes E1 alternatiiviga leiab E1+T1 puhul mõju aset suuremal alal.



Joonis 4.3.2.5: Segunenud kihi paksus alternatiivi E1+T1 korral.



Joonis 4.3.2.6: Tuulepargi piirkonna E1+T1 alas ülemise segunenud kihi paksuse ajaline käik perioodil 2020-2023 alternatiivides A0 (sinine joon), E1 (roheline joon) ja E1+T1 (punane joon) koos sama perioodi sesoonse käiguga (paremal).

4.4. Veesamba biogeokeemilised omadused

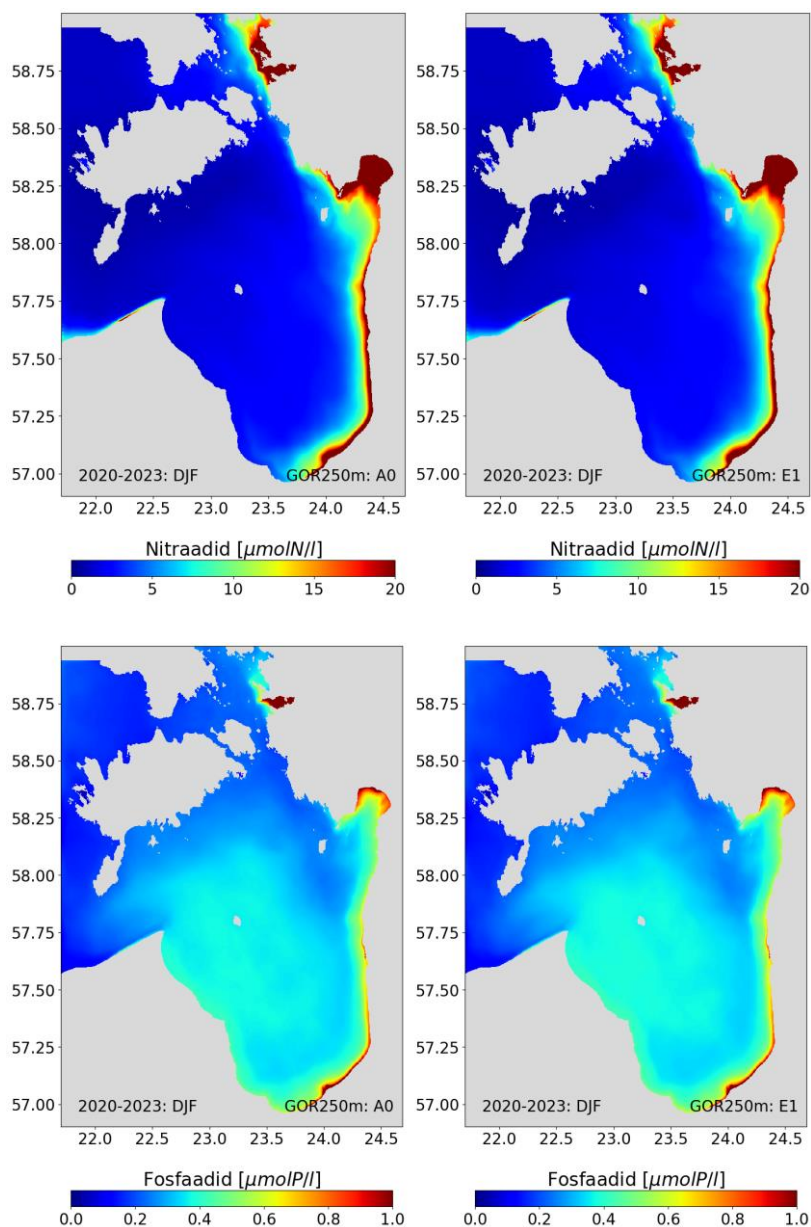
4.4.1. Esialgne ala

Ülemise 10 m kihi keskmised toitainete talvised jaotused alternatiivide A0, E1 korral on toodud joonisel 4.4.1.1. Talvised toitainete kontsentratsioonid pinnakihis annavad aimu kevadise

vetikate õitsengu potentsiaali kohta. Ühtlasi on kontsentratsioonid eutrofeerumise indikaatoriks. Kuigi biogeokeemiliste näitajate modelleerimise määramatus on võrdlemisi suur, võib võrdsetel alustel arvutatud alternatiivide võrdlusest tuulepargi mõju tendentsidest aimu saada. Tuulepargi kasutusaegne mõju biogeokeemilistele väljadele on eelkõige läbi füüsikaliste protsesside: muutused hoovustes ja/või vertikaalses segunemises.

Suurim toitainete koormus Liivi lahte saabub jõgedest. Sarnaselt soolsusele on ka toitainete ruumilises jaotuses näha Daugava ja Pärnu jõgede mõju. Piki lahe idarannikut on suurimad nitraatide ja fosfaatide väärtused kõigi alternatiivide korral. Idarannikust eemal, lahe avaosas, on talvised nitraatide kontsentratsioonid märgatavalt väiksemad. Võimalik, et simulatsioon ülehindab nitraatide gradienti idaranniku ja avamere vahel. Irbe väinast läänes, Läänemere avaosas esinevad veelgi väiksemad sisaldused. Fosfaatide puhul on horisontaalsed gradiendid väiksemad. Fosfaatide jaotustes ja fosfori bilansis üldisemalt mängib arvestatavat rolli ka fosfori settest vabanemine. Seejuures on settest vabanemine intensiivsem hapnikuvaestes tingimustes, mis eelkõige leiavad aset lahe sügavamates osades suve teises pooles ja sügisel.

Suuri muutusi basseini mastaapi toitainete horisontaalsetes jaotuses alternatiivide vahel ei ilmne. Võrreldes ranniku ja lahe avaosa vahel olevate horisontaalsete gradientidega on pargi töötamisega aset leidvad muutused toitainete väljades marginaalsed.

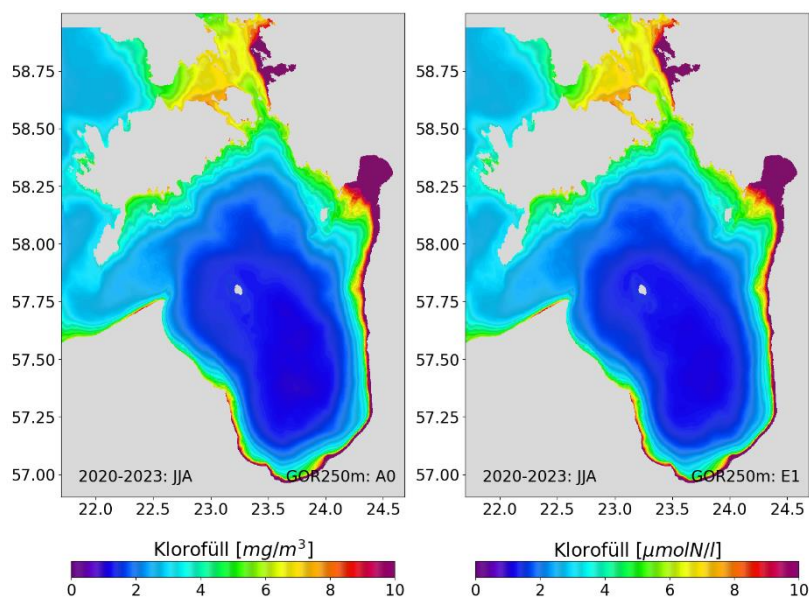


Joonis 4.4.1.1: Ülemise 10 m kihi keskmine toitainete sisaldus talvisel perioodil alternatiivide A0 ja E1 korral.

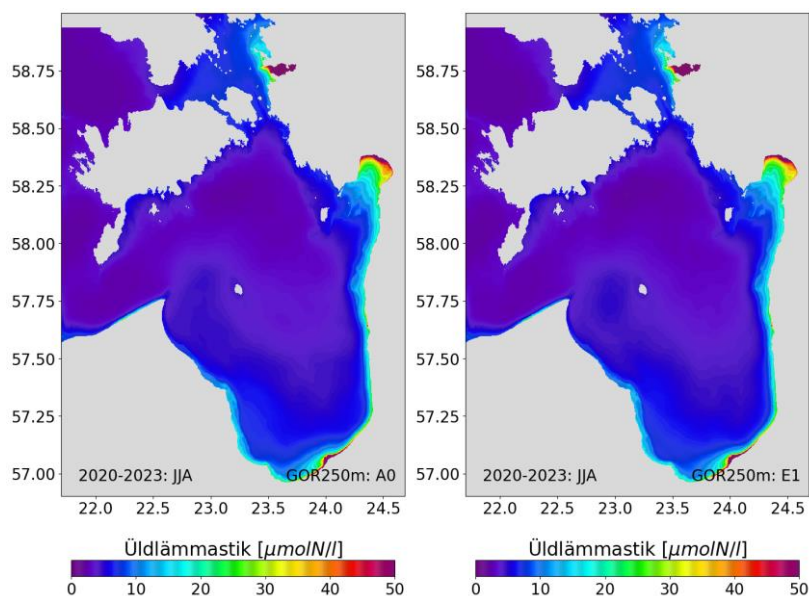
Järgnevalt vaatame klorofüllü ja üldainete (üldfosfor ja üldlämmastik) jaotuseid. Klorofüllü sisaldus kirjeldab primaarproduktiooni intensiivsust, st. fütoplanktoni hulka vees. Ka klorofüll ja üldainete sisaldused ülemises 10 m kihis on eutrofeerumise indikaatorid.

Klorofüllü suurimad väärtused on ranniku lähedal, märgatavalt väiksemad lahe avaosas. Üldainete keskmised kontsentratsioonid on samuti kõrgemad jõesuudmete läheduses ehk piirkondades, kus soolsus on väiksem ja talviste toitainete kontsentratsioonid samuti suured. Tuleb silmas pidada, et need on suve keskmised jaotused. Sünoptilises mastaabis võivad arvestatavalt suuremad väärtused esineda ka lahe avaosas, sh. tuulepargi piirkonnas.

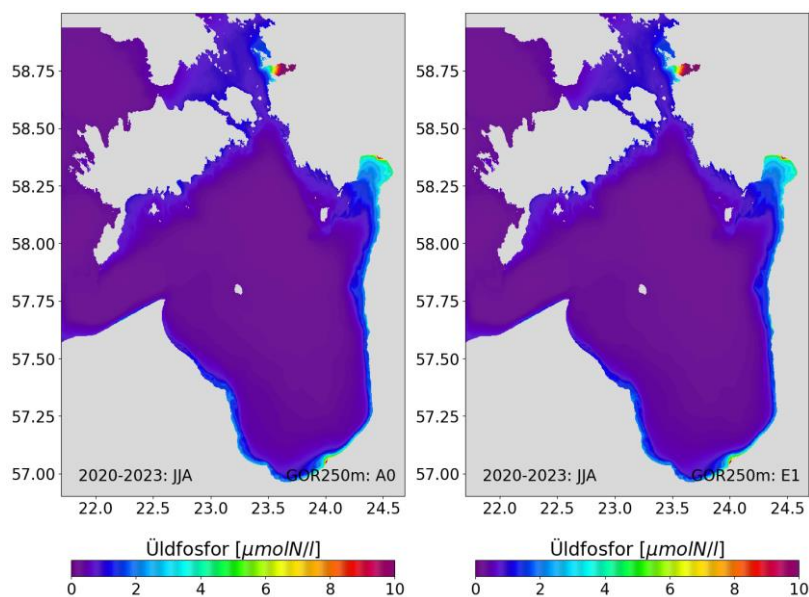
Keskmine pinnakihi klorofüllü ruumiline jaotus koos üldainete jaotusega erinevate alternatiivide korral on toodud joonistel 4.4.1.2 kuni 4.4.1.4. Sarnaselt talvistele toitainete jaotustele suuri muutusi basseini mastaapi klorofüllü ja üldainete horisontaalsetes jaotuses alternatiivide vahel ei ilmne. Võrreldes ranniku ja lahe avaosa vahel olevate horisontaalsete gradientidega on pargi töötamisel aset leidvad muutused väljades marginaalsed.



Joonis 4.4.1.2: Ülemise 10 m kihi keskmine klorofüllü sisaldus suvisel perioodil alternatiivide A0 ja E1 korral.

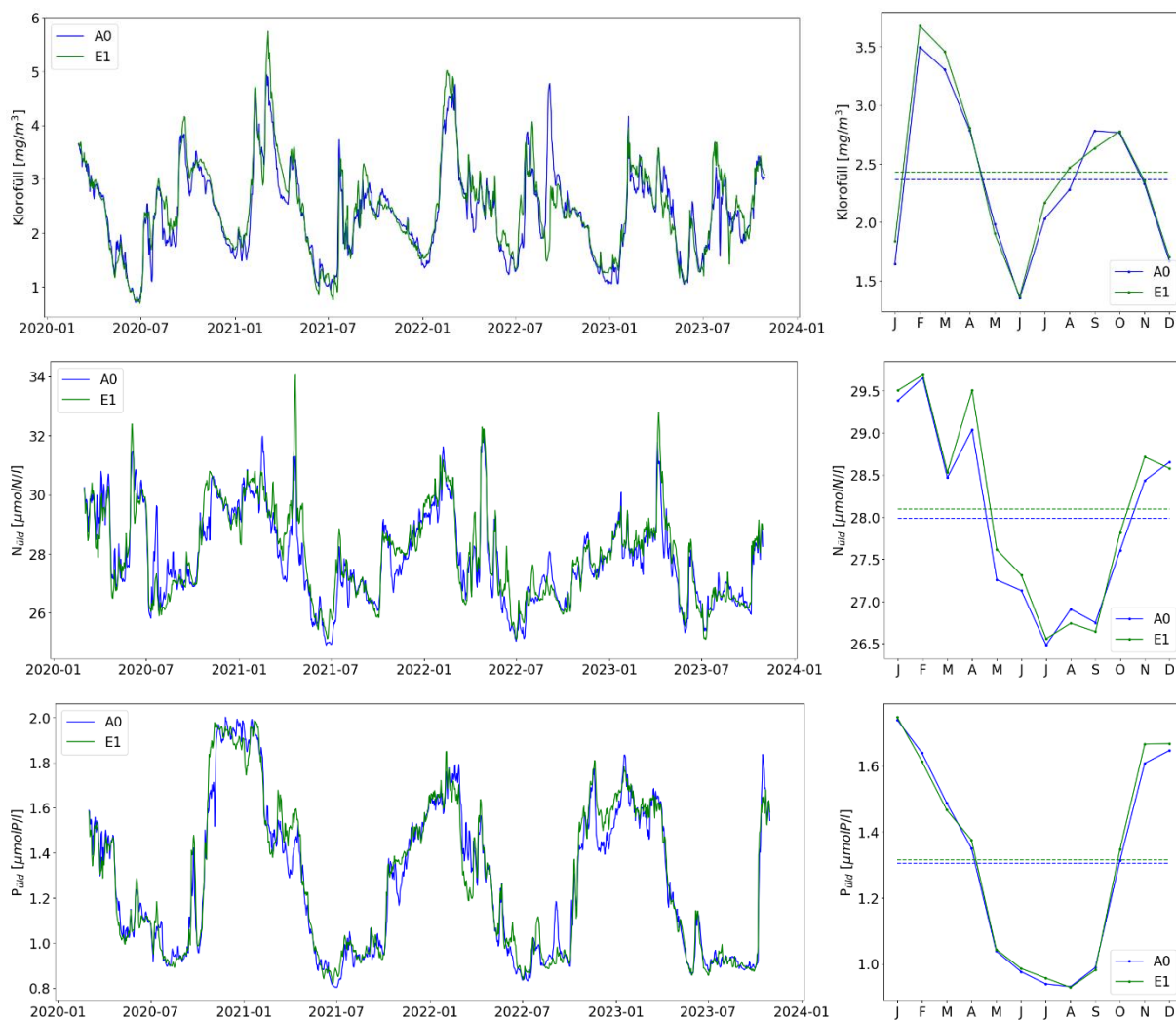


Joonis 4.4.1.3: Ülemise 10 m kihi keskmine kogulämmastiku sisaldus suvisel perioodil alternatiivide A0 ja E1 korral.



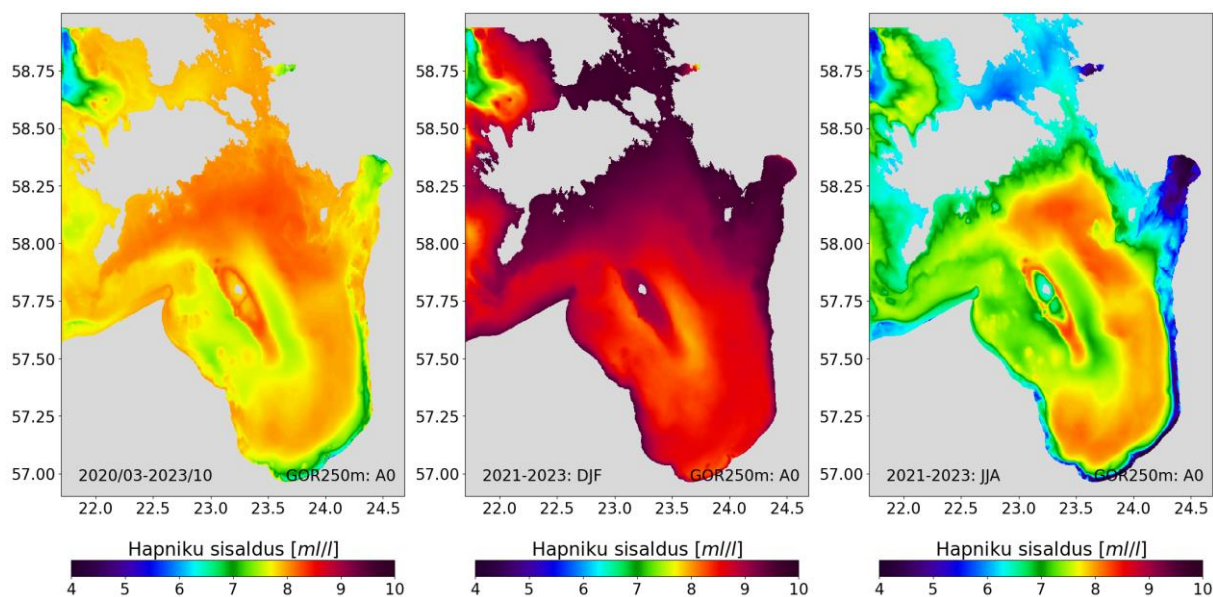
Joonis 4.4.1.4: Ülemise 10 m keskmine kogufosfori sisaldus suvisel perioodil alternatiivide A0 ja E1 korral.

Esialgsele alal keskmistatud üldainete ja klorofüllil ajaline käik koos sesoonse käiguga alternatiivi A0 ja E1 korral on toodud joonisel 4.4.5. Teatud lokaalseid muutuseid tuulepargi alal võib täheldada. Veidi suurenevad klorofüllil väärtused kevadel. Võib arvata, et viimane on tingitud segunenud kihi paksuse vähenemisega. Teiseks põhjuseks võib olla sesoonse stratifikatsiooni tekke varasemale ajale nihkumist. Marginaalset (1-2%) suurenemist võib märgata ka üldlämmastiku kevadistes ja suvistes väärtustes. See muutus on simulatsiooni määramatusega võrreldes väike ning ei ole võimalik usaldusväärselt kinnitada, kas ka tegelikkuses aset leiab.

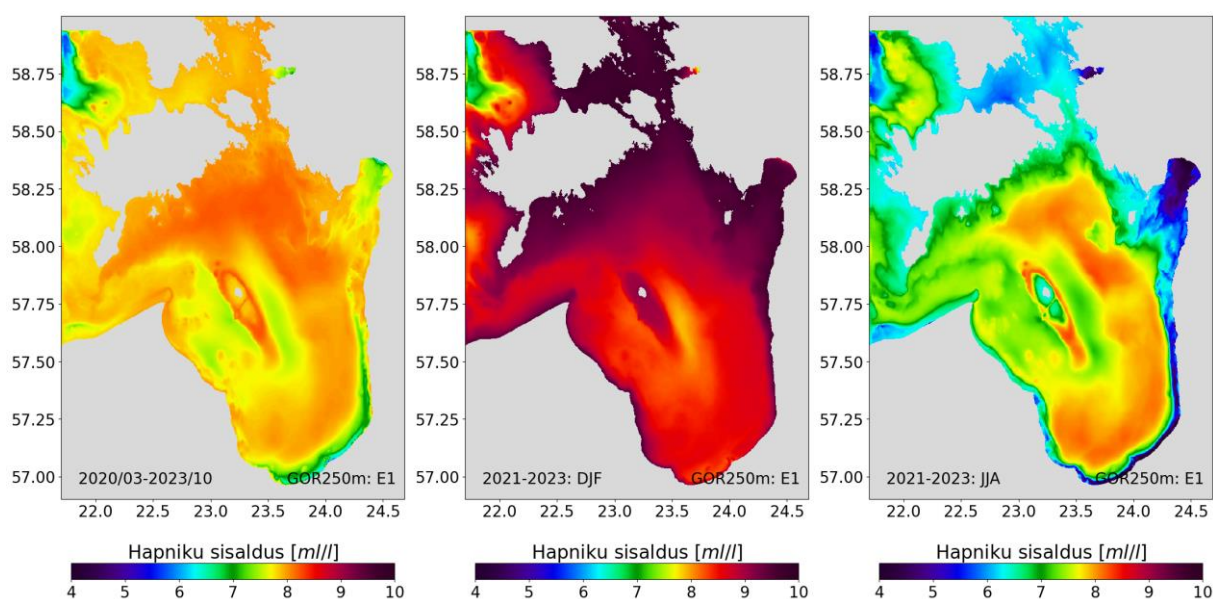


Joonis 4.4.1.5: Tuulepargi piirkonnas E1 klorofüll, üldläämmastiku ning üldfosfori ajaline käik ülemises 10 m veekihis, perioodil 2020-2023 alternatiivide A0 ja E1 (vasakpoolsed paneelid) korral koos sama perioodi sesoonse käiguga (parempoolsed paneelid).

Liivi lahes esineb sesoonne hapnikupuudus. Keskmise põhjalähedase hapniku kontsentratsiooni ruumiline jaotus hetkeolukorra ja esialgse ala tuulikute korral on toodud joonistel 4.4.1.6 ja 4.4.1.7. Suurimad põhjalähedase hapniku väärtused Liivi lahes on talvisel perioodil, kui veesammas on segunenud. Märkatavalt väiksemad kontsentratsioonid esinevad suvisel perioodil. Mudel ülehindab hapniku kontsentratsioone sügavamate piirkondade põhjalähedases kihis ning tõenäoliselt alahindab madalamates piirkondades, kuid võrdsetel alustel tehtud alternatiivide arvutused annavad siiski aimu tuulepargi rajamise mõjust. Basseinimastaapi hapniku dünaamikat tervikuna tuulepargi rajamine ei muuda.

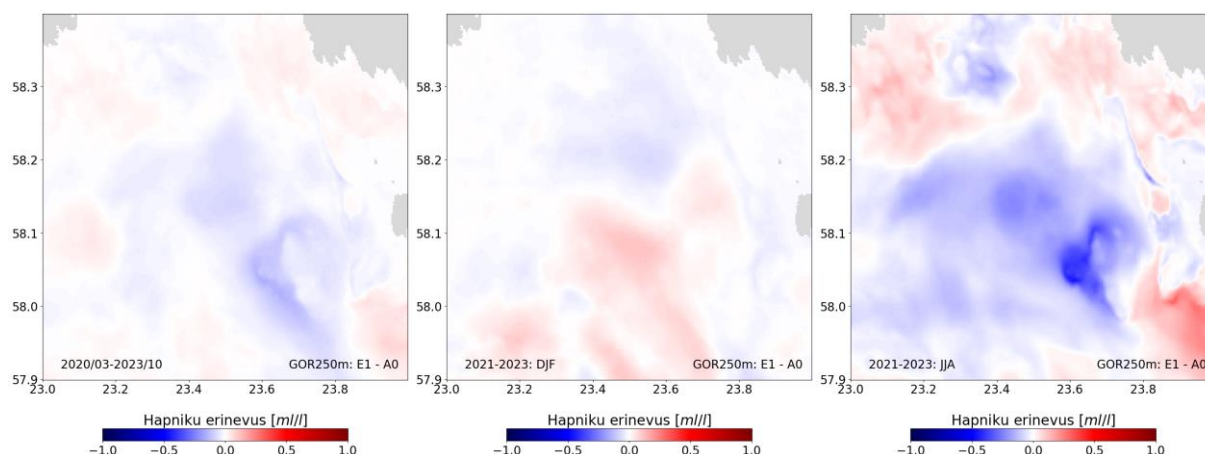


Joonis 4.4.1.6: Keskmine põhjalähedane hapnikusisaldus kogu perioodi (vasakul) ning talvisel ja suvisel perioodil alternatiivi A0 (hetkeolukord) korral.



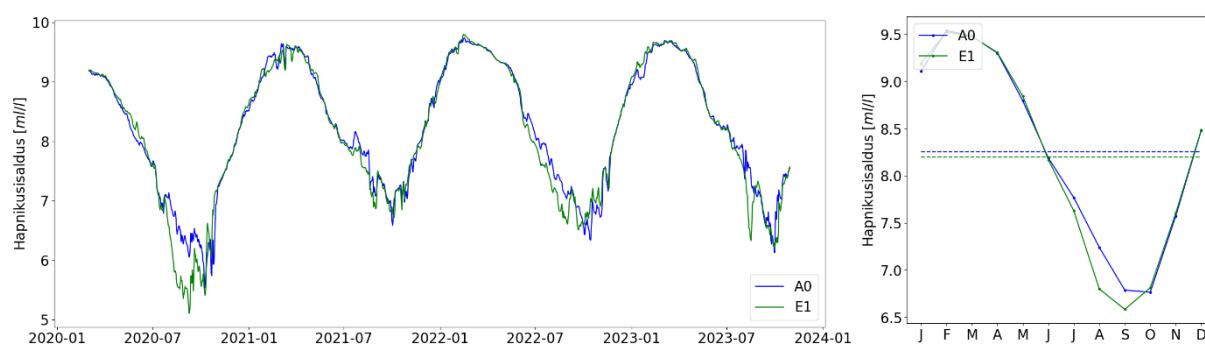
Joonis 4.4.1.7: Keskmine põhjalähedane hapnikusisaldus kogu perioodi (vasakul) ning talvisel ja suvisel perioodil alternatiivi E1 korral.

Põhjalähedase hapniku kontsentratsioonide muutus esialgse ala tuulikute rajamisega on toodud joonisel 4.4.1.8. Suurimad muutused on suvisel perioodil, mil hapniku sisaldus võib kolme kuu keskmisena väheneda rohkem kui 0,5 ml/l. Oluline on märkida, et hapnikupuudus põhjakihtides leiab aset suve lõpus ja sügisel, mistõttu just sel perioodil toimuv täiendav hapniku vähenemine on merekeskkonna jaoks eriti oluline. Tõenäoliselt on muutus seotud tuule kiiruse ja vertikaalse segunemise vähenemisega. Talvisel perioodil on muutused marginaalsed ja ebaolulised, kuna veesammas on siis läbi segunenud ja arvestatavat hapnikupuudust pargiala põhjakihtis ei esine.



Joonis 4.4.1.8: Põhjalähdase hapnikusisalduse erinevus alternatiivi E1 korral.

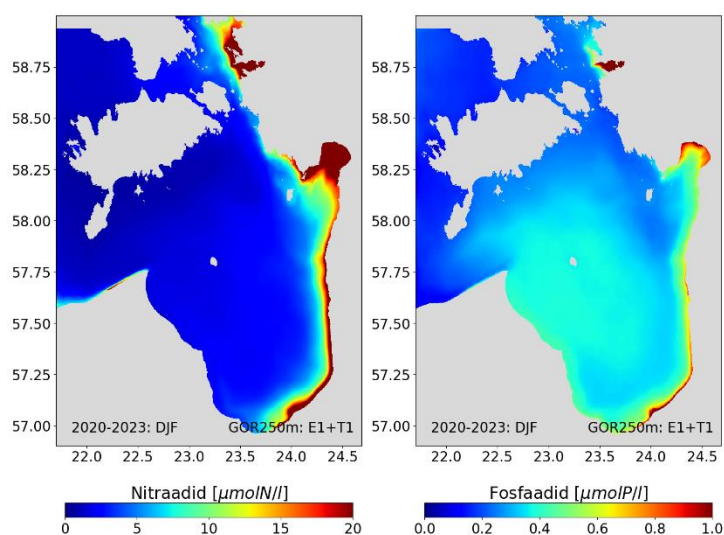
Keskmise põhjalähdase hapniku kontsentratsiooni ajalised muutused esialgse ala piirkonnas on toodud joonisel 4.4.1.9. 2020-2023 aegreast lähtub, et mõjul on arvestatav aastatevaheline muutlikkus. Negatiivne mõju esineb sesoonil kui hapnikupuudus on maksimaalne, st. suve lõpus, sügise algul. Simulatsiooni tulemused viitavad, et mõnevõrra võib sageda ka hüpoksia esinemine tuulepargi alal. Liivi lahes esineb sesoonne hüpoksia ka praegu, kuid seda on regulaarselt registreeritud pigem tuulepargi alaga võrreldes sügavamal merealal (Liblik et al., 2023; Stoicescu et al., 2022). Käesolevas töös tehtud mõõtmiste abil tuvastati suve lõpus, sügise algul hüpoksia esinemine ka tuulepargi alal.

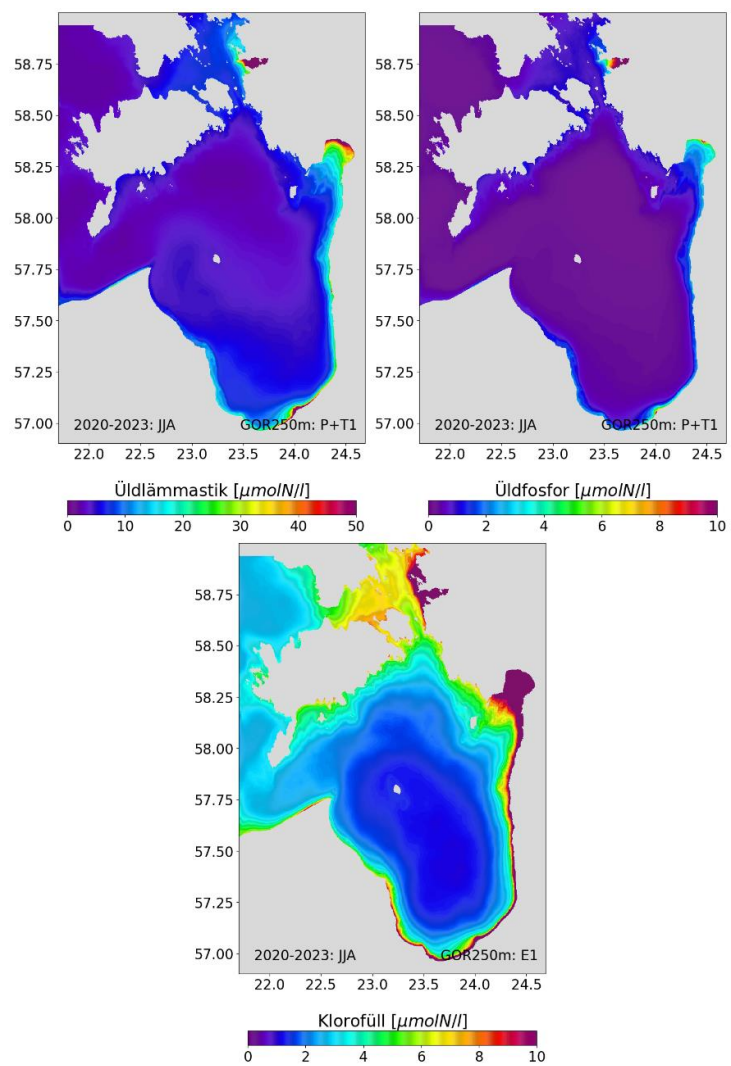


Joonis 4.4.1.9: Põhjalähdase hapniku sisalduse ajaline käik tuulepargi E1 piirkonnas (vasakul) koos sesoonse käiguga (paremal) alternatiivide A0 ja E1 korral.

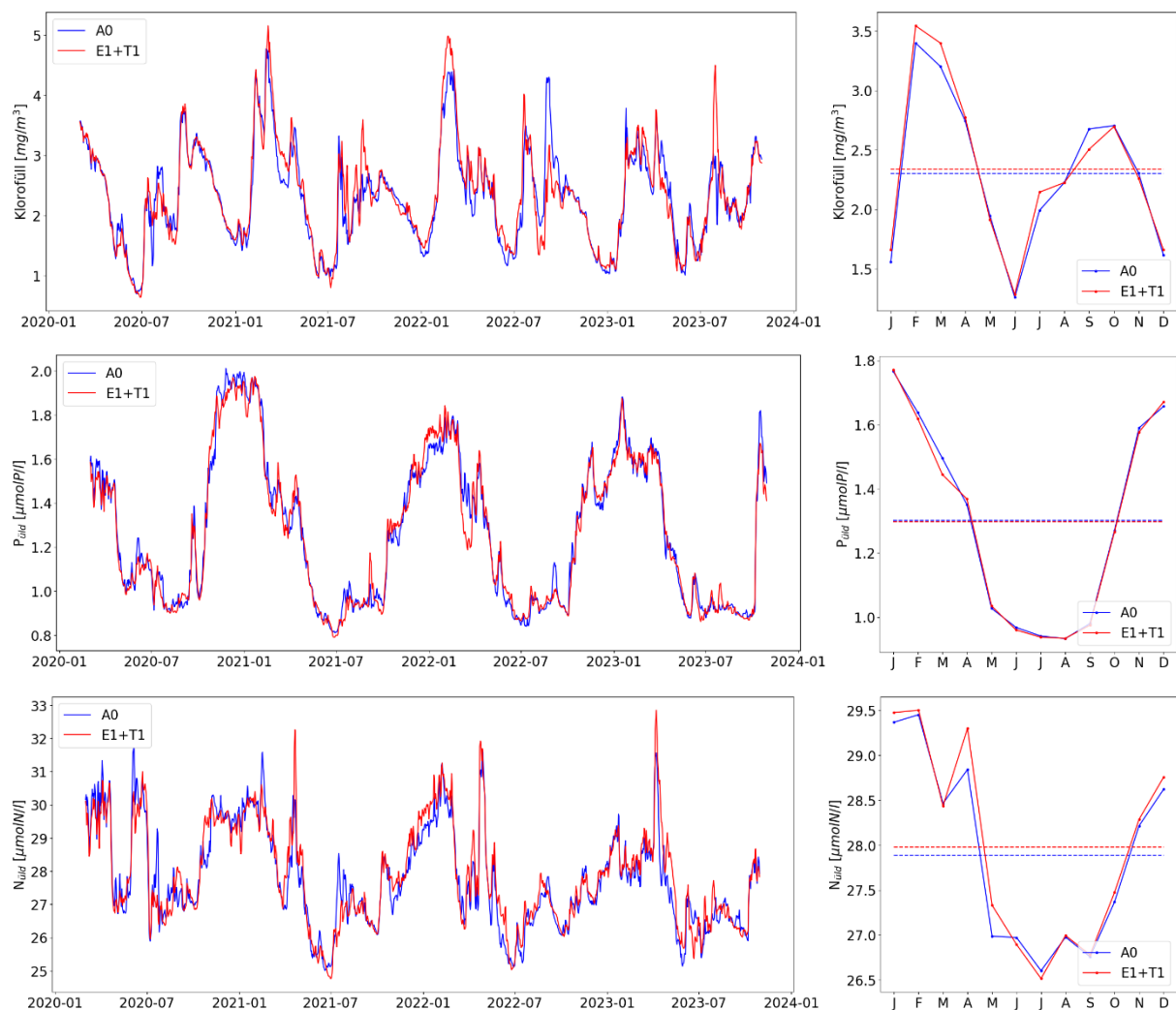
4.4.2. Esialgne ala ja täiendusala

Talviste toitainete ning suviste üldainete ja klorofüllü kontsentratsiooni ruumiline keskmine E1+T1 korral on toodud joonisel 4.4.2.1 ning üldainete ja klorofüllü kontsentratsioonide ajaline käik koos sesoonse käiguga on toodud joonisel 4.4.2.2. Bassinimastaapi jaotused on sarnased alternatiividega A0 ja E1, st. suurim mõju Liivi lahes tuleneb jõgede koormusest. Fosfaatide puhul mängib rolli ka settest veesambasse eralduv voog. Lokaalsed muutused klorofüllü ja üldainete sisaldused on sarnased E1 rakendumisele. E1+T1 leiavad samas suurusjärgus muutused aset suuremal alal.



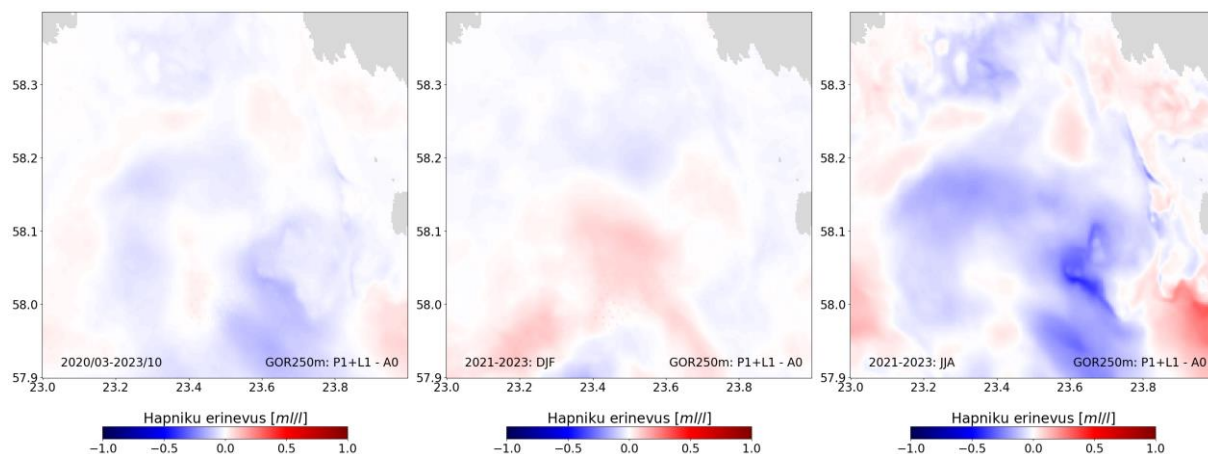


Joonis 4.4.2.1: Talviste toitainete ning suvise üldainete ja klorofüllü keskmine jaotus alternatiivi E1+T1 korral.

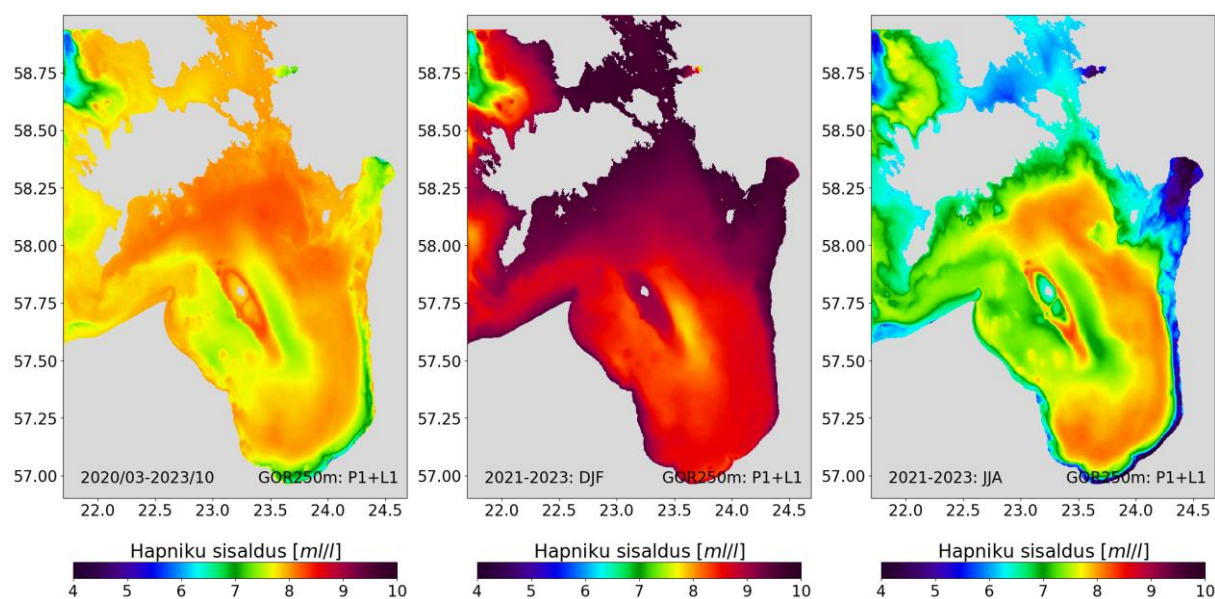


Joonis 4.4.2.2: Tuulepargi piirkonnas E1+T1 klorofüll, üldlämmastiku ning üldfosfori ajaline käik ülemises 10 m veekihis, perioodil 2020-2023 alternatiivide A0 ja E1+T1 korral koos sama perioodi sesoonse käiguga (parempoolsed paneelid).

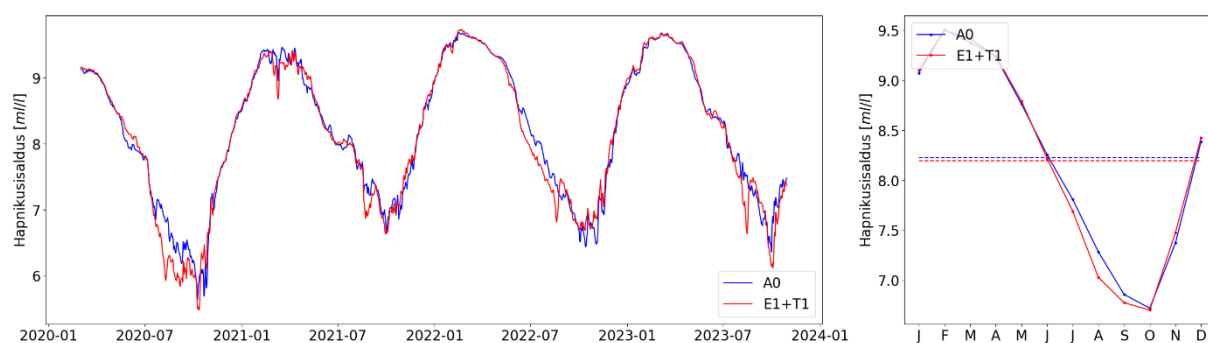
Põhjalähedase hapniku keskmised jaotused ja aegread E1+T1 korral on toodud joonistel 4.4.2.3-4.4.2.5. Muutused on samuti sarnased E1 alternatiivile, kuid need leiavad aset suuremal alal.



Joonis 4.4.2.4: Põhjalähedase hapnikusisalduse erinevus alternatiivi P1+L1 korral.



Joonis 4.4.2.4: Keskmise põhjalähedane hapnikusisaldus kogu perioodi (vasakul) ning talvisel ja suvisel perioodil alternatiivis E1+T1 (esialgse ala ja täiendusala korral).



Joonis 4.4.2.5: Põhjalähedase hapniku sisalduse ajaline käik tuulepargi E1+T1 piirkonnas (vasakul) koos sesoonse käiguga (paremal) alternatiivide A0 ja E1+T1 korral.

4.5. Heljumi levik

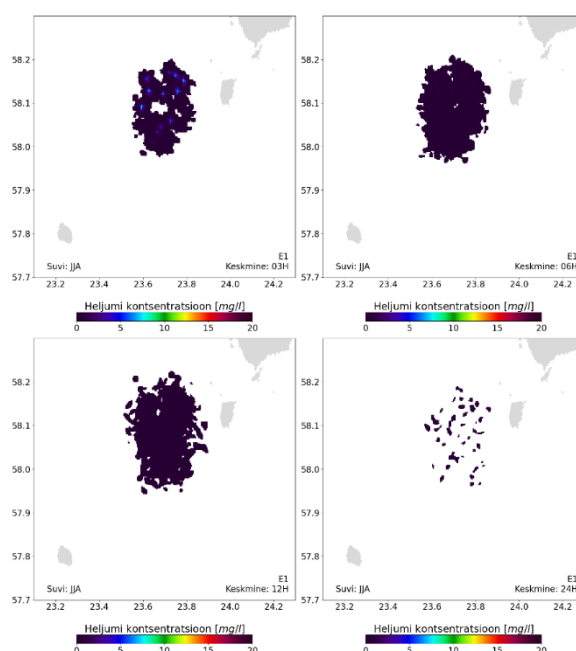
4.5.1. Esialgne ala

Joonistel 4.5.1.1 ja 4.5.1.2 on toodud simuleeritud heljumi keskmised kontsentratsioonid mõningate tuulikute vundamentide (vt. joonis 2.3.4) rajamisel tuulepargi esialgse ala piirkonnas suvistes ja talvistes oludes. Joonistel 4.5.1.3 ja 4.5.1.4 on toodud maksimaalsed kontsentratsioonid. Joonistel on toodud üksnes ehitustegevusest tekkiva heljumi kontsentratsioonid. Heljumit leidub vees ka looduslikult, kuid simulatsioonidesse seda ei ole lisatud. Seega näitavad joonised ehitustöödega looduslikule foonile lisanduvat heljumi kontsentratsiooni. Reaalsed ehitustööd võtavad aega kuid ning heljumi tegelik levik sõltub töödeajast hüdrodünaamilistest tingimustest, mis omakorda sõltuvad paljuski meteoroloogilistest tingimustest. Et võimalikku mõjuala ulatust näidata, arvutati heljumi levikut valitud tuulikute juurest paljude realisatsioonide korral ning igas võrgupunktis esitati maksimaalne ja keskmine sisaldus. Maksimaalsete sisalduste kaardid näitavad iga võrgupunkti jaoks pessimistlikumat stsenaariumi, kuid silmas tuleb pidada, et ebasoodsate olude korral võib selline stsenaarium realiseeruda ainult mõnes võrgupunktis, mitte kõigis korraga. Suvise perioodina kasutati arvutustes juuni-august 2019 ning talvisena detsember 2018 kuni veebruar 2019 andmeid. Kasutatud perioodide tuuletingimused olid lähedased nende sesoonide pikaajalistele tuuletingimustele.

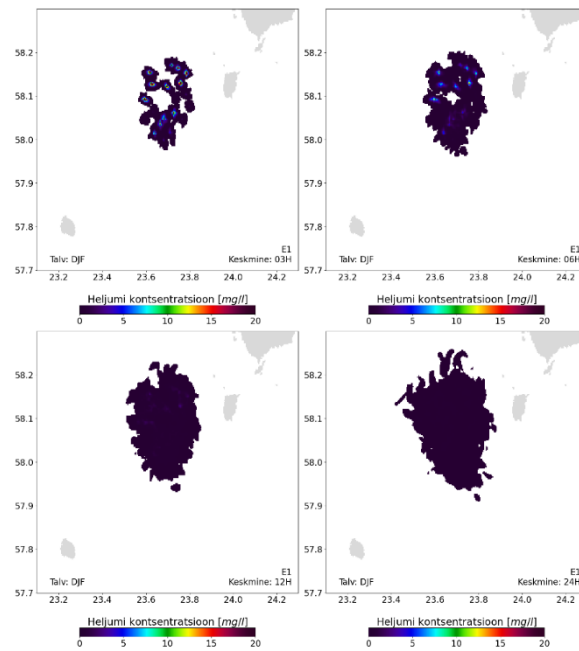
Tulemused näitavad, et kõrged heljumi kontsentratsioonid esinevad vahetult pärast heljumi veesambasse paiskumist, misjärel toimub suhteliselt kiire settimine. Suvel on settimine kiirem – sisaldused üle loodusliku fooni esinevad 24 tundi peale heljumi veesambasse sattumist ainult üksikutes võrgupunktides. Talvistes tingimustes on hoovused tugevamad ning seetõttu ka hajumine suurem ja settimine aeglasem ning heljum püsib veesambas pikemat aega. Vundamentide rajamisel esialgsel alal püsib heljumi kontsentratsioon üle 5 mg/l üle 24 h vaid talvistes tingimustes, maksimaalselt 4,5 km kaugusele vundamendi algasukohast (pessimistlikum leviku hinnang). Kontsentratsiooni üle 5 mg/l maksimaalne kaugus algasukohast 12 h jooksul peale veesambasse pääsemist on 9,7 km ning 6 h jooksul 6,5 km. Esimese 3 h jooksul levib kontsentratsioon üle 5 mg/l kuni 5,6 km. Need on simulatsiooni järgi kõige ulatuslikumad levikukaugused mainitud aegade jooksul, mis kirjeldavad ekstreemsemaid levikustsenaariume.

Oluline on märkida, et talvised olud on tormisemad ja kõrgete lainete sündmused on sagedasemad, mistõttu heljumi kõrgemad kontsentratsioonid on sel aastaajal ka looduslikult sagedasemad. Põhjalähedases kihis tehtud mõõtmiste käigus registreeriti korduvalt juhtumeid, kui heljumi sisaldus tõusis üle 20 mg/l. Kõigi sündmuste puhul ei pruukinud heljum jõuda ülemisse kihti, kuid silmas tuleb pidada, et ka looduslikult esinevad piirkonnas arvestatavad heljumi kontsentratsiooni tõusu juhtumeid.

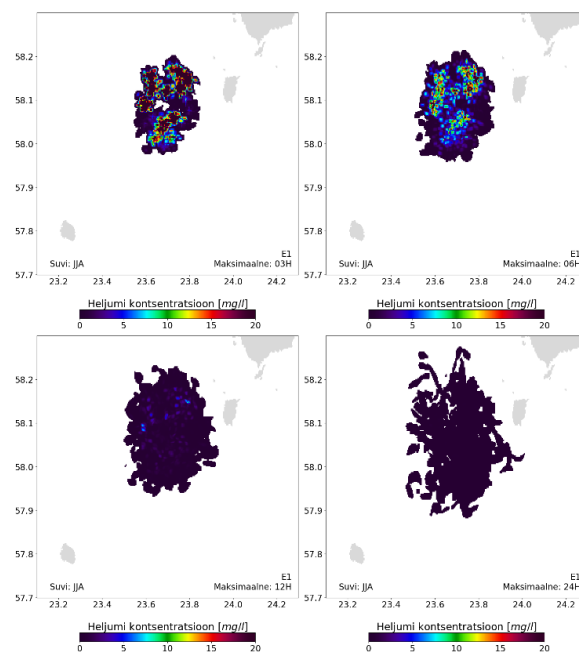
Algasukohast kaugemale levivad peened setted. Joonistel 4.5.5-4.5.8 on näidatud aleuriidi settimise jaotused. Jämedateralisema sette puhul võib eeldada, et see settib algasukohtade vahetus läheduses. Arvutused näitavad, et ka peenema sette (aleuriidi) puhul ei ole levik eriti ulatuslik (joonised 4.5.5-4.5.8). Ei ole alust arvata, et tuulikute paigaldusest tekkiv heljum jõuaks arvestaval määral rannikule.



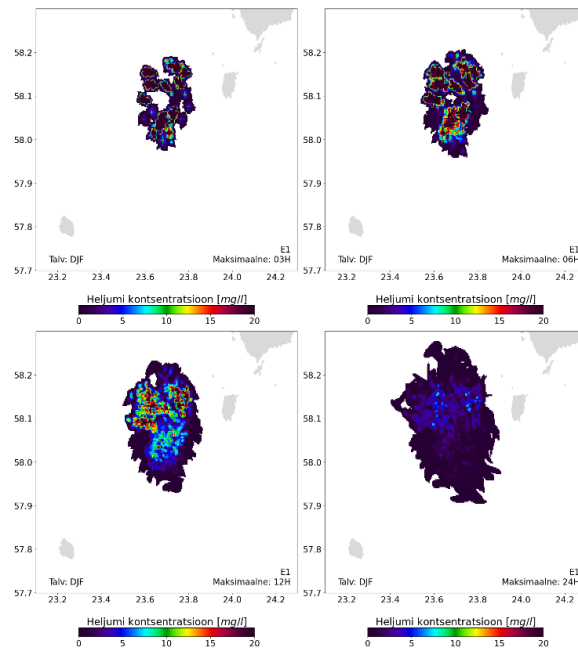
Joonis 4.5.1.1: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



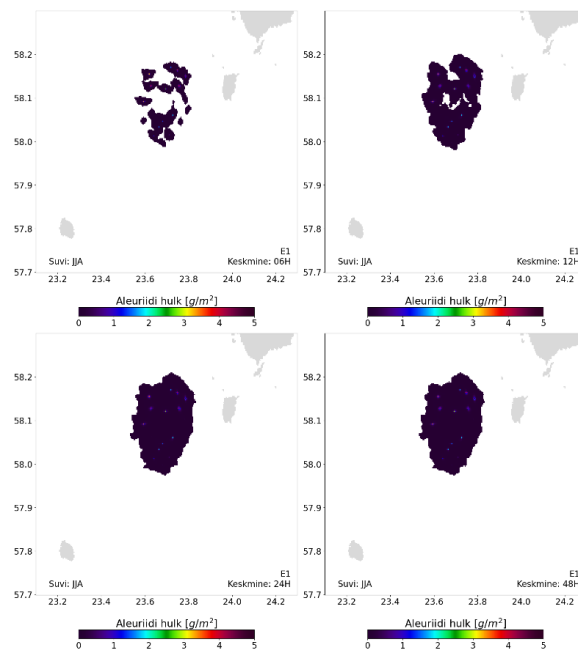
Joonis 4.5.1.2: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



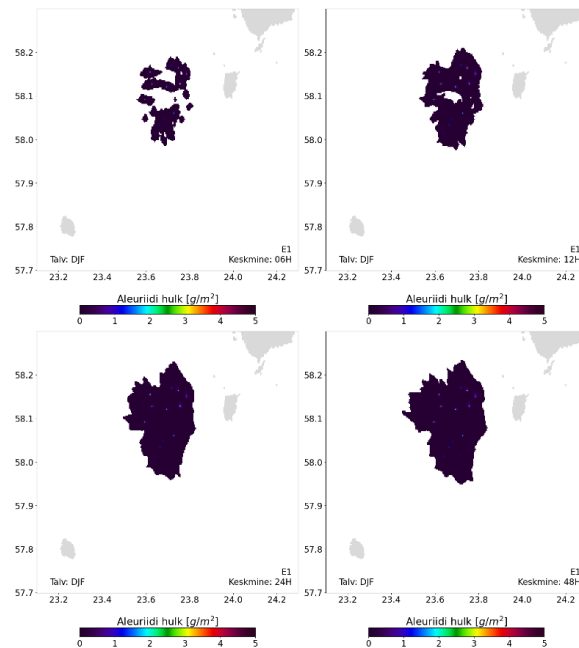
Joonis 4.5.1.3: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



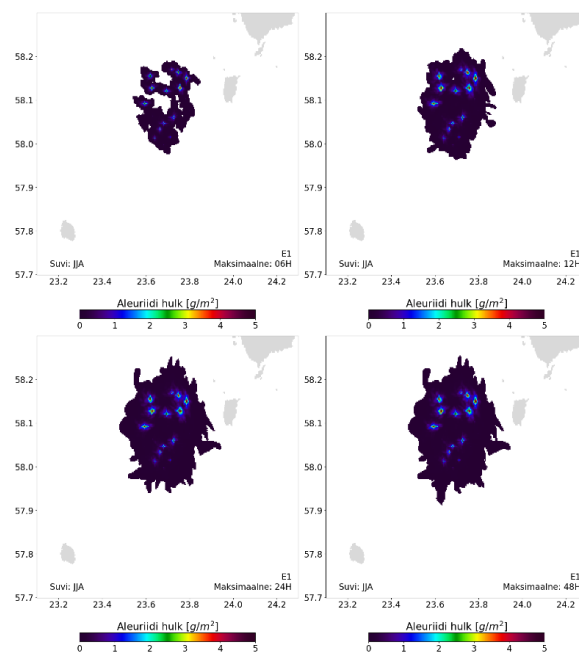
Joonis 4.5.1.4: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



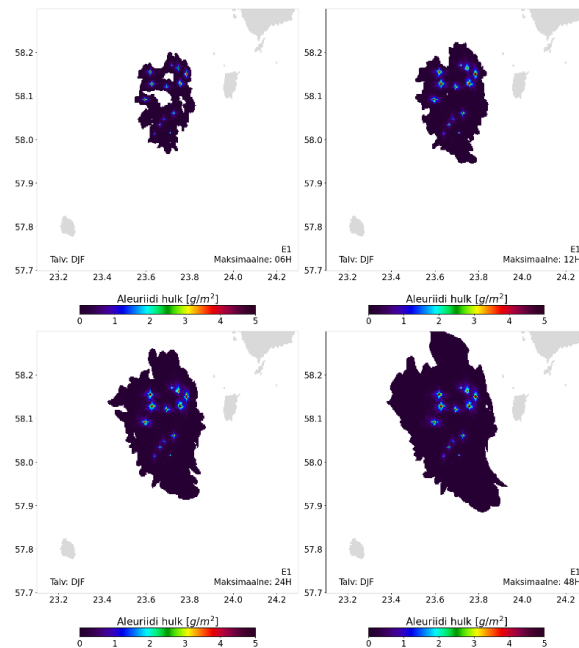
Joonis 4.5.1.5 Keskmine settinud aleuriidi hulk suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



Joonis 4.5.1.6 Keskmine settinud aleuriidi hulk talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.

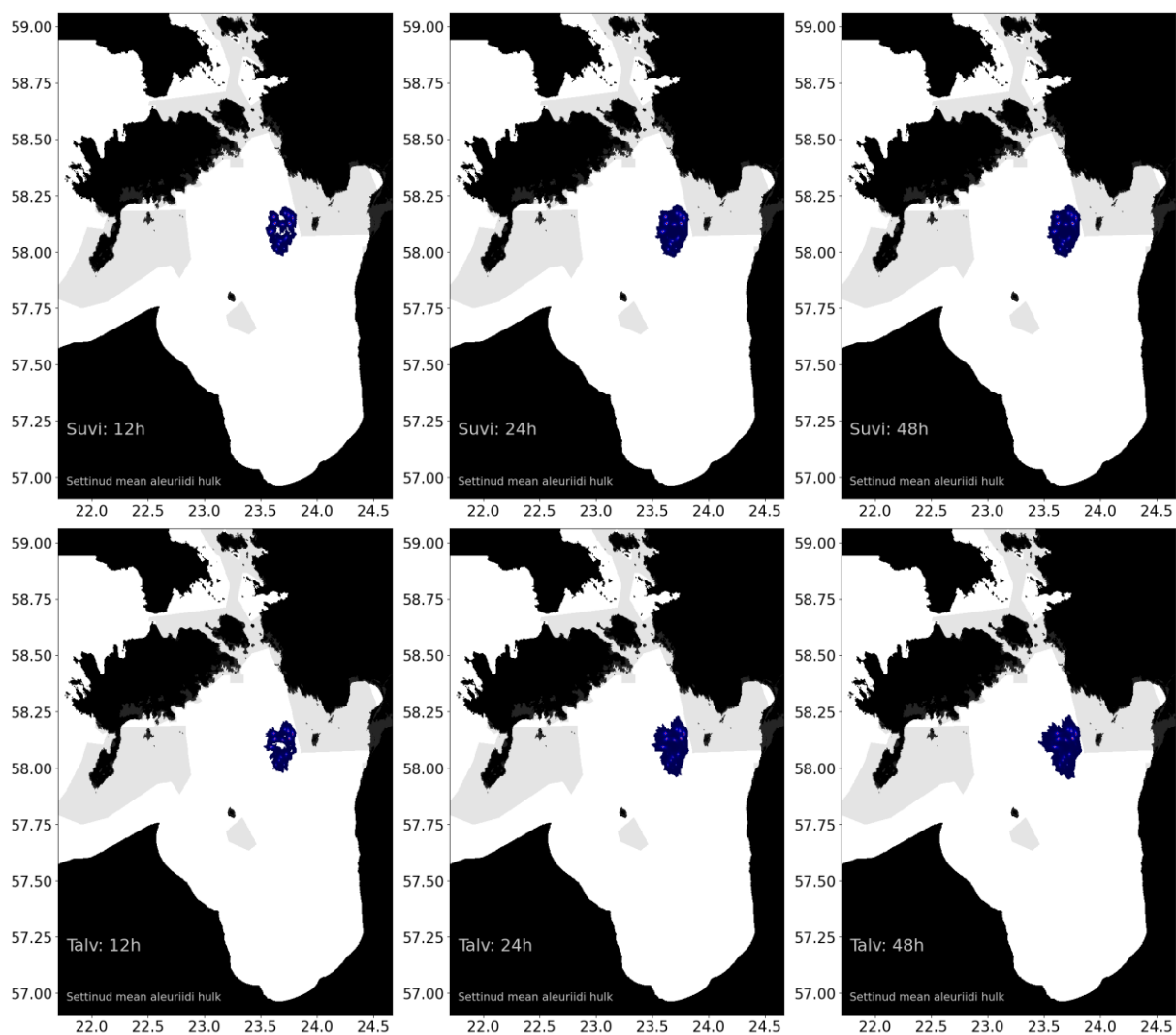


Joonis 4.5.1.7 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk igas võrgupesas suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.

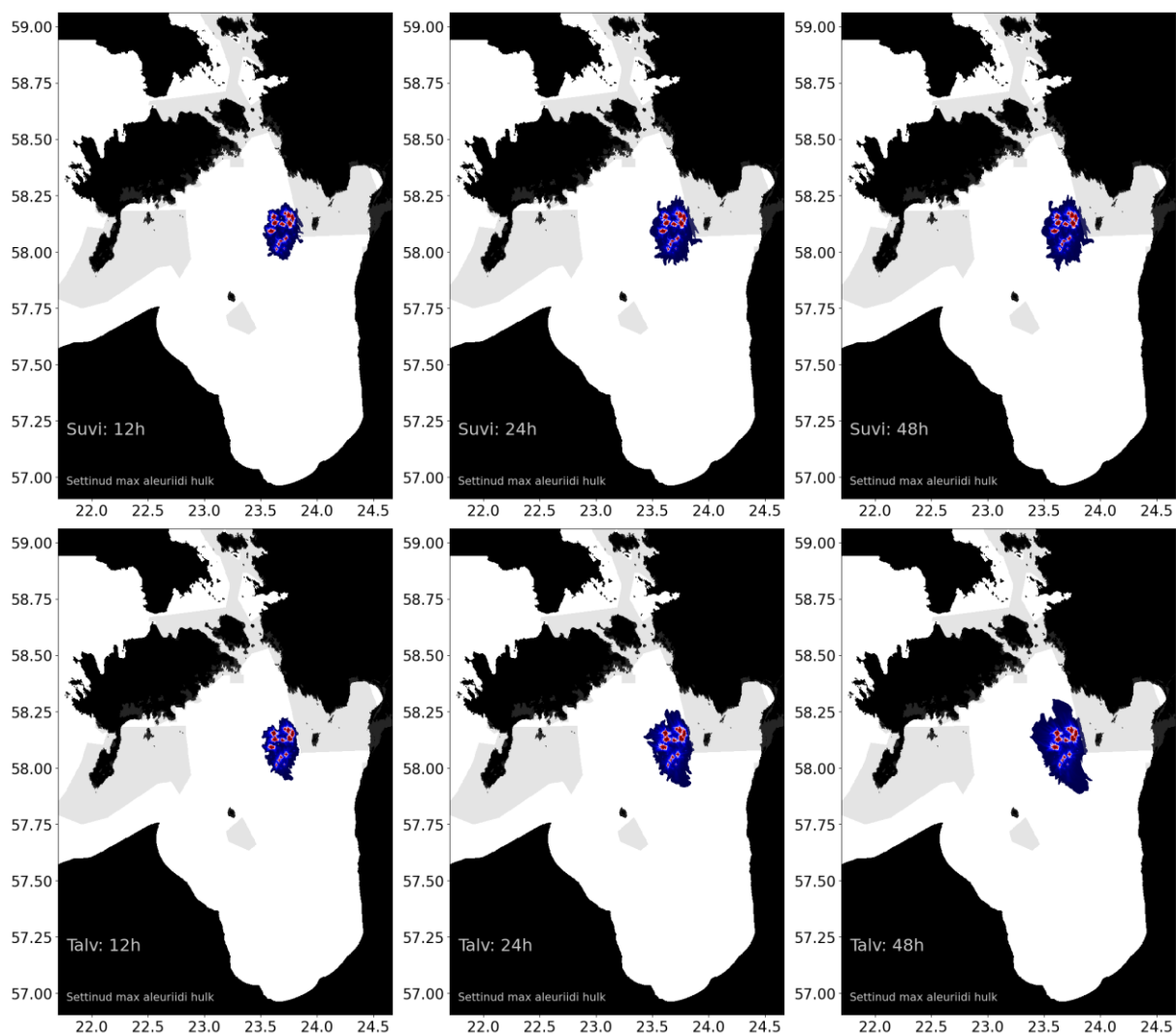


Joonis 4.5.1.8 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk igas võrgupesas talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.

Joonistel 4.5.1.9 ja 4.5.1.10 on toodud keskmised ja maksimaalsed settinud hulgad vundamentide rajamisel koos Liivi lahe hoiualadega. Üldiselt keskmised hulgad hoiualadele settimist ei näita. Maksimaalse settimise jaotused viitavad, et soodsatel tingimustel võib Kihnu hoiualale settimine aset leida, kuid selle maht on väike. Seega, võib öelda, et esialgsel alal vundamentide rajamisest tekkiva heljumi settimine mõjutab hoiualasid vaid väga vähesel määral.



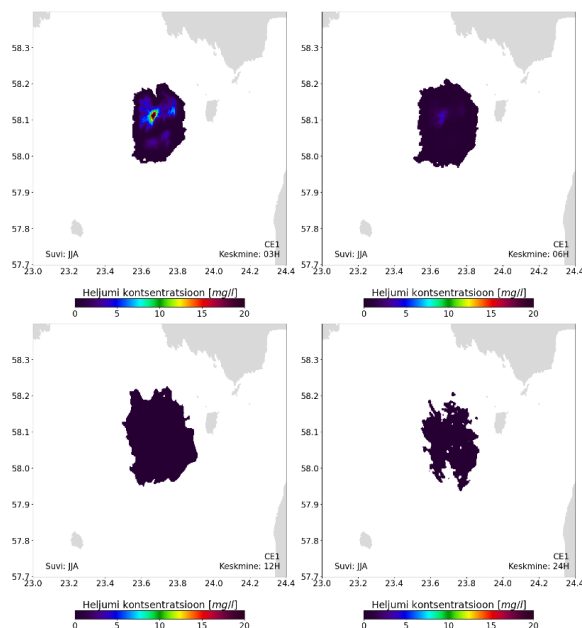
Joonis 4.5.1.9: Keskmine settinud aleuriidi hulk (väärtus üle 1g/m^2) ruumiline jaotus vundamentide rajamisel esialgsesse piirkonda pärast 12, 24 ja 48h levikut suvistes ja talvistes tingimustes. Halliga on näidatud hoiu- ja kaitsealad Liivi lahes. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019 ning detsember-veebruar 2018/2019.



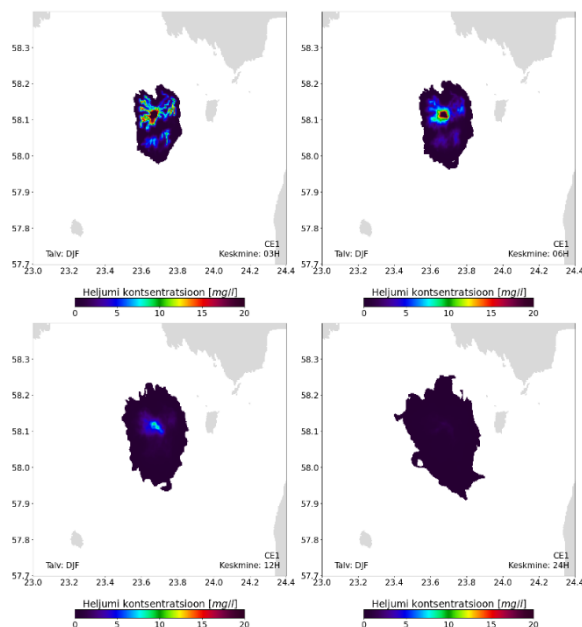
Joonis 4.5.1.10: Maksimaalne settinud aleuriidi hulga (väärtus üle 1g/m^2) ruumiline jaotus vundamentide rajamisel esialgse ala piirkonda pärast 12, 24 ja 48h levikut suvistes ja talvistes tingimustes. Halliga on näidatud hoiu- ja kaitsealad Liivi lahes. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019 ning detsember-veebruar 2018/2019.

Aleuriidi keskmine levik ja settimine esialgse ala ühenduskaablite paigaldamisel on toodud joonistel 4.5.1.11 ja 4.5.1.12 ning 4.5.1.15 ja 4.5.1.16. Maksimaalsed kontsentratsioonid ning settinud kontsentratsioonid igas võrgupesas joonistel 4.5.1.13-4.5.1.14 ja 4.5.1.17-4.5.1.18. Tendentsid on osaliselt samad, mis vundamentide paigaldamise puhul. Üldiselt kestab heljumi settimine mõnevõrra pikemalt talvistes oludes, kuid settimisala ulatuses suuri erinevusi suvise ja talvise perioodi vahel ei esine. Heljumi kontsentratsioonid püsivad kõrged lokaalselt tööde vahetus teostamise alas, kaablite asukohtadest kaugemal vähenevad suhteliselt kiiresti. Heljumi levik kaablite rajamisel esialgsele alale on mõnevõrra ulatuslikum võrreldes vundamentide rajamisega. Kontsentratsiooni üle 5 mg/l leidub 3, 6, 12 ja 24 h pärast heljumi veesambasse

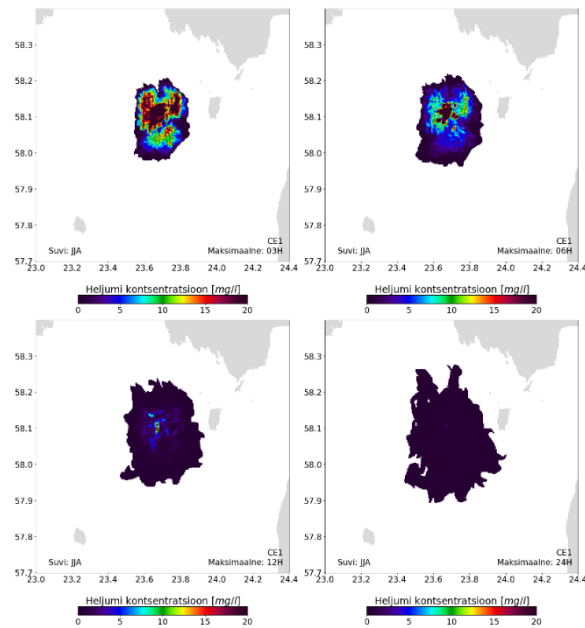
pääsemist maksimaalselt 5,1; 5,5; 8,7 ja 6,0 km kaugusel algallikast. Sarnaselt vundamentide rajamisega, mõju hoiualadele on tagasihoidlik.



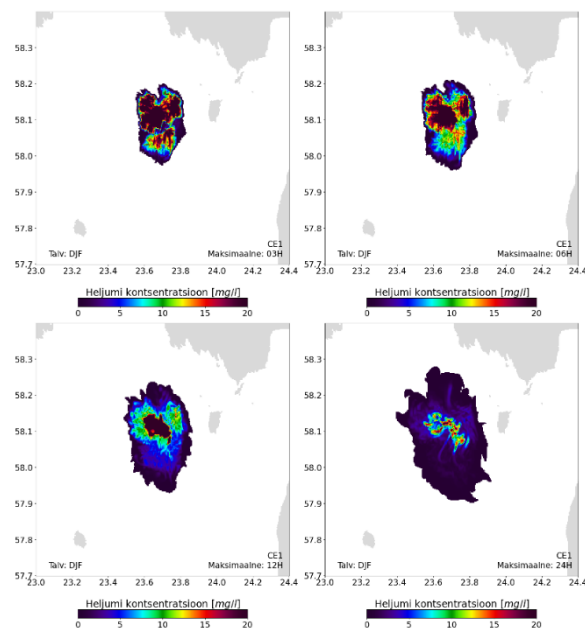
Joonis 4.5.1.11: Keskmine heljumi kontsentratsioon omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas 1 m sügavusel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



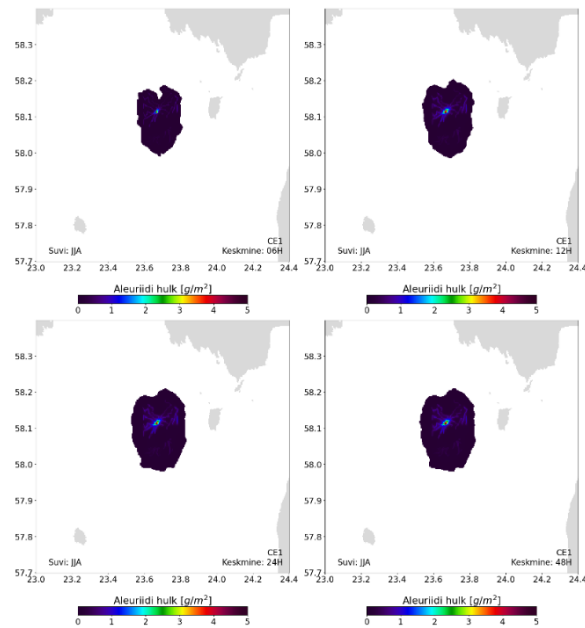
Joonis 4.5.1.12: Keskmine heljumi kontsentratsioon omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas 1 m sügavusel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



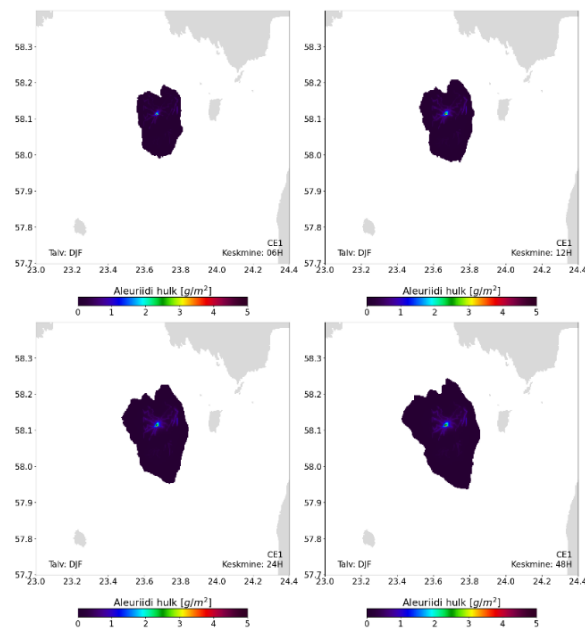
Joonis 4.5.1.13: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas igas võrgupesas 1 m sügavusel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



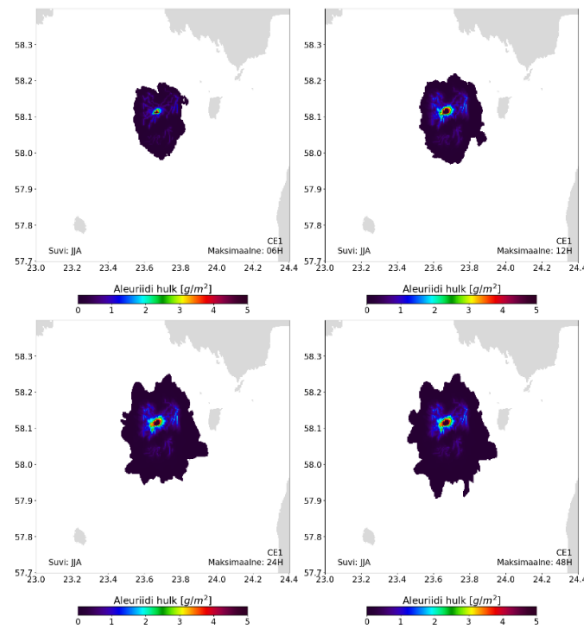
Joonis 4.5.1.14: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas igas võrgupesas 1 m sügavusel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



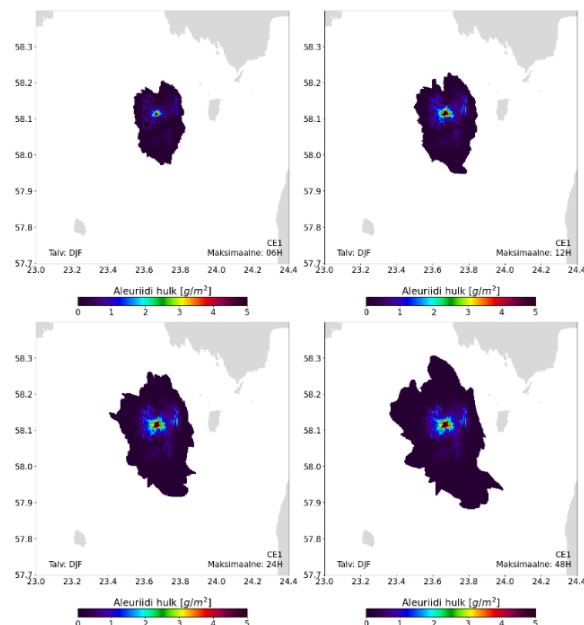
Joonis 4.5.1.15 Keskmise settinud aleuriidi hulk omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



Joonis 4.5.1.16 Keskmise settinud aleuriidi hulk omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



Joonis 4.5.1.17 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas igas võrgupesas suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



Joonis 4.5.1.18 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk omavaheliste ühenduskaablite rajamisel E1 piirkonnas igas võrgupesas talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.

Kokkuvõtteks võib öelda, et ehitusaegne lokaalne ja ajutine heljumi sisalduse tõus ja vee läbipaistvuse vähenemine tuulepargi esialgsel alal ja selle lähipiirkonnas kindlasti aset leiab, kuid võttes arvesse piirkonna avatust ja heljumi sisalduse looduslikku varieeruvust ei ole alust

arvata, et tegemist on olulise pikaaegse negatiivse mõjuga. Heljumi leviku ja seadmise võimaliku mõju kohta peaks andma sisendit ka põhjadelustiku ja kalastiku eksperthinnangud. Vajadusel võib rakendada leevendavaid meetmeid heljumi tekitatavatele töödele.

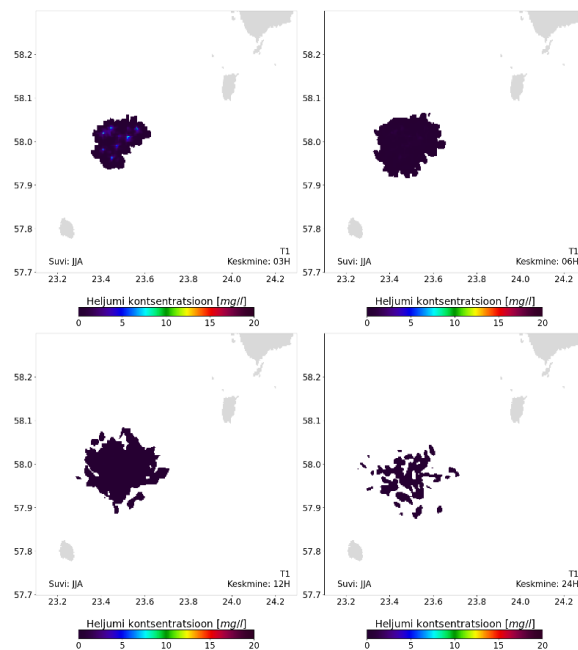
4.5.2. Täiendusala

Joonistel 4.5.2.1 kuni 4.5.2.17 on toodud aleuriidi keskmised ja maksimaalsed heljumi kontsentratsioonid ning seadnud hulkadena nii täiendusala vundamentide rajamisel kui ka ühenduskaablite matmisel. Põhijäreldused on samad, st. ehitusaegne lokaalne ja ajutine heljumi sisalduse tõus ja vee läbipaistvuse vähenemine tuulepargi täiendaval alal ja selle lähipiirkonnas kindlasti aset leiab, kuid võttes arvesse piirkonna avatust ja heljumi sisalduse looduslikku varieeruvust ei ole alust arvata, et tegemist on olulise pikaaegse negatiivse mõjuga.

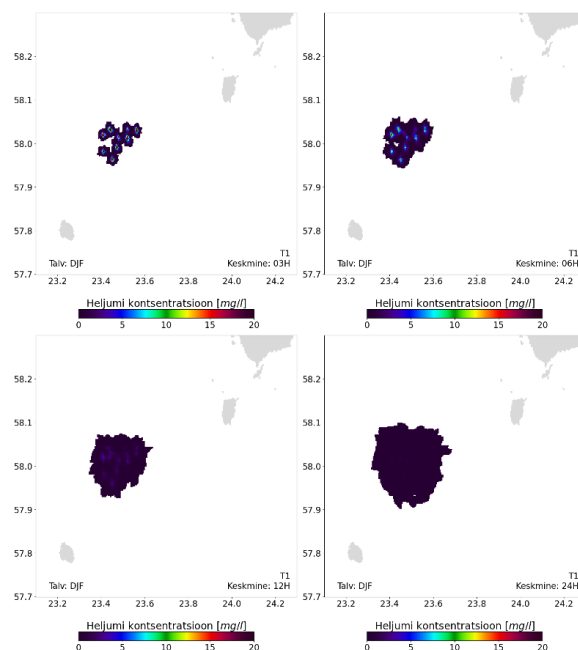
Vundamentide rajamisel täiendalale ulatuvad heljumi kontsentratsioonid üle 5 mg/l maksimaalselt kuni 10,2 km kaugusel 6 h peale levikut ning kuni 4,8 km kaugusel algallikast peale 24 h levikut.

Kaablite rajamisel täiendalale on levik mõnevõrra tagasihoidlikum. Suvistes tingimustes on seadmine kiire. 6 h peale heljumi veesambasse pääsemist on kontsentratsiooni 5 mg/l maksimaalne levik 4,6 km algallikast; 12 h jooksul leidub nii kõrget kontsentratsiooni vaid 700 m kaugusel ning 24 h on kontsentratsioon alla 5 mg/l. Talvistes tingimustes on kaablite rajamisel 5 mg/l leviku maksimaalne ulatus vastavalt 3,3, 5,5, 5,7 km 3h, 6h ja 12 h peale osakeste veesambaase pääsemist.

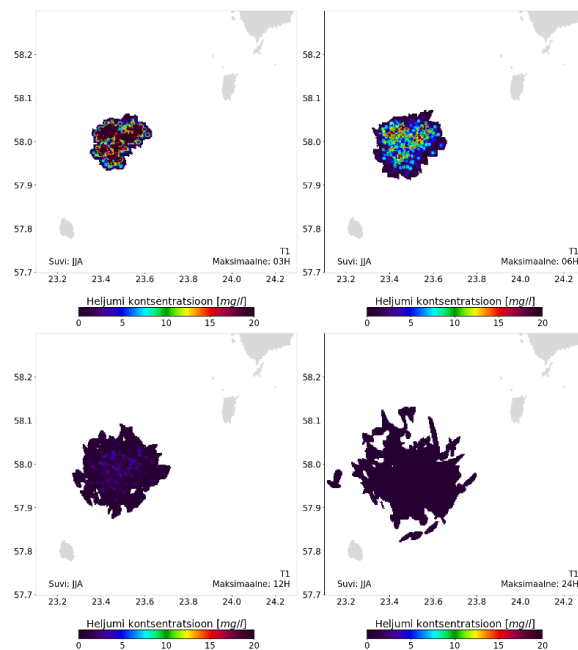
Levik hoiualadele on ebatõenäoline, sest täiendav ala asub neist piisavalt kaugel.



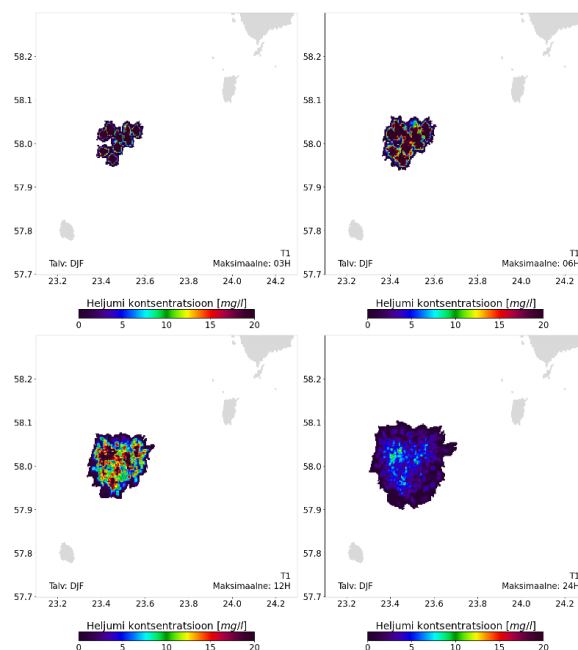
Joonis 4.5.2.1: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



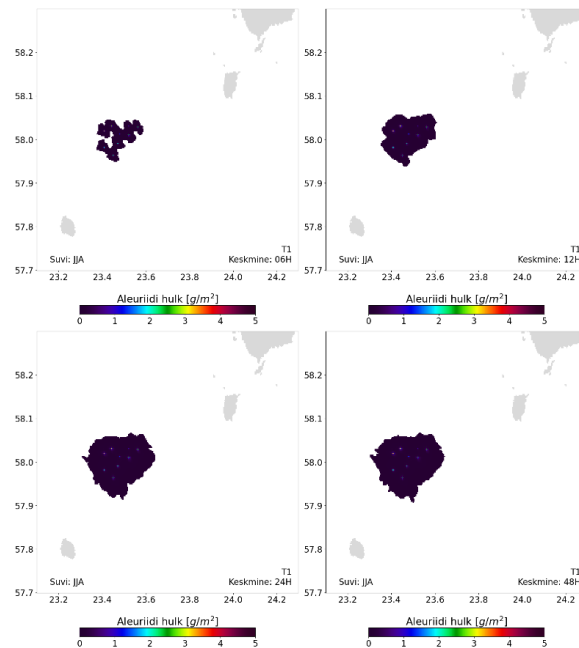
Joonis 4.5.2.2: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



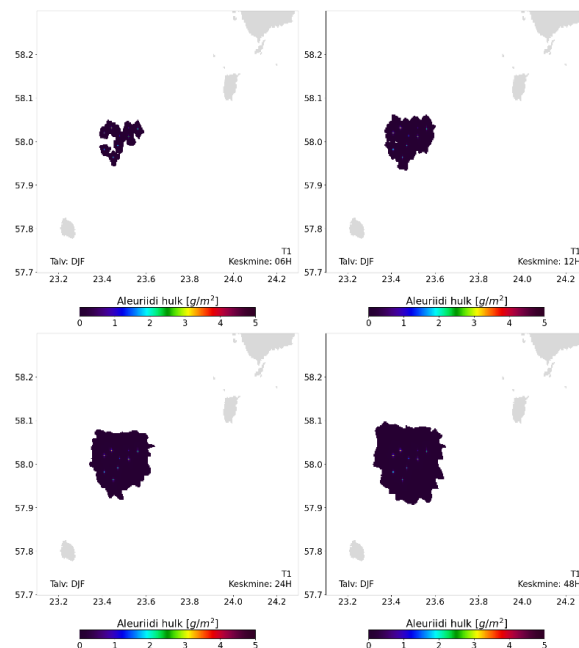
Joonis 4.5.2.3: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



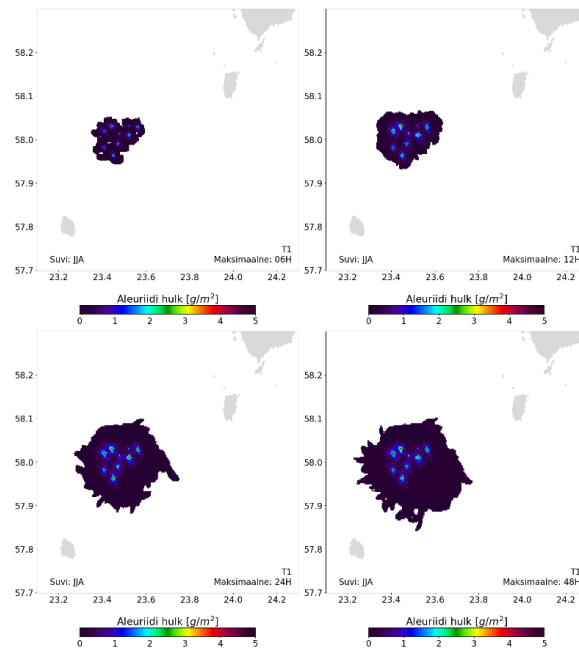
Joonis 4.5.2.4: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



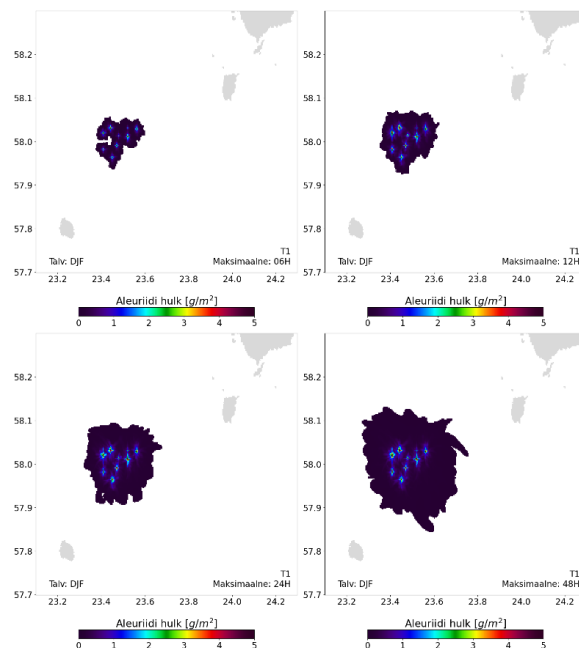
Joonis 4.5.2.5 Keskmise settinud aleuriidi hulk suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



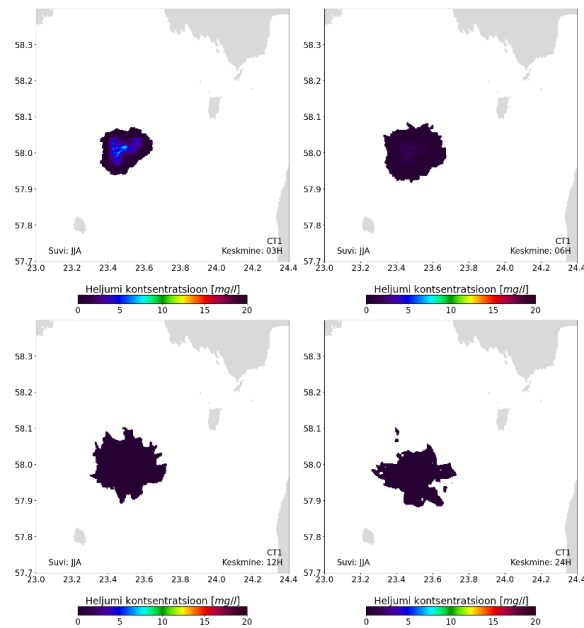
Joonis 4.5.2.6 Keskmise settinud aleuriidi hulk talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



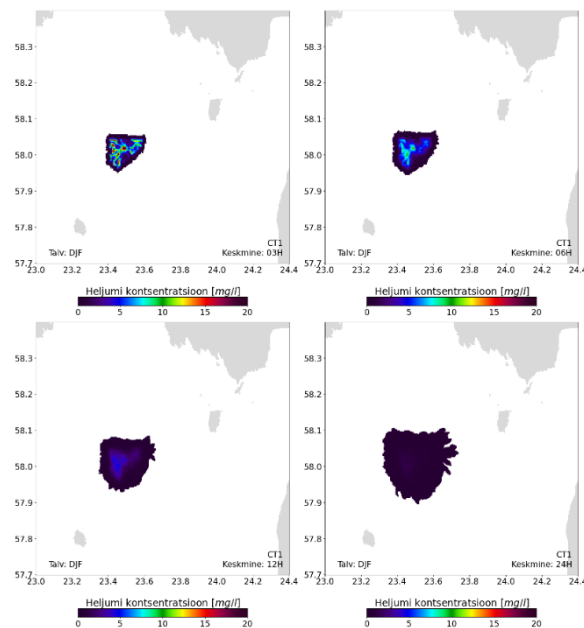
Joonis 4.5.2.7 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk igas võrgupesas suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



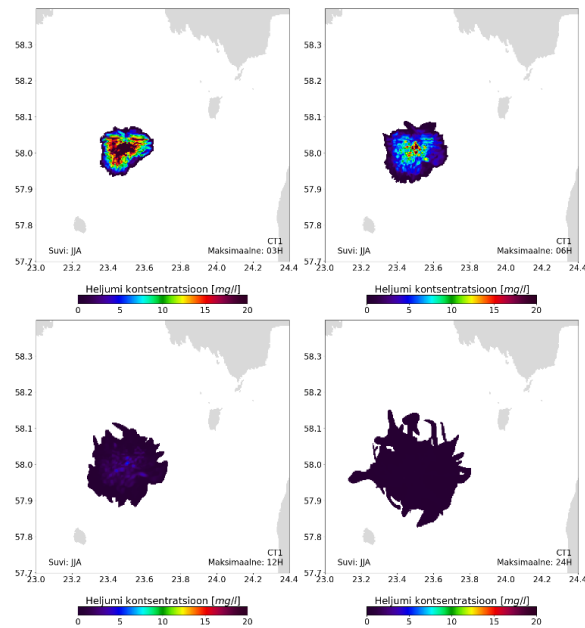
Joonis 4.5.2.8 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut täiendusala tuulikuvundamentide rajamisel. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



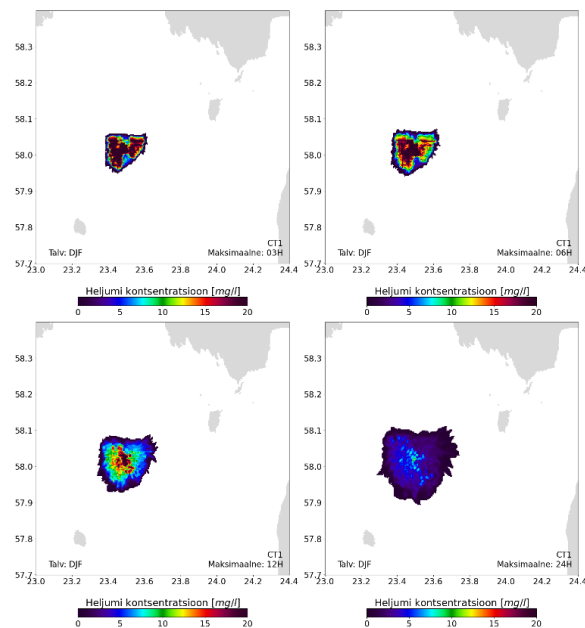
Joonis 4.5.2.9: Keskmise heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



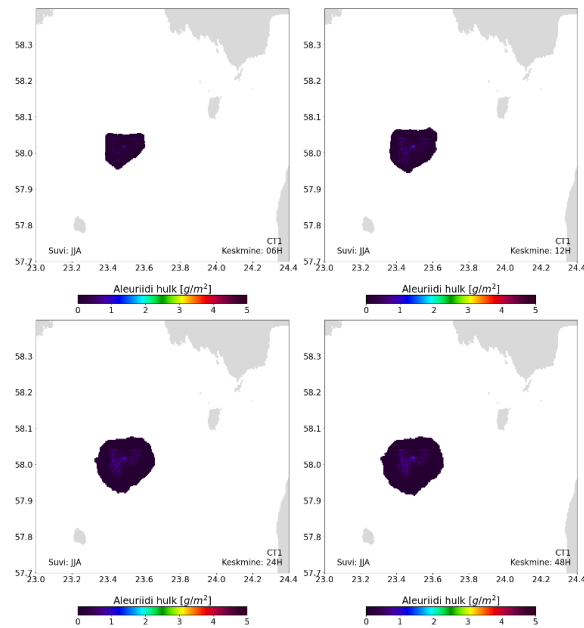
Joonis 4.5.2.10: Keskmise heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



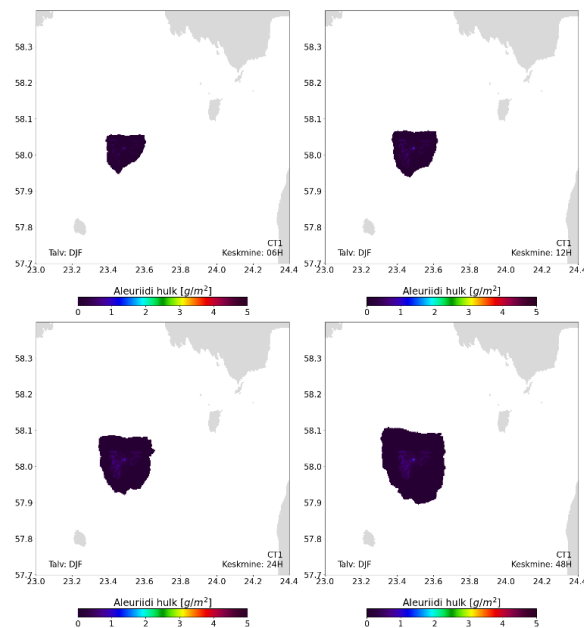
Joonis 4.5.2.10: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



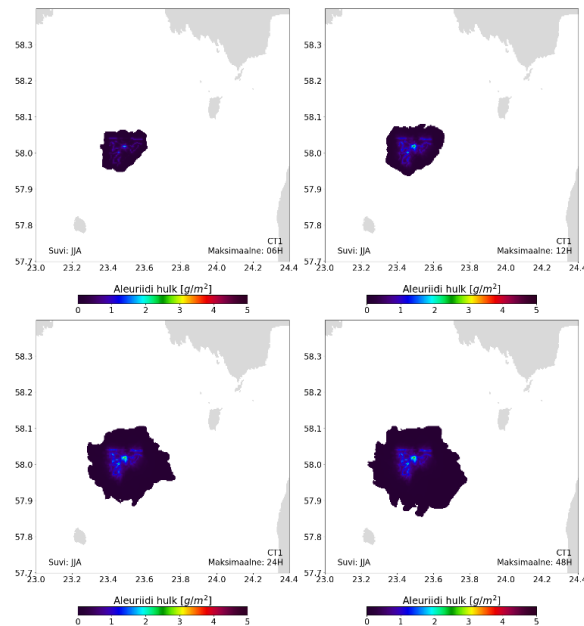
Joonis 4.5.2.11: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



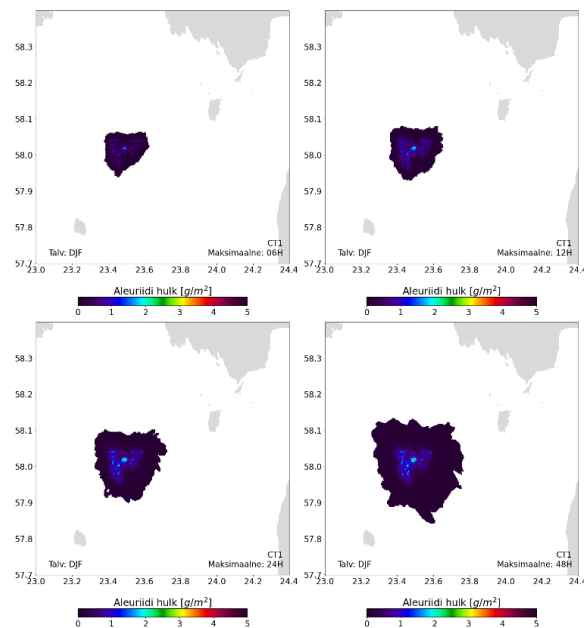
Joonis 4.5.2.12 Keskmise settinud aleuriidi hulk sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



Joonis 4.5.2.13 Keskmise settinud aleuriidi hulk omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



Joonis 4.5.2.14 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas igas võrgupesas suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



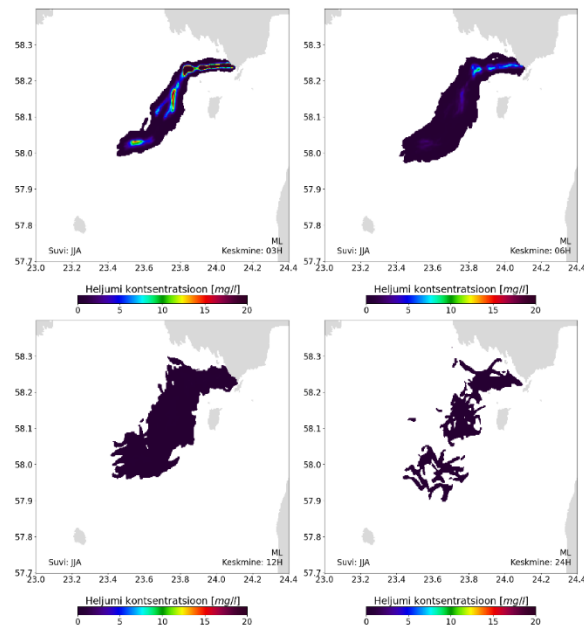
Joonis 4.5.2.15: Maksimaalne settinud aleuriidi hulk sügavusel omavaheliste ühenduskaablite rajamisel T1 piirkonnas talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.

4.5.3. Eksportkaablid

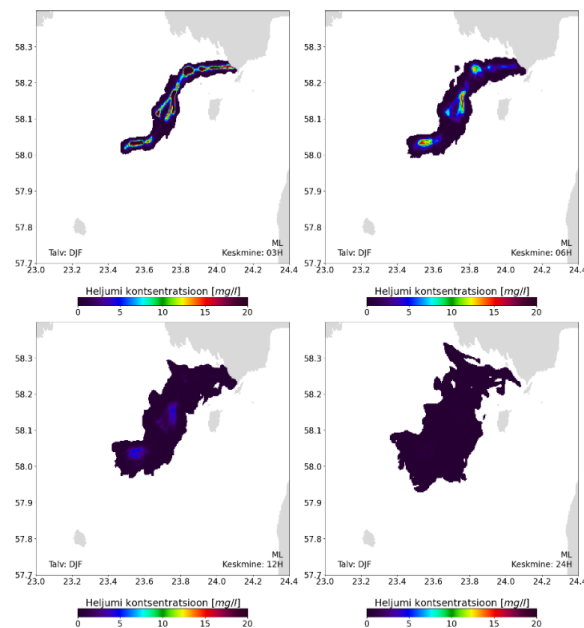
Peakaablite rajamisega tekkiva heljumi modelleeritud jaotused on toodud joonistel 4.5.3.1 kuni 4.5.3.8. Suurimad keskmised ja maksimaalsed heljumi kontsentratsioonid 1 m sügavusel veepinnast püsivad ainult lühiajaliselt. Teatud aja (ca pool ööpäeva) jooksul küll ala suureneb, kuid kontsentratsioonid vähenevad ning 24 h pärast on heljumiga kaetud ala oluliselt väiksem. Kontsentratsioonid ja levik on suuremad talvistes oludes. Suvistes tingimustes on levik väiksem ja settimine kiirem. Suvistes tingimustes levib kontsentratsioon üle 5 mg/l maksimaalselt 6,0 km; 7,8 km ja 4,8 km kaugusele vastavalt kas 3, 6 või 12 h jooksul. Kontsentratsioon langeb suvistes oludes alla 5 mg/l 24 h jooksul.

Talvistes oludes on vähemalt 5 mg/l sisaldusega vee levik 3, 6, 12 ja 24 h jooksul vastavalt 4,7; 5,0; 10,7 ja 12,7 km ning kontsentratsioon langeb alla 5 mg/l 48 h jooksul. Seega, talvistes oludes on heljumi levik eksportkaablite rajamisel pikemaajalisem ja ulatuslikum võrreldes teiste töödega. 17.05.2024-26.08.2024 mõõdetud keskmine heljumi sisaldus oli 3,8 mg/l. Seega võib soodsatel tingimustel töödega tekitatud heljumi sisaldus ületada loodusliku sisalduse keskmise võrdlemisi kaugel algallikast. Tõenäoliselt on need suhteliselt kaugemale levikud seotud piki rannikut esinevate hoovustega, mis on tugevamad kui avamerel tuulepargi piirkonnas.

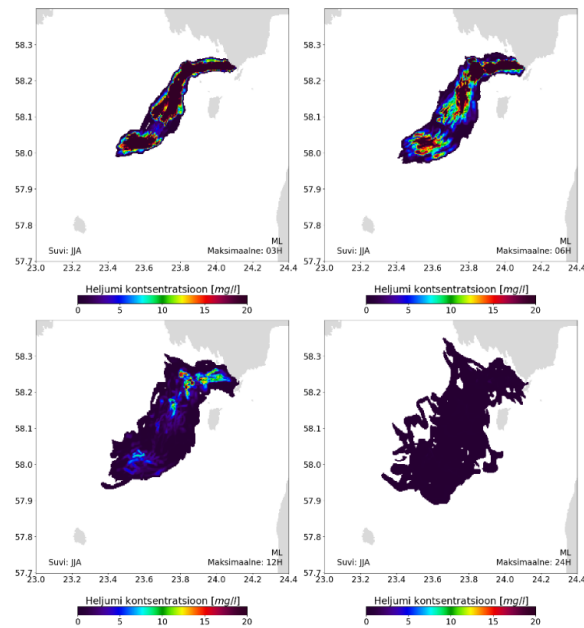
Kuna tegevus ise toimub hoiualal, siis on hoiuala ka tegevusest mõjutatud. Heljumi mõju on ulatuslikum tugevate hoovuste tingimustes, mis omakorda on indutseeritud tugevamate tuulesündmustega. Mõjuala vähendamisenä saab kaaluda töödele piirangu seadmist teatud tuule tugevusest alates. Kui piirkonnas esineb väärtuslike koelmualasid või põhjaelustiku tüüpi, millele heljumi levimist ja settimist on vajalik vältida, siis tuleks kaaluda operatiivse seire teostamist. Kuna heljumil sisaldusel on ka arvestatav looduslik varieeruvus, siis tuleks seiret teostada vähemalt kahes asukohas: tundliku ala lähistel ning analoogsel (sügavus, settetüüp) alal lähipiirkonnas, kaablitööde eeldatavast mõjupiirkonnast väljas. Operatiivseire ja -modelleerimise abil on võimalik suurema heljumi koguse kandumist ja settimist tundlikule alale vältida.



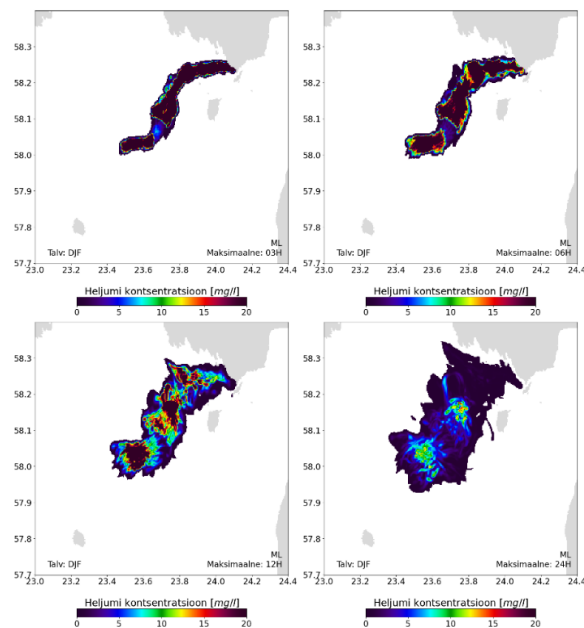
Joonis 4.5.3.1: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel eksportkaablite rajamisel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



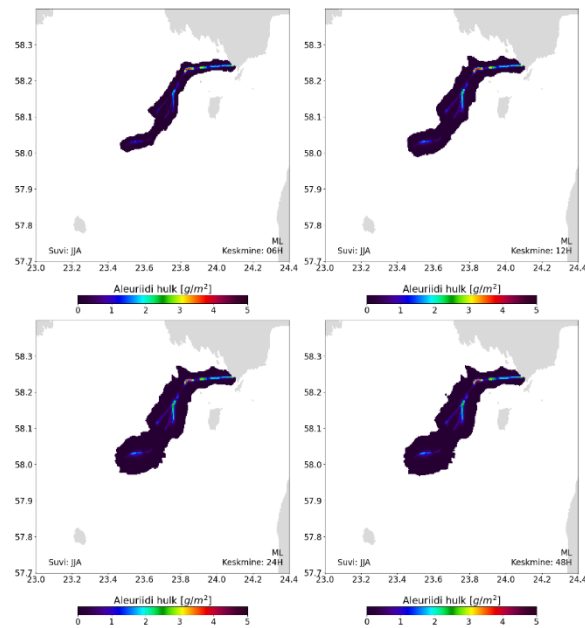
Joonis 4.5.3.2: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m sügavusel eksportkaablite rajamisel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



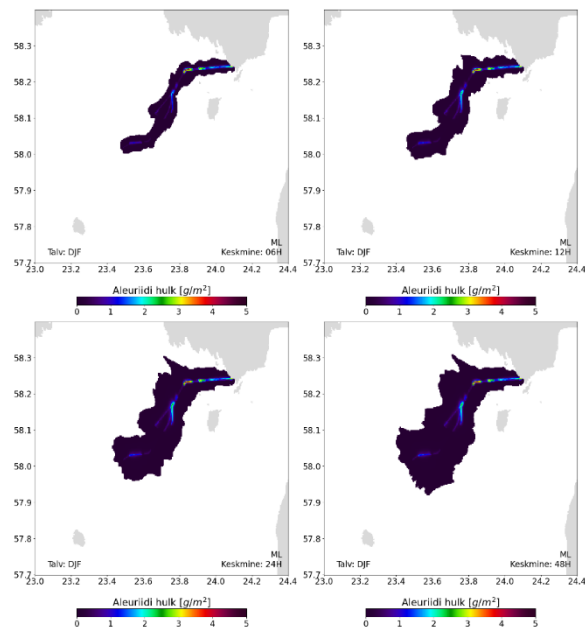
Joonis 4.5.3.3: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel eksportkaablite rajamisel suvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



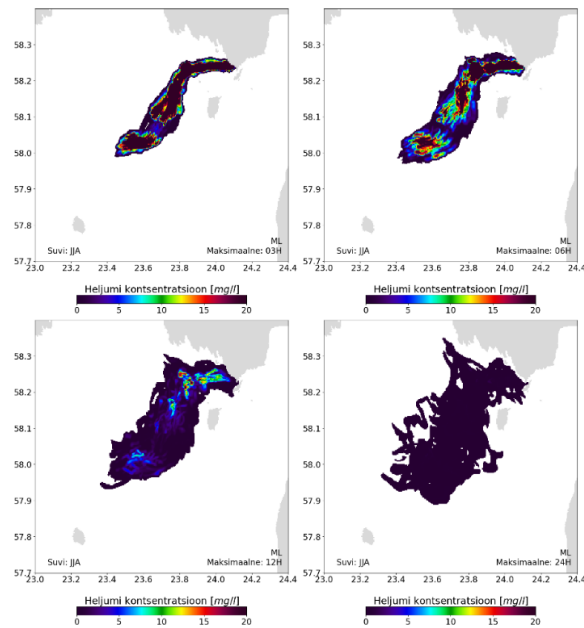
Joonis 4.5.3.4: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon igas võrgupesas 1 m sügavusel eksportkaablite rajamisel talvistes tingimustes pärast 3-, 6-, 12- ja 24-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



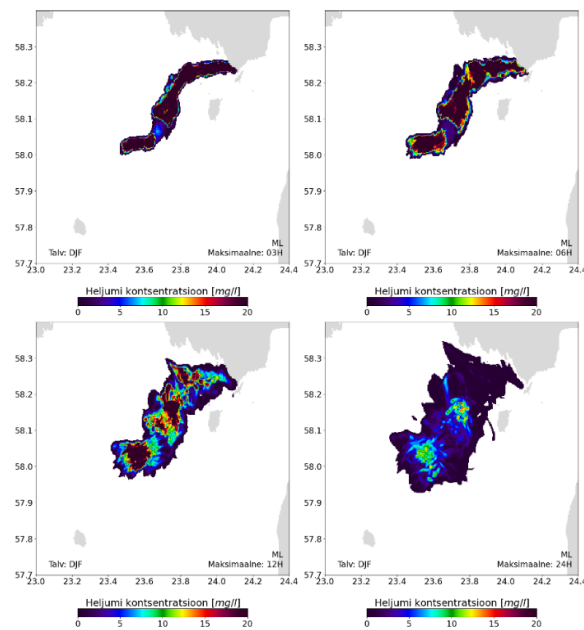
Joonis 4.5.3.5 Keskmise settinud aleuriidi hulk eksportkaablite rajamisel suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



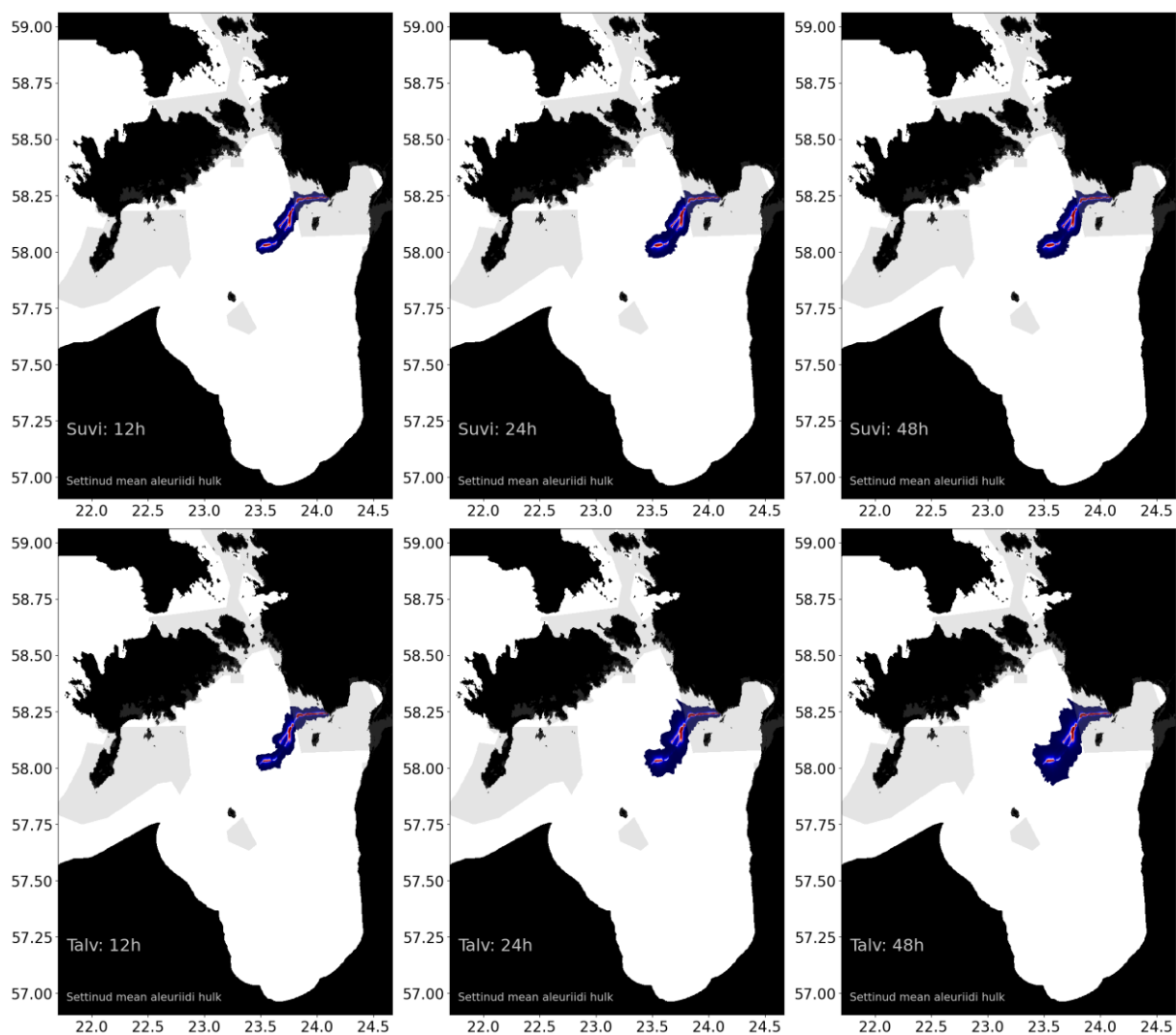
Joonis 4.5.3.6 Keskmise settinud aleuriidi hulk eksportkaablite rajamisel talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



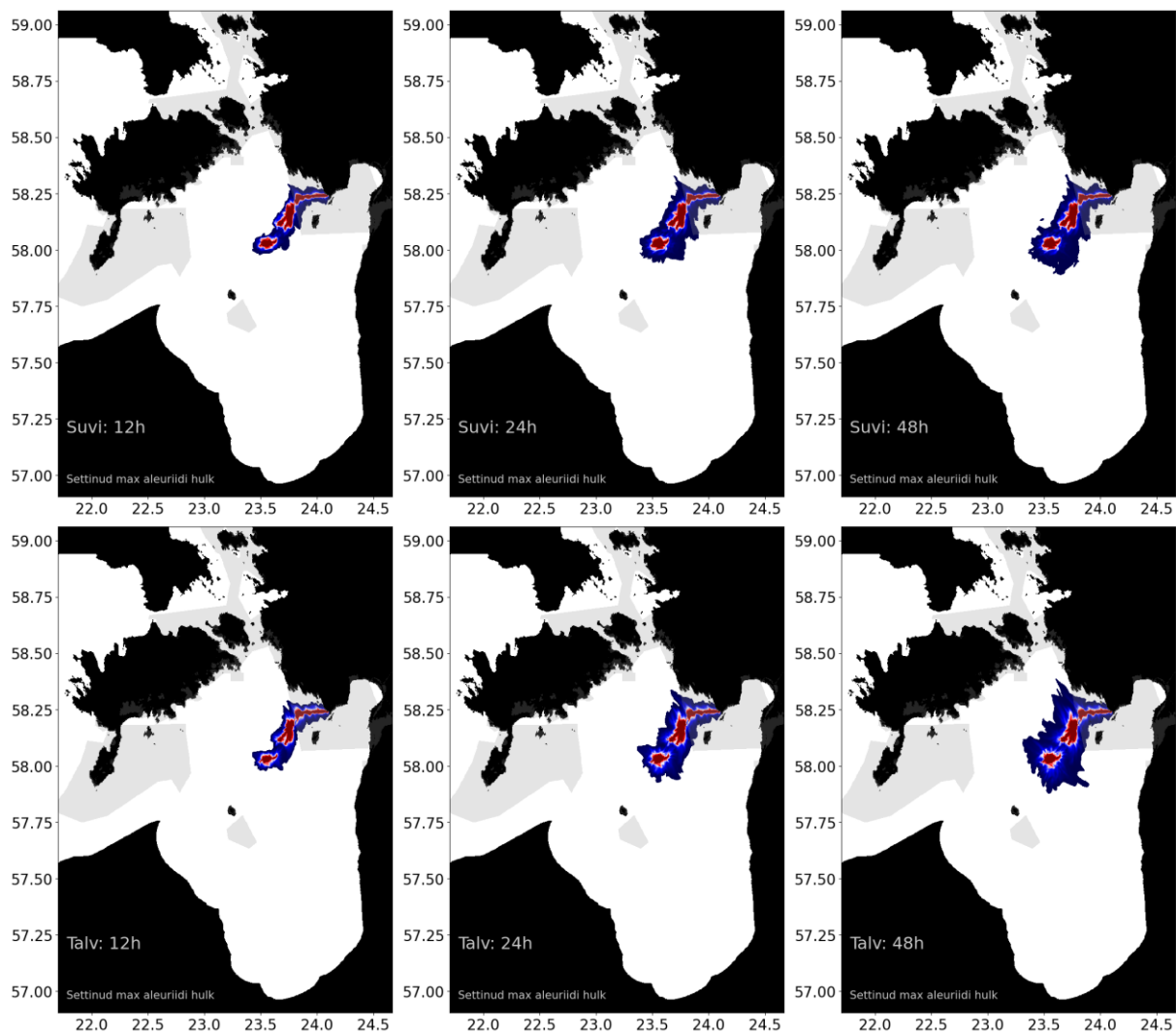
Joonis 4.5.3.7 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk igas võrgupesas eksportkaablite rajamisel suvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019.



Joonis 4.5.3.8 Maksimaalne settinud aleuriidi hulk igas võrgupesas eksportkaablite rajamisel talvistes tingimustes pärast 6-, 12-, 24- ja 48-tunnist levikut. Modelleeriti perioodi detsember-veebruar 2018/2019.



Joonis 4.5.3.9: Keskmine settinud aleuriidi hulga (väärtus üle 1g/m^2) ruumiline jaotus eksportkaablite rajamisel pärast 12, 24 ja 48h levikut suvistes ja talvistes tingimustes. Halliga on näidatud hoiu- ja kaitsealad Liivi lahes. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019 ning detsember-veebruar 2018/2019.



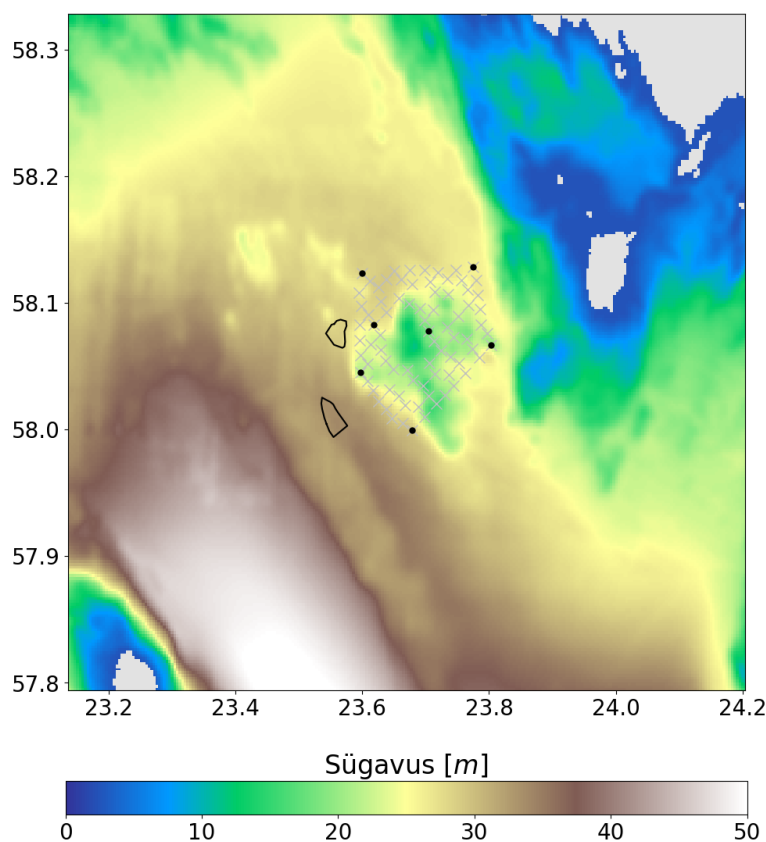
Joonis 4.5.3.10: Maksimaalne settinud aleuriidi hulga (väärtus üle 1g/m^2) ruumiline jaotus eksportkaablite rajamisel pärast 12, 24 ja 48h levikut suvistes ja talvistes tingimustes. Halliga on näidatud hoiu- ja kaitsealad Liivi lahes. Modelleeriti perioodi juuni-august 2019 ning detsember-veebruar 2018/2019.

4.5.4 Kaadamine

Kaadamisega tekkiva heljumi modelleerimine viidi läbi KMH hilisemas faasis, kui tööde ajastus ning ka paigaldatavate tuulikute arv oli täpsustunud. Töid tehakse perioodil märts-oktoober, kahel aastal ning esialgsel alale paigaldatakse 80 tuulikut. Arvutused teostati perioodile märts-oktoober 2021 ja märts-oktoober 2022.

Kaadamise mõju arvutustes käsitleti kahte alternatiivi: 1) materjal kaadatakse tuulikute kõrvale, 2) materjal viiakse kahele kaadamisalale (joonis 4.5.4.1). Arvutustes kasutatakse ühe tuuliku puhul tekkivat maksimaalset sette hulka, milleks on $10\,000\text{ m}^3$, st. kokku kaadatakse $800\,000\text{ m}^3$ materjali. Teise alternatiivi puhul tegime eelduse, et materjal kaadati perioodidel märts-oktoober 2021 ja märts-oktoober 2022 iga kolme päeva tagant.

Analüüsi heljumi kontsentratsiooni vees ning tööde lõpuks merepõhja settinud materjali hulka.



Joonis 4.5.4.1: Kaadamistööde asukohad (mustad kastid) koos tuulikute asukohtadega (hallid ristid). Mustade punktidega on näidatud vundamentide kõrvale kaadatud heljumi leviku hindamiseks kasutatud tuulikute asukohad.

Vastavalt arendajalt saadud põhjasetete lõimiselisele koostisele interpoleerisime lõimise tuuliku asukohtadesse ja saime igas asukohas lõimise jaotused, millest omakorda hindasime kogu kaadatava sette lõimise. Arvutustes eeldame kolme tüüpi setteid: muda/aleuriiti, liiva ja jämedateralisemaid setteid. Neist kõige aeglasema settimisega materjali (muda/alerutiiti) on kogu kaadatavas massis ligikaudu veerand (tabel 4.5.4.1).

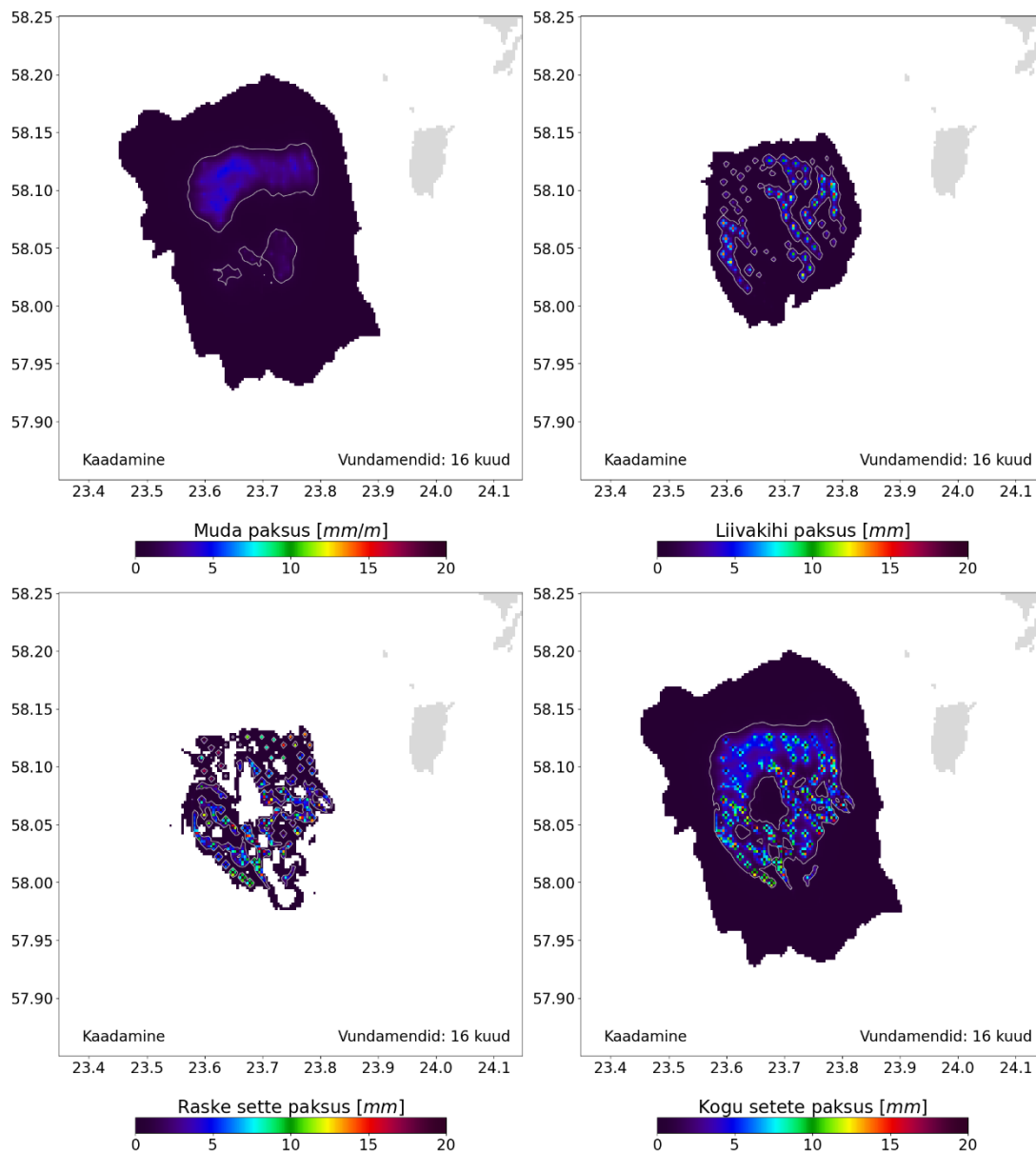
Tabel 4.5.4.1: Summaarne setete hulk kaadamistööde korral.

Settetüüp	Hulk [m3]
Muda/Aleuriit	206830
Peenliiv	259620
Jämedateralisemad setted	333550
Summa:	800000

Joonisel 4.5.4.2 on esitatud vundamentide kõrvale tõstetud settematerjali jaotus pärast tööde teostamist settekihi paksusena. Jämedam materjal settib enamasti tuulikute vahetus läheduses ning ka liiva levik on suhteliselt piiratud. Suurim hajumine on aleuriidil. Lõimisest tulenevalt on suurim settimiskoormus tuulikute vahetus läheduses ning tuulepargi muudes osades (vundamentide vahel) on see suurusjärgus 5-7 mm. Silmas tuleb pidada, et simulatsiooni võrgupesa suurus on 250 x 250 m. Reaalses looduses esineb väiksemas mastaabis lokaalselt suuremaid aga ka väiksemaid koormuseid. Tuulepargist eemal kahaneb settekihi paksus kiiresti alla 2 mm. Samuti ei setti materjali olulisel määral tuulepargi ala keskel olevale madalamale piirkonnale, kuhu enam tuulikuid ei planeerita. Pidades silmas, et töid tehakse kahe aasta jooksul, on tuulepargi sees, vahetult kaadamiskohast eemal settimiskoormus ca 2-4 mm aastas ja tuulepargist väljas alla 1 mm aastas. Looduslik settimiskiirus on ruumis varieeruv ja mõnes mere piirkonnas settimist ei toimu, vaid domineerib kulutusprotsess. Eesti Geoloogiateenistus (2022) on dateerinud setteprofiili tuulepargi esialgsest alast ca 17 km edelas ja saanud settimiskiiruseks ligikaudu 2 mm aastas. Samasugust settimiskiirust mainivad ka (Kotta et al., 2008) Kotta jt (2008), kes viitavad (Danielsson et al., 1998) tööle, mille täisversiooni ei õnnestunud aruande koostamise ajaks hankida. Võib arvata, et tormide käigus toimub settinud materjali täiendav ümberpaiknemine (millega antud simulatsioonis ei ole arvestatud), mis edaspidi toimub üheskoos looduslike protsesside käigus aset leidva sette transpordiga. Loodusliku heljumi kontsentratsioonide arvestavaid tõuse registreerisime me korduvalt nii laevalt kui autonoomsetelt seadmetelt tehtud mõõtmistega. Vertikaalsed profiilid näitasid, et heljumi sisalduse vertikaalsed maksimumid on põhjalähedases kihis ja mere ülemisse kihti need sündmused ei ulatu. Kõrgenenud heljumi sisaldusega kihi paksus ulatus ca 10 meetrini põhjast. Heljumi sisalduse tõusud >20 mg/l ja vahel enamgi leidsid aset, kui oluline laine kõrgus ulatus ca 3 meetrini. Selliseid sündmuseid leidis ca 6 kuu jooksul tehtud hägususe mõõtmiste ajal aset 8-9 korda. Kui eeldame, et terve aasta jooksul leidis selliseid sündmuseid aset ca 16-18 korda ja resuspensiooni poolt põhjustatud heljumi sisalduse tõus 10 m põhjalähedases kihis oli 20

mg/l ning eeldame, et esines ka väiksemaid resuspendeerumisi, siis saame, et loodusliku resuspendeerumise tõttu taassettimise koormus on ligikaudu 2 mm. Võib järeldada, et tuulepargi ala sees on kaadamise põhjustatud settimine vähemalt sama suur (tuulikute lähistel selgelt üle loodusliku fooni), kui loodusliku resuspensiooni poolt tekitatud settimine. Tuulepargi alast väljas (kaadamise vahetust mõjust eemal) jääb settimise mõju loodusliku resuspensiooni põhjustatule alla.

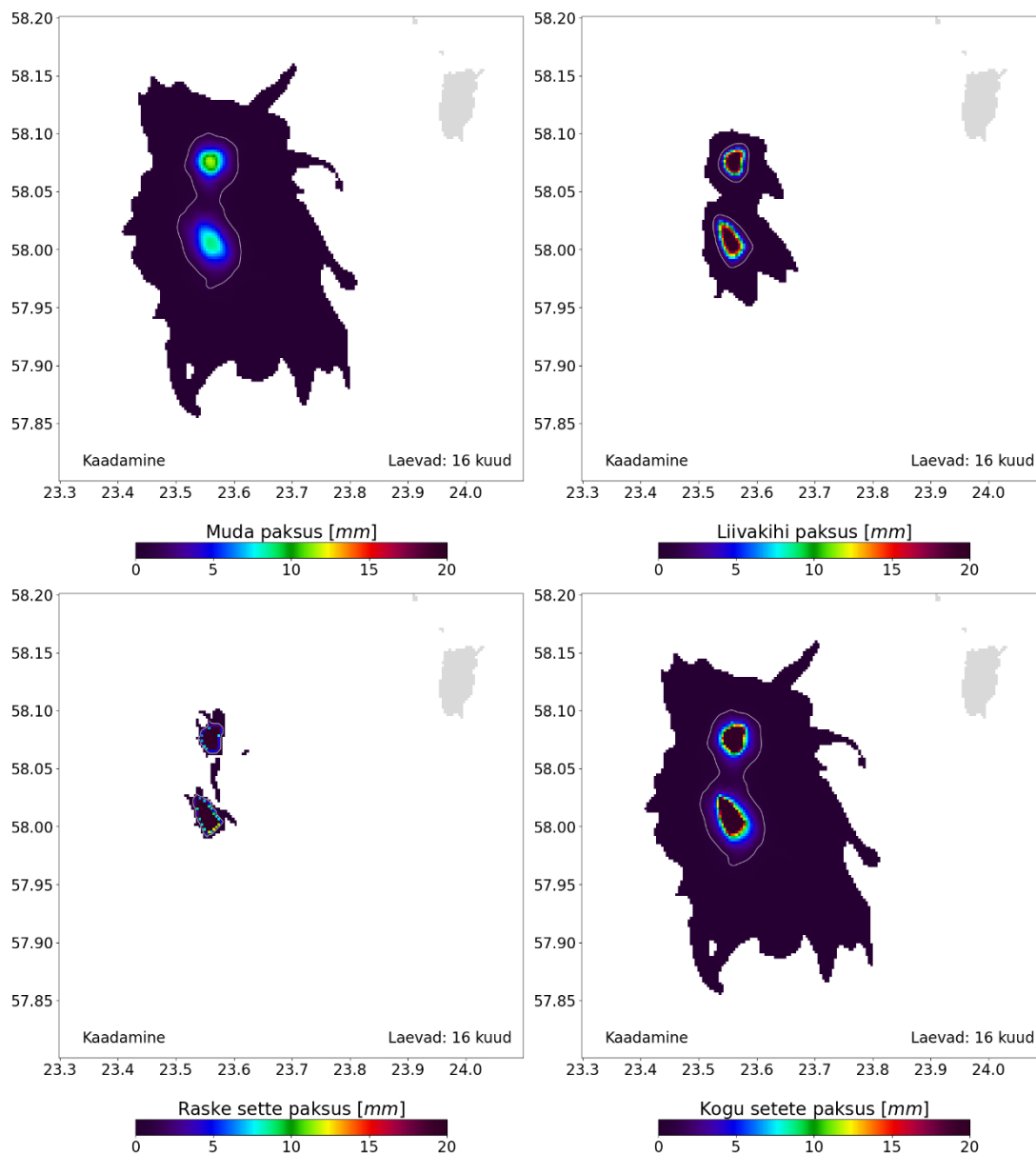
Keskmiselt settib looduskaitsealade (peamiselt Pärnu lahe hoiuala) suurusjärgus ca 100 m³ materjali. See on kogu mahtu (800 000 m³) silmas pidades väike osakaal. Ebasoodsate tingimuste prevallides on võimalik, et hoiualale jõuab ka suurem hulk materjali. Settimist hoiualale on võimalik minimeerida, kui idapoolsete tuulikute paigaldamisel välditakse heljumit tekitavaid töid tugevamate lõuna- läänekaarte tuultega.



Joonis 4.5.4.2: Tööde käigus vundamentide kõrvale kaadamisega tekkinud settematerjali paksus. Pidevjoonega on näidatud 1 mm isojoon.

Joonisel 4.5.4.3 on toodud kaadamise teise alternatiivi settekihi ruumilised jaotused. Võrreldes esimese alternatiiviga on suure (>10 mm) settimiskoormusega ala laialdasem, kuid > 1 mm koormusega ala on võrreldes esimese alternatiiviga väiksem. Teisisõnu on 2. alternatiivi puhul mõju ruumis piiratum, kuid lokaalne mõju kahel kaadamisalal on tugevam. Sama kehtib ka kui võrrelda mõju loodusliku resuspensiooniga põhjustatud settimisega. Esimese alternatiivi korral on ala, kus looduslikku resuspensiooni ületatakse suurem ning teise alternatiivi puhul väiksem, kuid viimasel juhul tehakse seda lokaalselt intensiivsemalt. Erinevus on ka tööde perioodis. Esimesel juhul mõjutatakse settimisega merepõhja ebasoodsate juhuste kokku langemisel töödega kuni 3-4 tuuliku juures, st. paari nädala jooksul. Teisel juhul toimub mõju 16 kuu

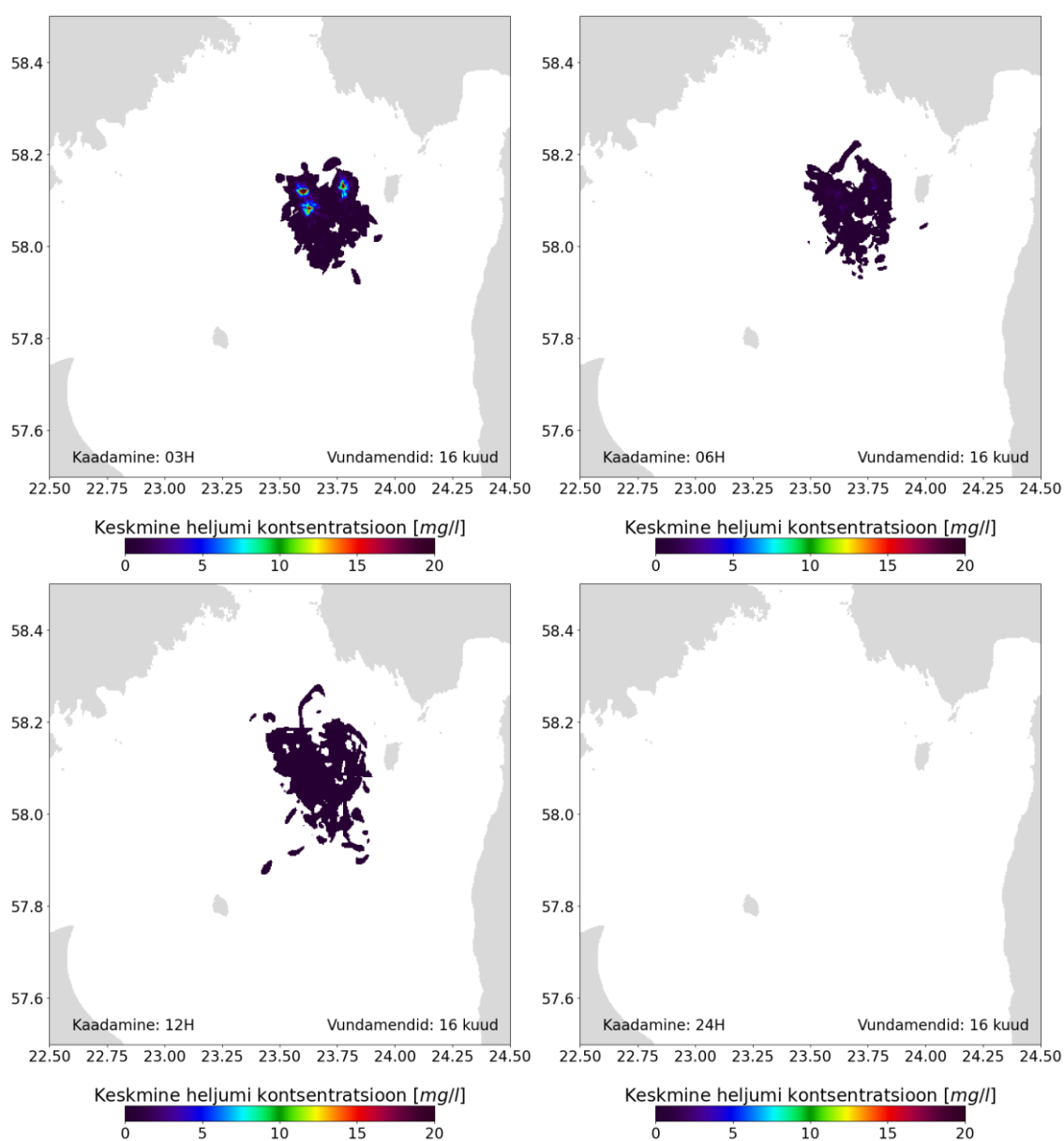
jooksul. Hoiualadele jõuab kahelt kaadamisalalt (2. alternatiiv) vaid marginaalne kogus materjali, mistõttu tööde piiramine sellest aspektist vaadatuna ei ole vajalik.



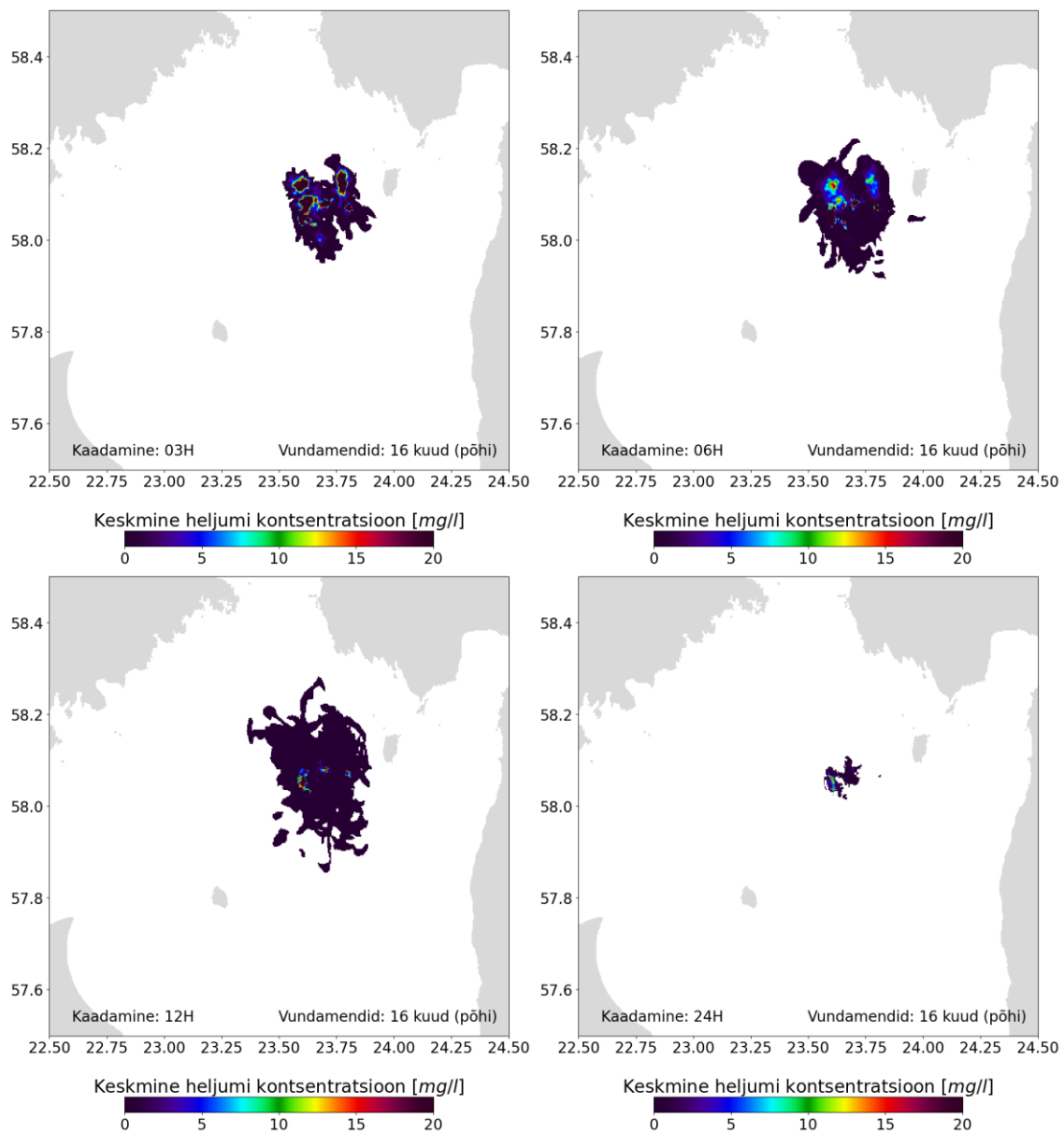
Joonis 4.5.4.3: Kahele kaadamisalale (joonis 4.5.4.1) kaadatud materjalist tekkinud sette paksus. Pidevjoonega on näidatud 1 mm isojoon.

Järgnevalt vaatleme kaadamise esimese alternatiivi mõju heljumi kontsentratsioonidele veesambas ja heljumi levikut. Heljumi keskmine kontsentratsioon 18 kuu vältel toimunud kaadamise puhul pinna- ja põhjakihis on toodud joonistel 4.5.4.4-4.5.4.5. Maksimaalsed kontsentratsioonid on toodud joonistel 4.5.4.6-4.5.4.7. Tööde täpset ajastust ja kestust ei ole võimalik ette teada, sest tegevused on mõjutatud ilmastiku tingimustest, lokaalsetest merepõhja geoloogia eripäradest, logistikast jne. Arvutustes oleme eeldanud, et vundamentide

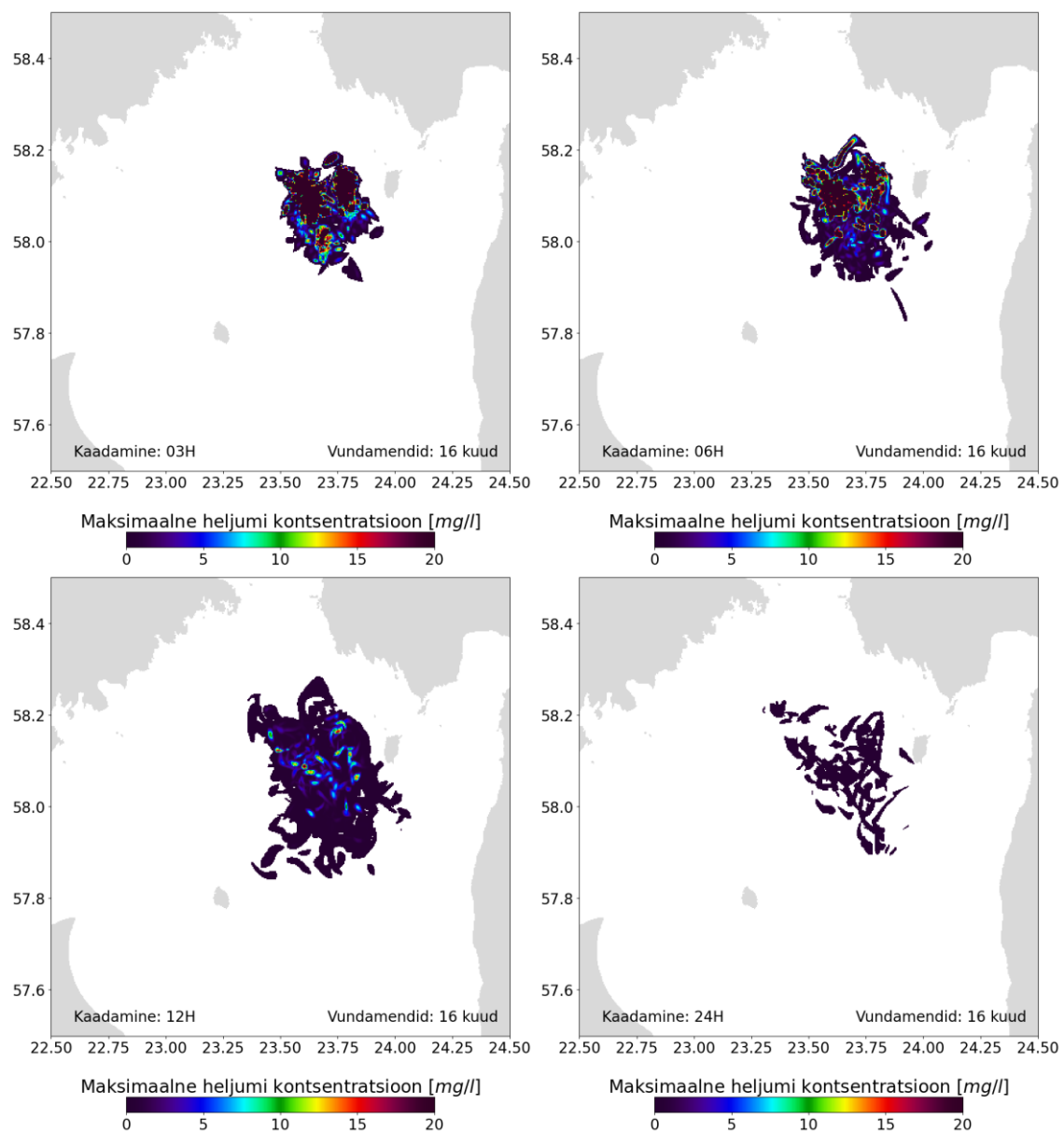
ettevalmistamisel tekkiv materjal ($10\,000\text{ m}^3$) kaadatakse üheskoos ja ühel ajahetkel tuuliku kõrvale. Sel viisil tekib tuuliku kõrvale kõrge heljumi sisaldusega veemass, mis oluliselt vähendab vee läbipaistvust. Pinnakihi kaob heljum ööpäevaga ning ka põhjalähedases kihis on peale ööpäeva näha vaid väikest osa settest, st. enamus kaadatud materjalist peale ööpäeva enam veesambas ei ole. Kuna kaadamist tehakse iga tuuliku juures vaid ühekordselt ja kogu pargi paigaldus tehakse perioodil märts-oktoober kahe aasta jooksul, siis see tähendab, et tugev mõju iga tuuliku juures esineb kuni ühe ööpäeva jooksul. Teisisõnu, võrreldes teise alternatiiviga, kus materjal pannakse kahele alale, on siin mõju ruumis hajutatud. Võrreldes pinnakihi on põhjalähedases kihis heljumi levik laiaulatuslikum.



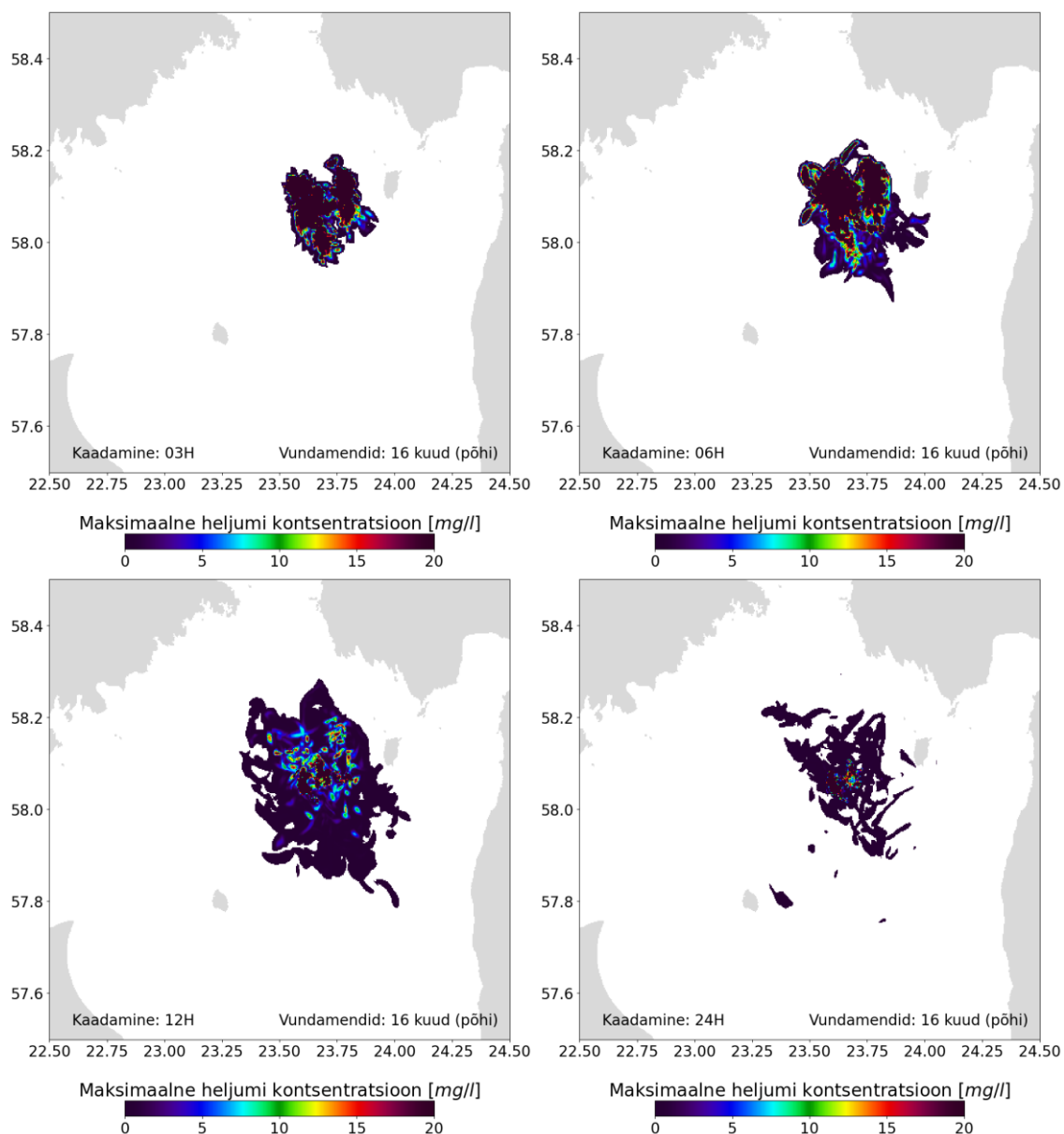
Joonis 4.5.4.4: Keskmine heljumi kontsentratsioon pinnakihi kaadamise puhul tuulikute kõrval (joonis 4.5.4.1).



Joonis 4.5.4.5: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m kõrgusel merepõhjast kaadamise puhul tuulikute kõrval (joonis 4.5.4.1) .



Joonis 4.5.4.6: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon pinnakihis kaadamise puhul tuulikute kõrval (joonis 4.5.4.1).

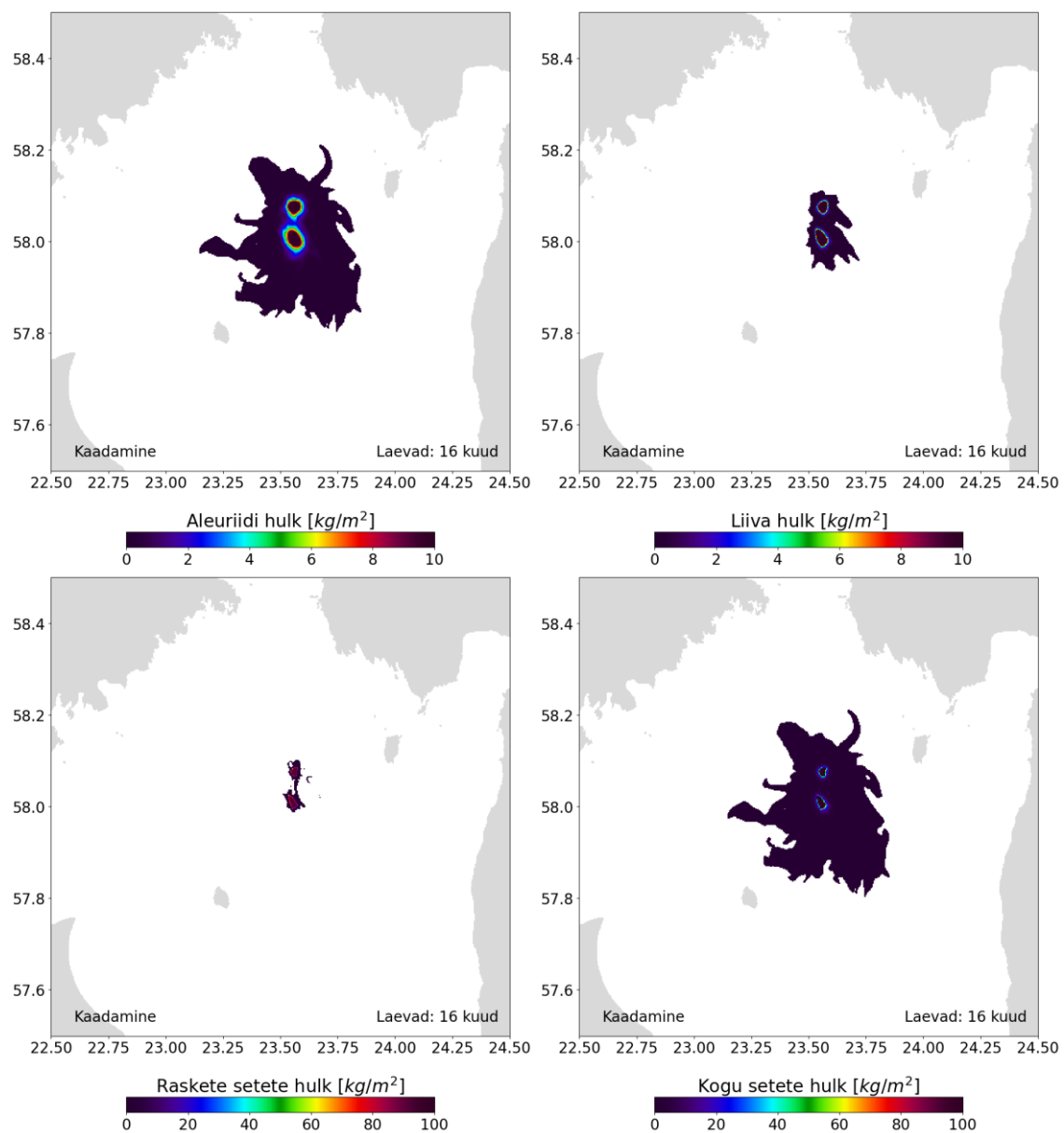


Joonis 4.5.4.7: Maksimaalne heljumi kontsentratsioon 1 m kõrgusel merepõhjust kaadamise puhul tuulikute kõrval (joonis 4.5.4.1) .

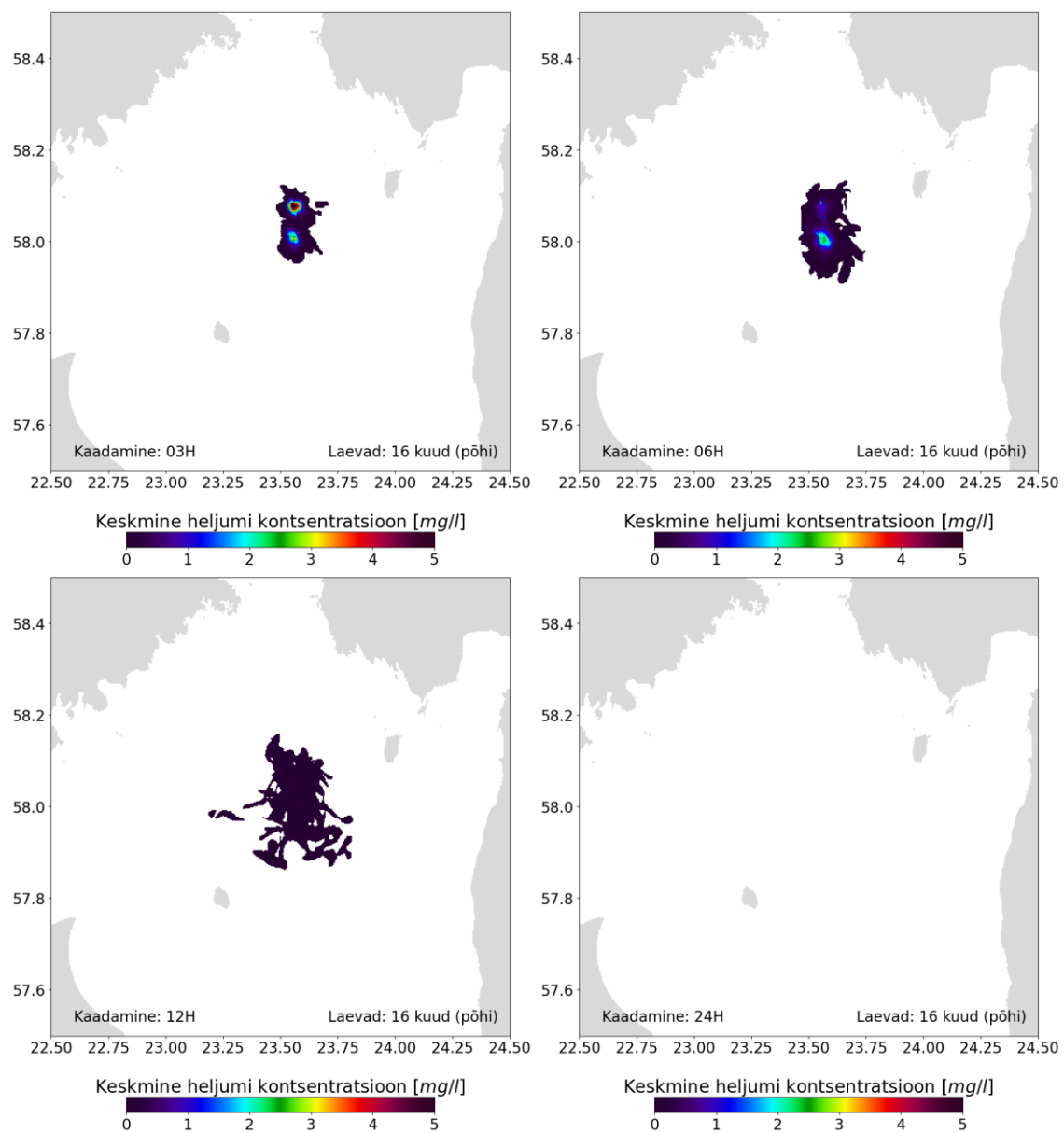
Järgnevalt vaatleme kaadamise teise alternatiivi mõju heljumi kontsentratsioonidele veesambas ja heljumi levikule. Heljumi keskmine kontsentratsioon 18 kuu vältel toimunud kaadamise puhul pinna- ja põhjakihis on toodud joonistel 4.5.4.8-4.5.4.9. Maksimaalsed kontsentratsioonid on toodud joonistel 4.5.4.10-4.5.4.11.

Heljum püsib mere ülakihis piiratud aja, 12 h möödudes on enamus heljumist vajunud pindmisest kihist veesamba alumistesse kihtidesse. Põhjalähedase kihi jaotustes on 3-h peale kaadamist näha keskmisi kontsentratsioone üle 5 mg/l. Hajumine ja leviku ulatus on alumise

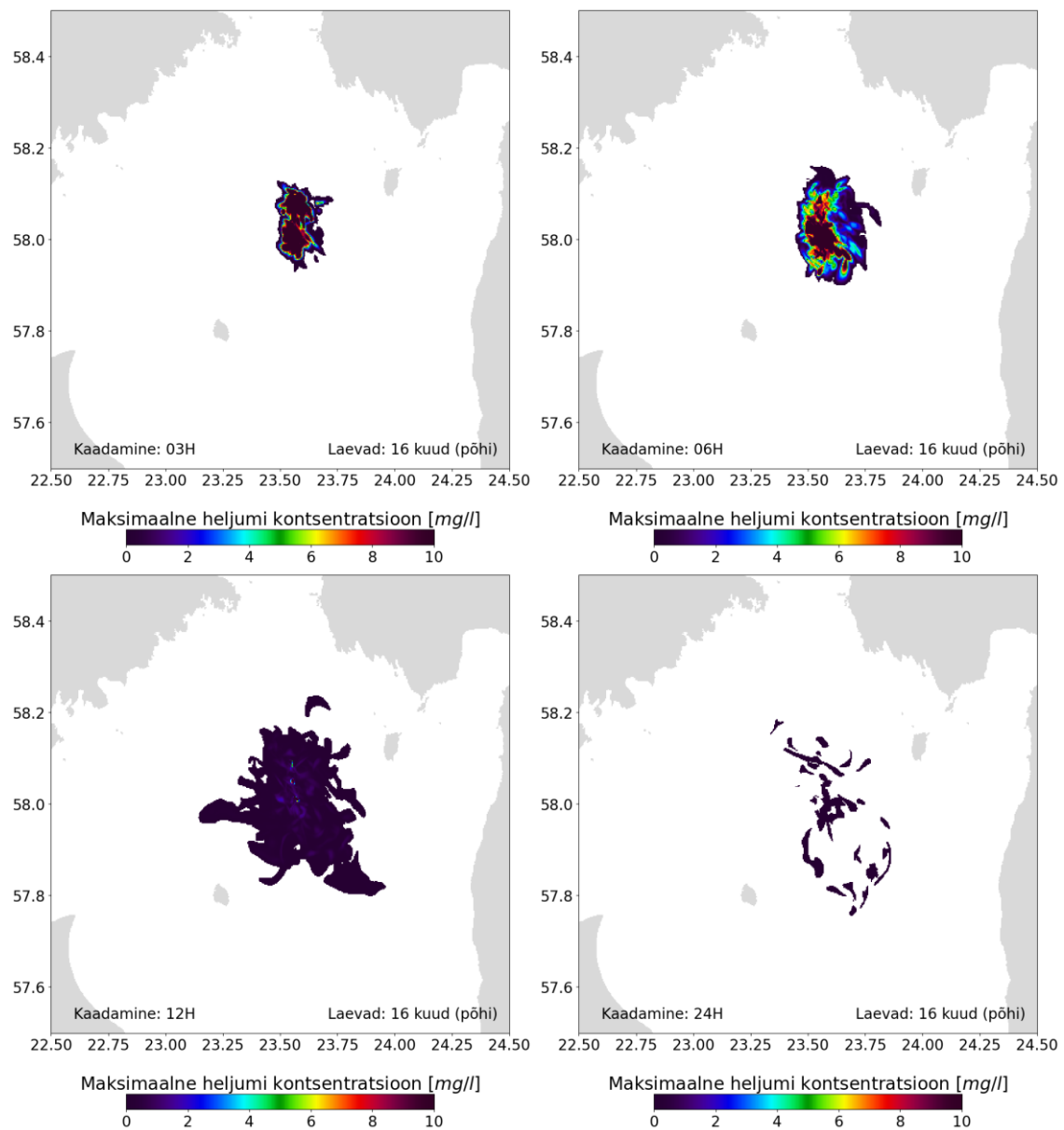
kihi jaotustes suurem. Suurem osa heljumist settib ühe ööpäeva jooksul. Maksimaalsete kontsentratsioonide jaotustest on näha, et ebasoodsatel tingimustel võib heljum põhjalähedases kihis veesambas olla ka veel ööpäev peale kaadamist (joonis 4.5.4.11). Samuti võivad soodsatel tingimustel pinnakihi kontsentratsioonid esimestel tundidel peale kaadamist oluliselt suuremad olla kui keskmiselt (joonis 4.5.4.10). Kui töid tehakse rütmis kaadamine iga kolme päeva tagant, siis on esimesel poolel ööpäeval veesamba läbipaistvusele arvestatav mõju. Ülejäänud kaks ja pool ööpäeva on mõju tagasihoidlik. Kui teha kaadamisi väiksema intervalliga, siis lühiajalise mõju tugevus on väiksem (kontsentratsioonid on väiksemad), kuid periood, mil mõju esineb on pikem. Lõpliku settimiskoormuse seisukohalt ei ole suurt erinevust, kas kaadata väiksemaid mahte sagedamini või suuremaid harvemini. Küll aga võib töö iseloomul olla potentsiaalne mõju elustikule (põhjaelustik, kalastik, linnustik).



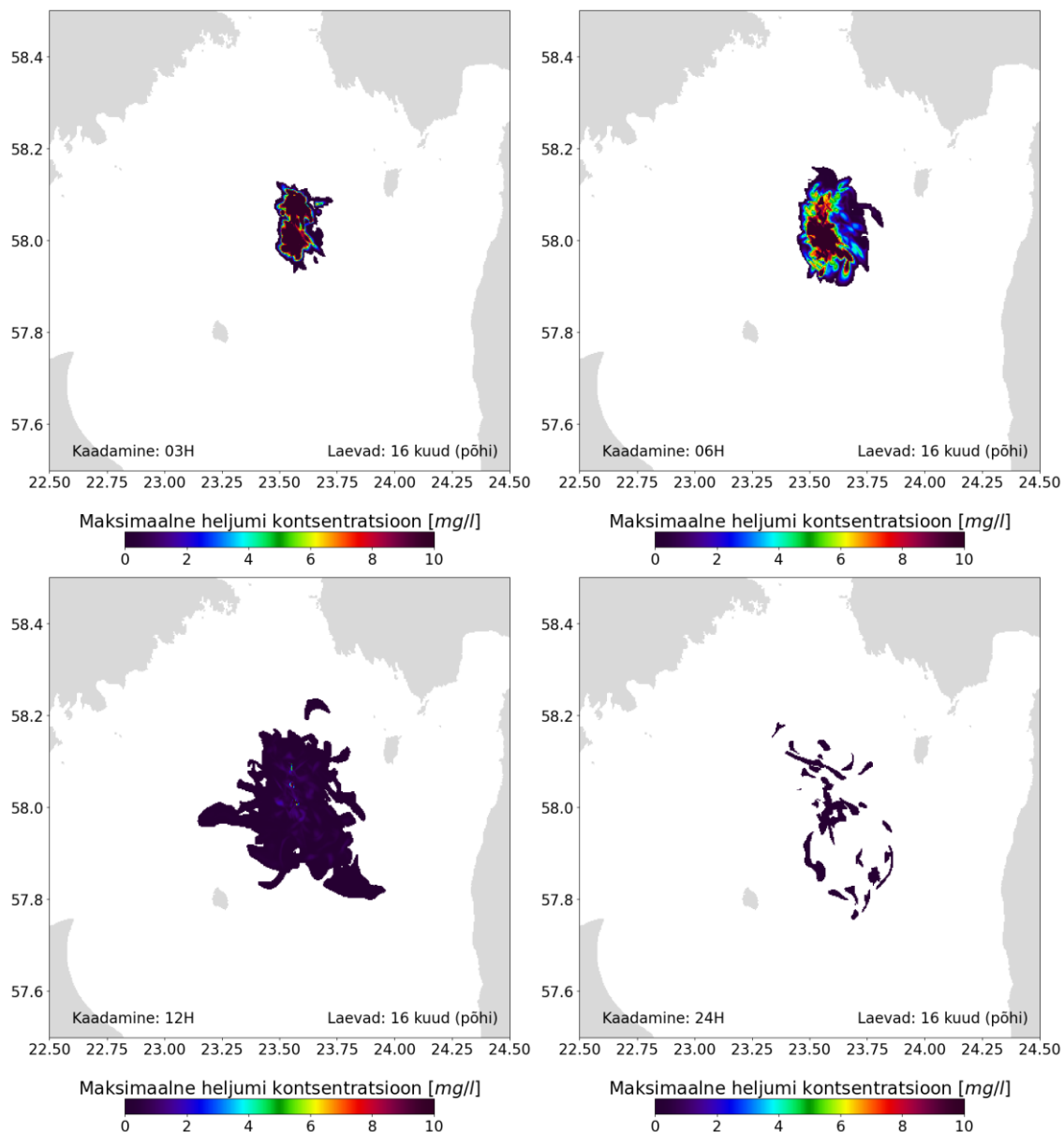
Joonis 4.5.4.8: Keskmine heljumi kontsentratsioon kahe kaadamisala (joonis 4.5.4.1) kasutamise korral.



Joonis 4.5.4.9: Keskmine heljumi kontsentratsioon 1 m põhjast kahe kaadamisala (joonis 4.5.4.1) kasutamise korral.



Joonis 4.5.5.10 Maksimaalne pinnakihi heljumi kontsentratsioon kahe kaadamisala (joonis 4.5.4.1) kasutamise korral.



Joonis 4.5.5.11: Maksimaalne põhjakihi heljumi kontsentratsioon kahe kaadamisala (joonis 4.5.4.1) kasutamise korral.

Kokkuvõtteks võib öelda, et ehitusaegne heljumi sisalduse tõus ja vee läbipaistvuse vähenemine kaadamise tõttu kindlasti aset leiab. Kui kaadatakse otse tuulikute kõrvale, on mõju ruumis hajutatud, kuid heljumiga mõjutatud mereala on suurem. Kui kaadatakse kahele kaadamisalale, on mõjuala väiksem, kuid see on tugevalt kontsentreeritud kahele alale. Kui kaadamist teha nt. iga kolme päeva tagant, siis on tööde perioodist (16 kuud) ca 1/6 ajast veesambas kõrgeenenud heljumi kontsentratsioonid ja vähenenud vee läbipaistvus. Settimise mõju puhul on kahe kaadamise alternatiivi võrdluses samasugused tendentsid. Loodusliku settimiskoormust ületatakse tuulikute juurde kaadates (kaadamise 1. alternatiiv) suuremal alal kui kaht kaadamisala kasutades (kaadamise 2. alternatiiv). Samas intensiivse settimise piirkond

on kaadamise 2. alternatiivi puhul suurem. 2. alternatiivi puhul mõjutatakse vähem madalaid alasid ning settimine looduskaitsealadele on ebaoluline. 1. alternatiivi puhul võib heljum soodsatel tingimustel jõuda ja settida ka looduskaitsealadele. Seda mõju on võimalik piirata. Kaadamiskoha valikul tuleks arvestada elustiku (põhjaelustik, kalastik, linnustik) eripärasid. Võimalus on mõju hajutada suuremale ja madalamale alale või alternatiivina mõjutada merd väiksemal alal ja sügavamas piirkonnas, aga intensiivsemalt.

4.6. Õlireostuse levik

4.6.1. Esialgne ja täiendusala

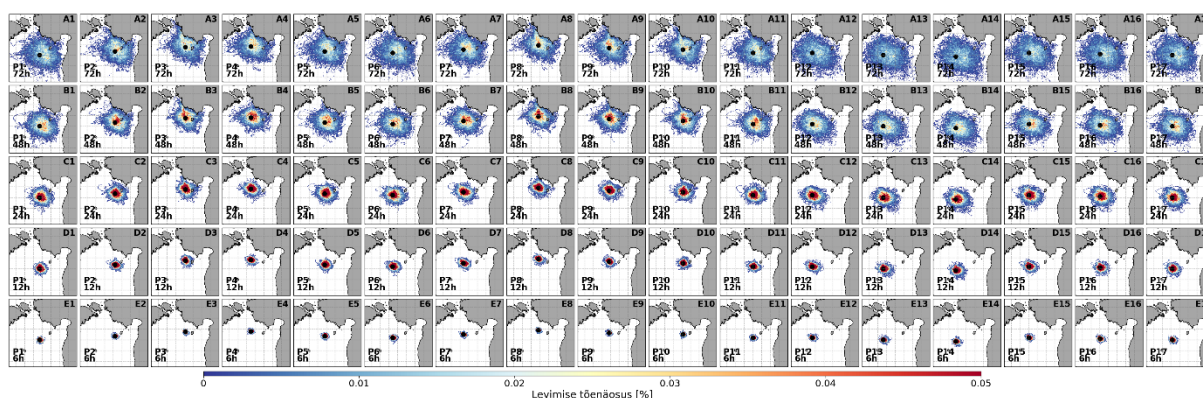
Järgnevalt analüüsime õlireostuse levikut erinevate stsenaariumite korral. Levimisajad erinevates stsenaariumites olid 6, 12, 24, 48 ja 72 tundi. Osakesed lasti lahti 17 asukohast, millest 11 jäid tuulepargi esialgsele alale (P1 – P11) ning 6 täiendusale (P12 – P17). Osakesti lasti perioodil 02.01.2018 – 08.10.2023 jooksul lahti iga tunni tagant. Osakeste lõppasukohad kaardistati ühtlasele, 500 m sammuga võrgule ning võrgupessa levimise tõenäosus arvutati kui antud võrgupesas seisma jäänud osakeste arv jagatuna antud algpunktist lahti lastud osakeste koguarvuga.

Joonisel 4.6.1.1 on näidatud osakeste (reostuse) jaotus erinevate levimisaegade korral. Easialgse ala punktidest toimus levik peamiselt põhja/kirde suunas. Punktide P2, P3, P4, P7, P8, P9, P10 jaotus oli mõnevõrra lokaalsem kui punktide P1, P5, P6 ja P11 jaotus sama levimisaja jooksul. Üldiselt jõudis rannikule enim osakesi tuulepargi esialgse ala idaküljelt (punktidest P2, P3, P8, P9 ja P10) ning vähem täiendusale asuvatest punktidest (vt. joonis 4.6.1.6). Rannikule jõudmise tõenäosus vähenes kiiresti levikuaja lühendamisega. Mandri-Eesti rannikuni jõudsid osakesed 48 – 72 tunni jooksul kõigist esialgse ala punktidest. 24 tunni jooksul jõudis mandrile oluliselt vähem osakesi. Kihnu saarele võis 24 tunni jooksul osakesi jõuda endiselt kõigist esialgse ala punktidest. Väiksemate levimisaegade (6 h ja 12 h) korral osakesed rannikuni ei jõudnud ning ainult punktidest P2, P3 ja P10 (tuulepargi esialgse ala idapoolseimad punktid) jõudsid osakesed 12 tunni jooksul Kihnu saareni.

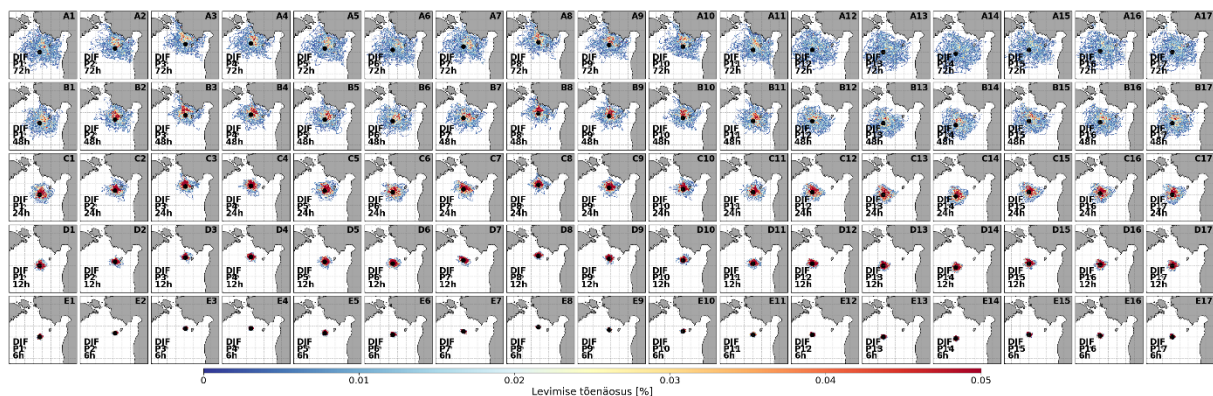
Täiendusala paikneb mandrist kaugemal, seega osakeste rannikule jõudmise tõenäosus oli sealt väiksem. Vaid 72 tunniga võis osakesi mandrile jõuda ning 48 tunnise levimisajaga oli Kihnu saar veel levikuulatuses. Sellest väiksemate levimisaegadega osakesi täiendusalt rannikule ei jõudnud. Reostus jaotus neist punktidest laiemale alale peale võrreldes esialgse ala punktidega, s.t. nende ruumilises jaotuses (48 h ja 72 h) ei olnud sedavõrd kõrgeid väärtusi nagu näiteks punktide P8 – P10 puhul.

Osakeste levikus esine sesoonsus. Talvisel (DJF) ja sügisel (SON) perioodil, kui Liivi lahe pinnakihi voolamine oli valdavalt kirdesse, toimus osakeste levik samuti enamasti põhja ja kirde suunas (joonised 4.6.1.2 ja 4.6.1.3). Seevastu kevadisel (MAM) ja suvisel (JJA) perioodil liigutas antitsükloonaalne tsirkulatsioon osakesi rohkem ida/lõuna suunas (joonised 4.6.1.4 ja 4.6.1.5). Kõige väiksem leviku ulatus oli kevadisel perioodil ja kõige suurem sügis-talvisel. Kõikidel aastaegadel oli osakeste 6 – 12 tunniga rannikule jõudmise tõenäosus praktiliselt olematu. Alates 24 tunnist jõudis esialgse ala idaküljelt rohkem osakesi rannikule. Täiendusala mõju jäi ka 72 h levikuajaga minimaalseks, seda eriti kevad-suvisel perioodil (joonis 4.6.6.6).

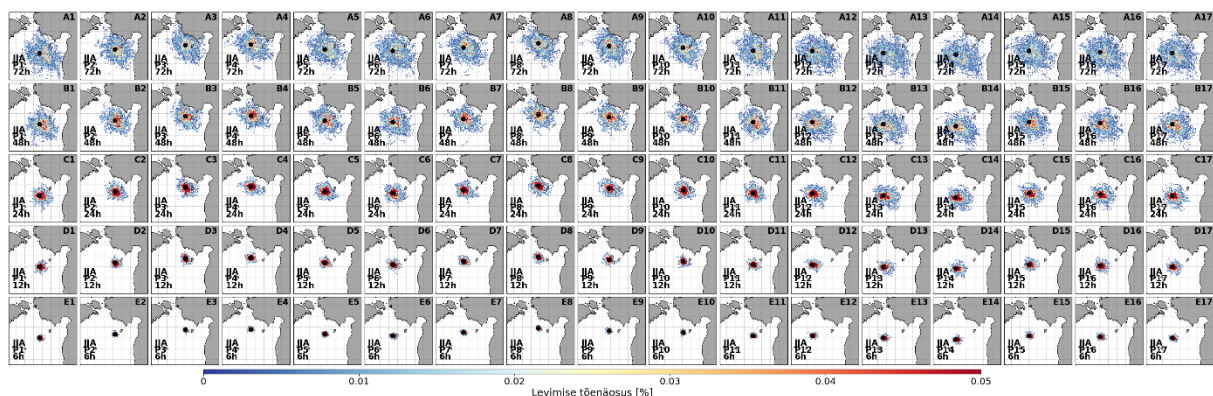
Osakeste hoiu – ja kaitsealadele levimise tõenäosus on näidatud joonisel 4.6.1.7. Kogu analüüsiperioodi jooksul jõudis Pärnu lahe hoiualale kõige rohkem osakesi punktist P3 (39%), sarnased väärtused olid ka teistel tuulepargi idaküljel asuvatel punktidel. Täiendusala punktide väärtused jäid alla 8%. Tuulepargi asetuse tõttu oli osakeste levik hoiualadele suurem sügis-talvisel perioodil.



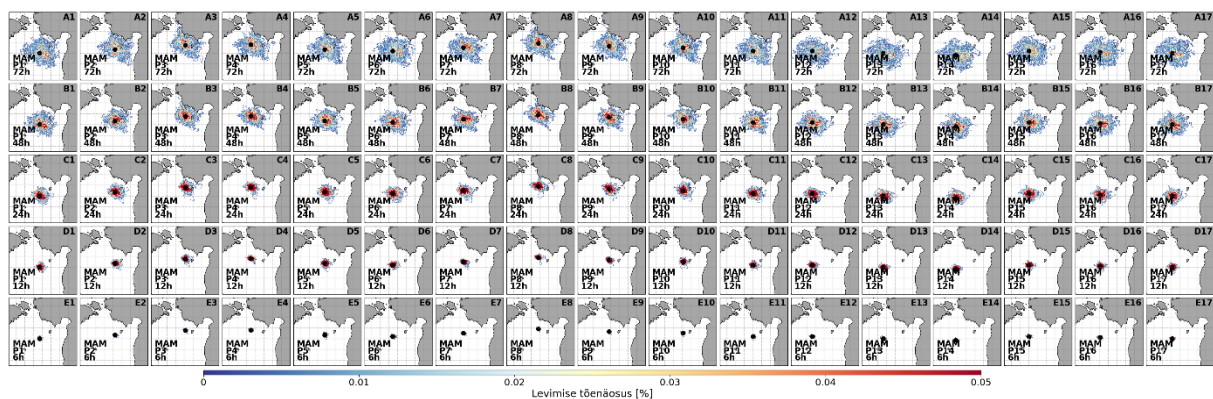
Joonis 4.6.1.1: Õlireostuse levimise tõenäosus kogu perioodi jooksul.



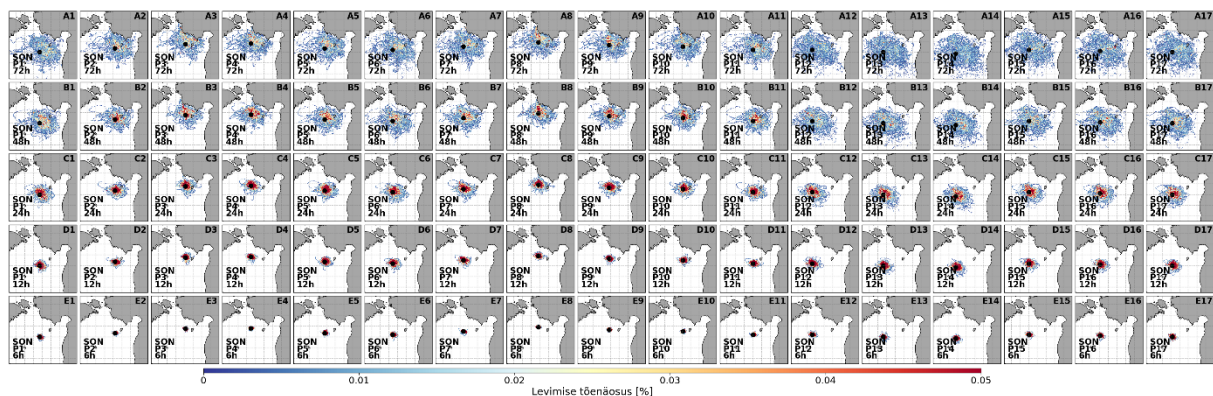
Joonis 4.6.1.2: Õlireostuse levimise tõenäosus talvisel perioodil.



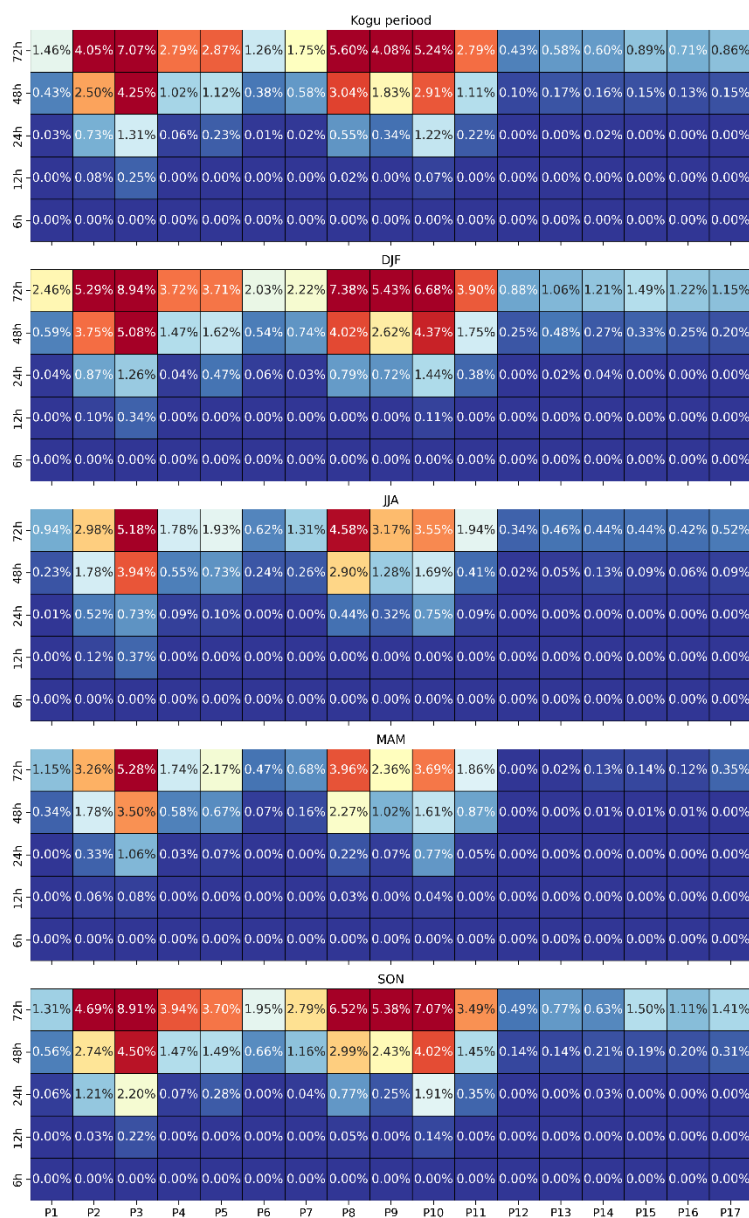
Joonis 4.6.1.3: Õlireostuse levimise tõenäosus suvisel perioodil.



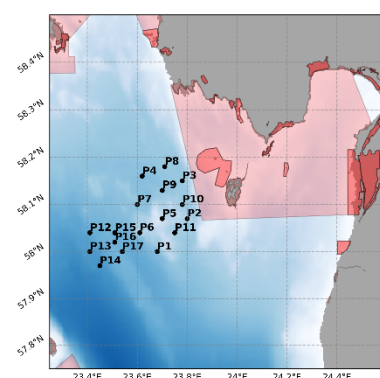
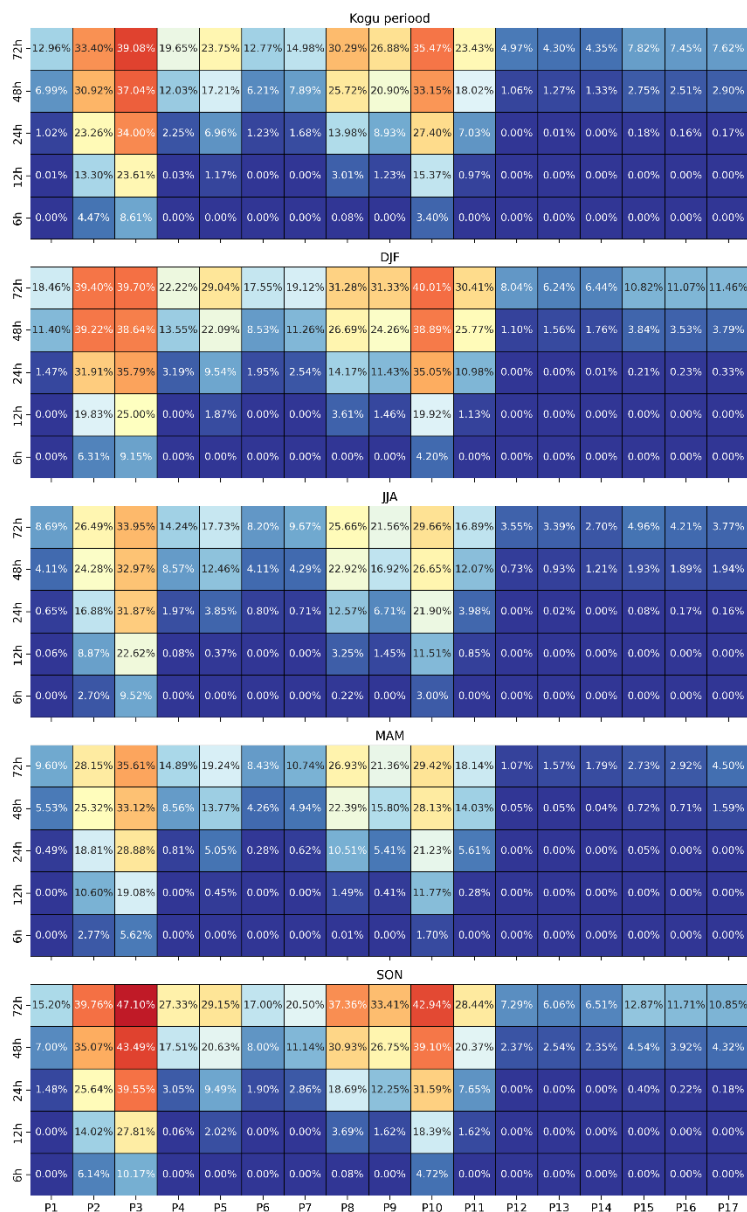
Joonis 4.6.1.4: Õlireostuse levimise tõenäosus kevadperioodil.



Joonis 4.6.1.5: Õlireostuse levimise tõenäosus sügisperioodil.



Joonis 4.6.1.6: Õlireostuse rannikule jõudmise tõenäosus kogu perioodi jooksul ja sesoonide kaupa. Punane joon parempoolsel joonisel tähistab rannikuala.

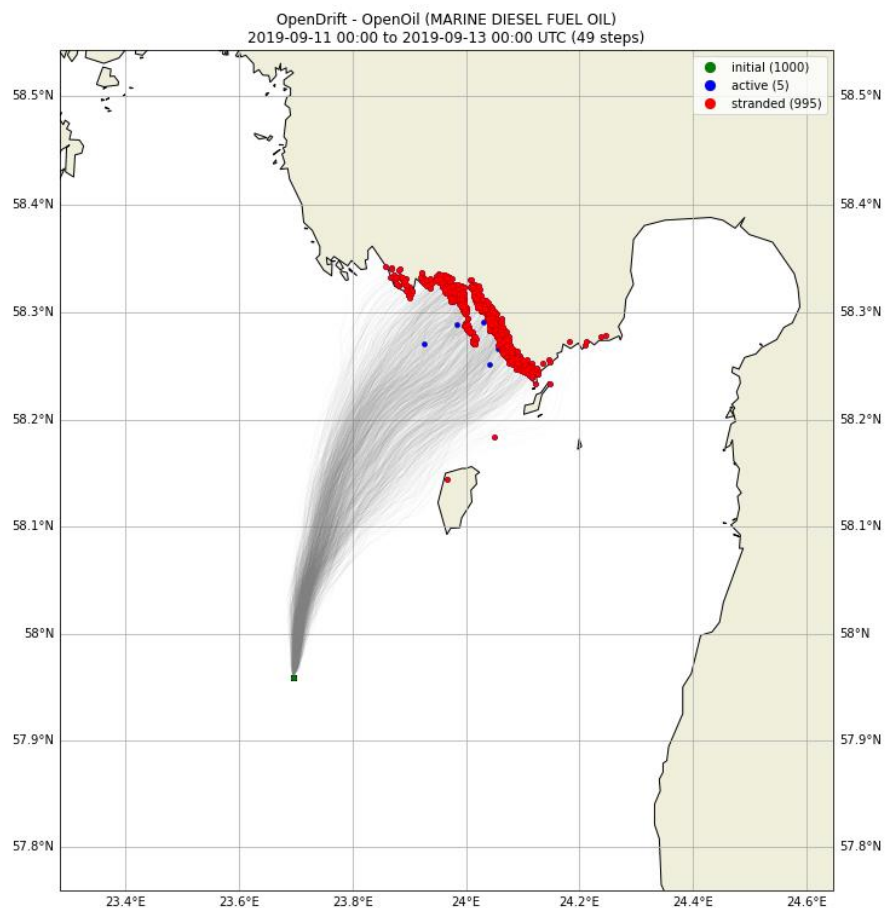


Joonis 4.6.1.7: Õlireostuse hoiu – ja kaitsealadele jõudmise tõenäosus kogu perioodi jooksul ja sesoonide kaupa. Parempoolsel joonisel on hoiu – ja kaitsealad vastavalt hele – ja tumepunaste aladega.

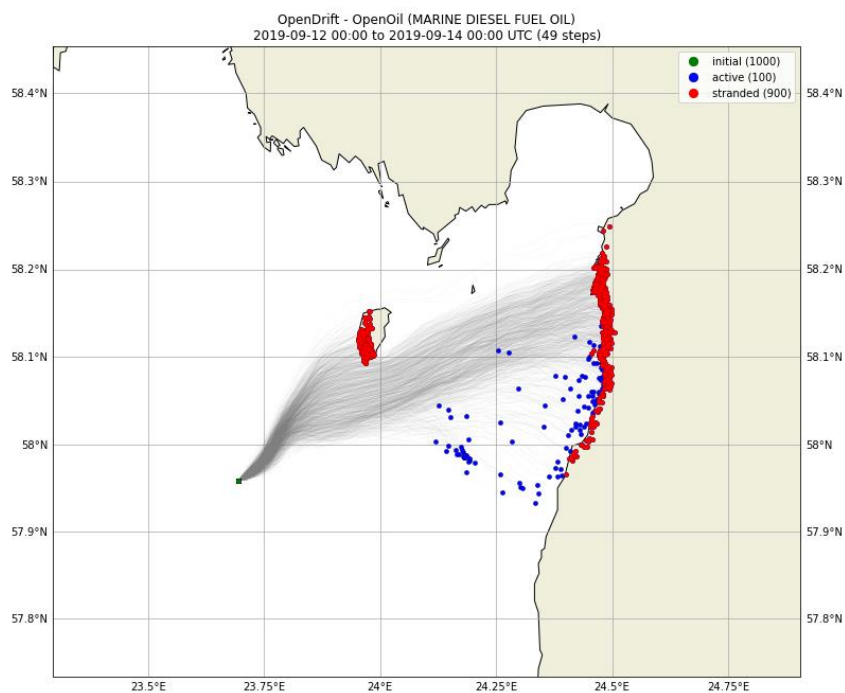
4.6.2. Õlireostuse stsenaariumid

Järgnevalt vaatleme kindlas asukohas ja ajas aset leidva reostuse levikut. Asukoha valikul on arvestatud TalTech Eesti Mereakadeemia eksperthinnangus välja toodud laevaliikluse kõrgeenenud õnnetusriskiga piirkondi. Õnnetuse ajastuse ja merre sattunud reostuse mahu osas valiti halvim võimalik stsenaarium. Valitud on perioodid, mil domineerisid läänetuuled, mis soodustasid reostuse kiiret levikut rannikule. Reostuseks defineeriti 10 m³ kütteõli. HELCOMi õlilaikude andmebaasi järgi on Liivi lahes avastatud kõige suurem laik olnud mahuga 2,25 m³. Vaatame kahte stsenaariumit: esimene levik algusega 2019-09-11 südaööl (edaspidi reostus 1) ja teine algusega 2019-09-12 südaööl (edaspidi reostus 2). Levikut modelleeriti kahe ööpäeva vältel. Lahti päästeti 1000 osakest, millest igaüks representeeris 0,01 m³ õli ning neile rakendusid erinevad õlile omased protsessid nagu hajumine ja aurustumine. Seega võis osakese esindatud õli ruumala/mass simulatsiooni jooksul muutuda.

Reostus 1 (joonis 4.6.2.1) levis alguspunkst põhja/kirde suunas ning enamik osakesi randusid Mandri-Eesti rannikul. Kihnu saarele jõudis väga vähe osakesi. 24 tundi hiljem lahti lastud reostus 2 (joonis 4.6.2.2) levis rohkem ida suunas ning suur hulk osakesi jõudis Kihnu saare ja alguspunkst idasse jääva mandri rannikule. Reostuse 1 korral jõudis õli esmakordselt rannikule 18 tunniga ning reostuse 2 korral 15 tunniga. Simulatsiooni lõpuks oli rannikule jõudnud vastavalt 0,0005 m³ ja 0,02 m³ õli. Sedavõrd väikese mahu randa jõudmist selgitab õli hajumine veesambasse ja aurustumine. Enamus õlist laguneb väikemateks tilkadeks ja hajub veesambas, kus õli enam tuvastada (veest eraldada) ei õnnestu. Mõlema reostuse korral hajus 10 tunniga umbes 80% õlist veesambasse ja aurustus umbes 14%. Simulatsiooni lõpuks oli reostuse 1 korral 8,65 m³ õli veesambasse hajunud ja 1,35 m³ õli aurustunud. Reostuse 2 korral oli veesambasse hajunud ja aurustunud vastavalt 8,64 m³ ja 1,34 m³ õli. See tähendab, et kuigi paljud virtuaalsed markerid triivivad randa (vt. joonis 4.6.2.1 ja 4.6.2.2) ei sisalda need olulisel määral õli. Kahe stsenaariumi omavaheline võrdlus näitab, et reostuse leviku suund sõltub konkreetsetel perioodil valitsevatest meteoroloogilistest tingimustest.



Joonis 4.6.2.1: Õlireostuse levik 48 tunni jooksul algusega 2019-09-11 00:00. Roheline marker näitab reostuse algasukohta, punased markerid randunud osakesi ja sinised pinnakihis olevaid osakesi.

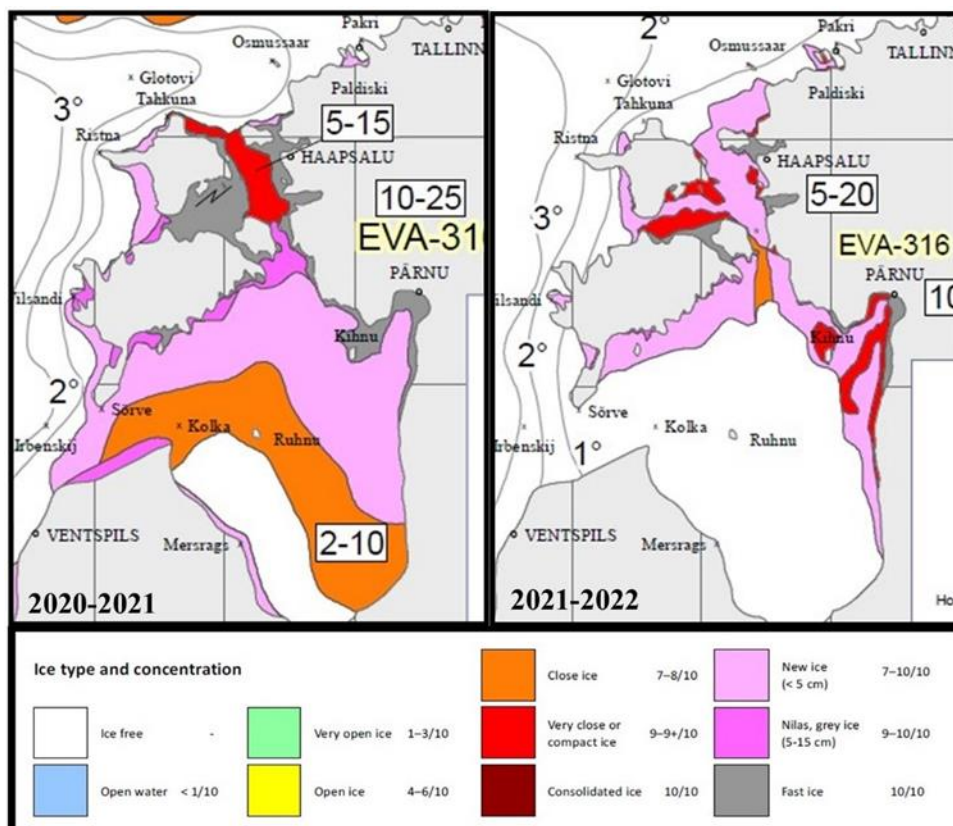


Joonis 4.6.2.2: Õlireostuse levik 48 tunni jooksul algusega 2019-09-12 00:00. Roheline marker näitab reostuse algasukohta, punased markerid randunud osakesi ja sinised pinnakihis olevaid osakesi.

4.7. Mõju jääoludele

Kuigi teaduskirjanduses on suurem enamus artikleid selle kohta kuidas jää mõjutab tuuleparke võime teha siiski teha põhjendatud järeldusi tuulikute mõjust jääle arvestades eelnevaid teadmisi Liivi lahe jääolude kohta (EU FP7 projekt „Talvise navigeerimise ohutus dünaamilises jões“, contract SCP8-GA-2009-233884 – SAFEWIN).

Meretuuleparkides asuvad tuulikud ja nendega seotud rajatised avaldavad mõju piirkonna tuuletingimustele, mille tõttu on mõjutatud ka jää teke ja akumulatsioon parkides. Tuulikud võivad avaldada mõju jää tekke ja sulamise protsessidele, kuna tuulikute endi soojenemine ja jahtumine välitingimuste mõjul, on teistsuguse kiirusega kui mereveel. Kevadiste tuulesündmuste ajal võib jää nõrgenemine tuulikute alal viia jäävälja kiirema purunemiseni. Liivi lahes esineb tuuleparkide alal peamiselt triivjää, kinnisjää piirkond on tavaliselt Pärnu laht. Jäärikastel talvedel võib kinnisjää esineda ka Kihnu saare ja mandri vahelisel alal (joonis 4.7.1). Jäävaestel talvedel esineb kinnisjää vaid rannalähedastel aladel (joonis 4.7.1.). Triivjää katab tavaliselt terve mereala peaaegu ühtlaselt jääga. Jää triiv tuleneb sellest, et kusagil kaldalähedastel aladel või laevateede lähedal eksisteerivad lahvanded, mis võimaldavad tuulel nende suunas jääd liigutada. Jää liikumise suund on mõjutatud tuule suunast - vaatluste põhjal liigub triivjää umbes paarkümmend kraadi tuulevektori suunast paremale. Tuuleparkidega seotud rajatised takistavad mingil määral jää vaba triivi - jää kas paindub ümber takistuse või puruneb osaliselt. Tuule mõjul surutakse purunenud jää rüsi jää kuhilateks või vallideks. Rüsi jää kuhilas jääväljast on umbes 9/10 vee all ja 1/10 pinnal. Veepinnast üles ja veepinna alla jäävate rüsi jää osade kõrguste suhe on 1:5 kuni 1:4. Tuule mõjul tekib rüsi jää kui tugev tuul saab pikal distantil jäävälja mõjutada kuni selle purunemiseni. Nii jäälõhkujate poolt hallatavad jääteed kui tuulepargi poolt jäävälja osaline lõhkumine tõenäoliselt kasvatavad rüsi jää teket. Tuulepargi konstruktsioonide tõttu jäävälja tekkivad kanalid ja rüsi jää võimaldavad piirkonnas tuule poolt jääsurutise teket, mis omakorda on laevaliiklust raskendav faktor (Lensu et al., 2013).



Joonis 4.7.1. Jäättingimused vastavalt maksimaalse jääulatuse kaartidele Liivi lahes talvel 2020-2021 (vasakul) ja 2021-2022 (paremal). Kaartidel näha olevad jäätüübid on: 1) *Fast ice* - kinnisjää; 2) *Nilas, grey ice* - 10-15 cm paksusega jää koorik, mis paindub lainetusega, aga ei murdu; 3) *New ice* – hiljuti külmunud vesi, mis ei ole veel päris kõva jää; 4) *Very close or compact ice* - jäätükkidest koosnev ala, kus jäätükid ei ole üksteise külge külmunud, aga nad on tihedalt üksteise vastas; 5) *Close ice* - jäätükkidest koosnev ala, kus jäätükid ei ole üksteise külge külmunud

(https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-conditions?41lwWJ2g4eC6q7wAZNe7q6_q=mode%253D2%2526lang%253Den)

Seega, turbiinide konstruktsioonid mõjutavad jäävälja struktuuri põhiliselt kahel moel: 1) Tuule ja hoovuse mõjul liikuvale piisavalt õhukesele jääle või jäätükkidest koosnevale triivjääle mõjub turbiini vundament jäämurdjana ja tuulealusel küljel tekivad jääkanalid, mis soodustavad tuulte mõjul rüsi jää kuhilate ja vallide teket, mis võivad oluliselt takistada laevaliiklust piirkonnas; 2) Kui külmumine kestab nii kaua, et jää on muutunud nii tugevaks (paksuks), et tuul ja hoovused ei suuda seda turbiini vundamendi vastu purustada tekib piirkonnas kinnisjää (Porathe, 2023). Kinnisjää stsenaarium võib laevaliiklusele olla lihtsam kui rüsi jää oma. See, mis stsenaarium parajasti realiseerub sõltub mitmetest teguritest, nagu näiteks negatiivse

õhutemperatuuri kestus, jääkate paksus, tuule kiirus, tuule suund ja arvatavasti ka turbiinide vundamendikonstruktsioonide arv merepinnaühikus.

Kasutatud kirjandus

- Aigars, J., Poikane, R., Dalsgaard, T., Eglite, E., Jansons, M., 2015. Biogeochemistry of N, P and SI in the Gulf of Riga surface sediments: Implications of seasonally changing factors. *Cont. Shelf Res.* 105, 112–120. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2015.06.008>
- Alari, V., Raudsepp, U., 2012. n. *J. Coast. Res.* 279, 143–148. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00054.1>
- Alari, V., Raudsepp, U., Kõuts, T., 2008. Wind wave measurements and modelling in Küdema Bay, Estonian Archipelago Sea. *J. Mar. Syst.* 74, S30–S40. <https://doi.org/10.1016/J.JMARSYS.2007.11.014>
- Bittig, H.C., Körtzinger, A., 2017. Technical note: Update on response times, in-air measurements, and in situ drift for oxygen optodes on profiling platforms. *Ocean Sci.* 13, 1–11.
- Bruggeman, J., Bolding, K., 2014. A general framework for aquatic biogeochemical models. *Environ. Model. Softw.* 61, 249–265. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2014.04.002>
- Canuto, V.M., Howard, A., Cheng, Y., Dubovikov, M.S., 2001. Ocean turbulence. Part I: One-point closure model-momentum and heat vertical diffusivities. *J. Phys. Oceanogr.* 31, 1413–1426. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<1413:OTPIOP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<1413:OTPIOP>2.0.CO;2)
- Carpenter, J.R., Merckelbach, L., Callies, U., Clark, S., Gaslikova, L., Baschek, B., 2016. Potential impacts of offshore wind farms on North Sea stratification. *PLoS One* 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160830>
- Christiansen, N., Carpenter, J.R., Daewel, U., Suzuki, N., Schrum, C., 2023. The large-scale impact of anthropogenic mixing by offshore wind turbine foundations in the shallow North Sea. *Front. Mar. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1178330>
- Christiansen, N., Daewel, U., Schrum, C., 2022. Tidal mitigation of offshore wind wake effects in coastal seas. *Front. Mar. Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1006647>
- Daewel, U., Akhtar, N., Christiansen, N., Schrum, C., 2022. Offshore wind farms are projected

- to impact primary production and bottom water deoxygenation in the North Sea. *Commun. Earth Environ.* 3. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00625-0>
- Dagestad, K.F., Röhrs, J., Breivik, O., Ådlandsvik, B., 2018. OpenDrift v1.0: A generic framework for trajectory modelling. *Geosci. Model Dev.* 11. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>
- Danielsson, Å., Carman, R., Rahm, L., Aigars, J., 1998. Spatial estimation of nutrient distributions in the Gulf of Riga sediments using Cokriging. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 46. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0295>
- Deyle, L., Badewien, T.H., Wurl, O., Meyerjürgens, J., 2024. Lagrangian surface drifter observations in the North Sea: an overview of high-resolution tidal dynamics and surface currents. *Earth Syst. Sci. Data* 16, 2099–2112. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/essd-16-2099-2024>
- Eesti Geoloogiateenistus, 2022. Projekt 17065 „Merepõhja setete keskkonnaseisundi hindamise meetoodika arendamine ja rakendamine“. Lõpparuanne.
- Fischereit, J., Larsén, X.G., Hahmann, A.N., 2022. Climatic Impacts of Wind-Wave-Wake Interactions in Offshore Wind Farms. *Front. Energy Res.* 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.881459>
- Floeter, J., van Beusekom, J.E.E., Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., Eberle, S., Eckhardt, A., Gloe, D., Hänselmann, K., Hufnagl, M., Janßen, S., Lenhart, H., Möller, K.O., North, R.P., Pohlmann, T., Riethmüller, R., Schulz, S., Spreizenbarth, S., Temming, A., Walter, B., Zielinski, O., Möllmann, C., 2017. Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Prog. Oceanogr.* 156. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.07.003>
- Fofonoff, N.P., Millard Jr, R.C., 1983. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater. UNESCO.
- Grashorn, S., Stanev, E. V., 2016. Kármán vortex and turbulent wake generation by wind park piles. *Ocean Dyn.* 66. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0995-2>
- HELCOM, 2023. Eutrophication. Thematic assessment 2016-2021. Third HELCOM holistic assessment of the Baltic Sea. *Balt. Sea Environ. Proc.* 192.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J.,

- Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G. De, Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P. de, Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/QJ.3803>
- Hofmeister, R., Burchard, H., Beckers, J.M., 2010. Non-uniform adaptive vertical grids for 3D numerical ocean models. *Ocean Model.* 33, 70–86. <https://doi.org/10.1016/J.OCEMOD.2009.12.003>
- Janssen, F., Schrum, C., Backhaus, J.O., 1999. A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschrift* 51, 5–245. <https://doi.org/10.1007/BF02933676>
- Kahru, M., Elmgren, R., Savchuk, O.P., 2016. Changing seasonality of the Baltic Sea. *Biogeosciences* 13, 1009–1018. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1009-2016>
- Klingbeil, K., Lemarié, F., Debreu, L., Burchard, H., 2018. The numerics of hydrostatic structured-grid coastal ocean models: State of the art and future perspectives. *Ocean Model.* 125, 80–105. <https://doi.org/10.1016/J.OCEMOD.2018.01.007>
- Kotta, J., Lauringson, V., Martin, G., Simm, M., Kotta, I., K, H., Ojaveer H, 2008. Chapter 10. Gulf of Riga and Pärnu Bay, in: *Ecology of Baltic Coastal Waters*. pp. 217–243.
- Lensu, M., Haapala, J., Lehtiranta, J., Eriksson, P., Kujala, P., Suominen, M., Mård, A., Vedenpää, L., Kõuts, T., Lilover, M.J., 2013. Forecasting of compressive ice conditions, in: *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC*.
- Liblik, T., Skudra, M., Lips, U., 2017. On the buoyant sub-surface salinity maxima in the Gulf of Riga. *Oceanologia* 59, 113–128. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2016.10.001>
- Liblik, T., Stoicescu, S.-T., Buschmann, F., Lilover, M.-J., Lips, U., 2023. High-resolution characterization of the development and decay of seasonal hypoxia in the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Front. Mar. Sci.* 10, 438. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2023.1119515>
- Liblik, T., Väli, G., Lips, I., Lilover, M.-J., Kikas, V., Laanemets, J., 2020. The winter

- stratification phenomenon and its consequences in the Gulf of Finland, Baltic Sea. *Ocean Sci.* 16, 1475–1490.
- Lilover, M.-J., Lips, U., Laanearu, J., Liljebladh, B., 1998. Flow regime in the Irbe Strait. *Aquat. Sci.* 60, 253. <https://doi.org/10.1007/s000270050040>
- Lips, U., Zhurbas, V., Skudra, M., Väli, G., 2016a. A numerical study of circulation in the Gulf of Riga, Baltic Sea. Part I: Whole-basin gyres and mean currents. *Cont. Shelf Res.* 112, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2015.11.008>
- Lips, U., Zhurbas, V., Skudra, M., Väli, G., 2016b. A numerical study of circulation in the Gulf of Riga, Baltic Sea. Part II: Mesoscale features and freshwater transport pathways. *Cont. Shelf Res.* 115, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.12.018>
- McCombs, M.P., Mulligan, R.P., Boegman, L., 2014. Offshore wind farm impacts on surface waves and circulation in Eastern Lake Ontario. *Coast. Eng.* 93, 32–39. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2014.08.001>
- Mensah, V., Le Menn, M., Morel, Y., 2009. Thermal Mass Correction for the Evaluation of Salinity. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 26, 665–672. <https://doi.org/10.1175/2008JTECHO612.1>
- Otsmann, M., Suursaar, Ü., Kullas, T., 2001. The oscillatory nature of the flows in the system of straits and small semienclosed basins of the Baltic Sea. *Cont. Shelf Res.* 21, 1577–1603. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00002-4](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00002-4)
- Paskyabi, M.B., 2015. Offshore Wind Farm Wake Effect on Stratification and Coastal Upwelling. *Energy Procedia* 80, 131–140. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.415>
- Porathe, T., 2023. Ice Navigation in Arctic Offshore Wind Parks: Traffic Coordination Using Route Exchange and Moving Havens †. *Eng. Proc.* 54. <https://doi.org/10.3390/ENC2023-15462>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2018.04.005>
- Raghukumar, K., Nelson, T., Jacox, M., Chartrand, C., Fiechter, J., Chang, G., Cheung, L., Roberts, J., 2023. Projected cross-shore changes in upwelling induced by offshore wind

- farm development along the California coast. *Commun. Earth Environ.* 4. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00780-y>
- Rennau, H., Schimmels, S., Burchard, H., 2012. On the effect of structure-induced resistance and mixing on inflows into the Baltic Sea: A numerical model study. *Coast. Eng.* 60, 53–68. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.08.002>
- Savchuk, O.P., 2002. Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: Scaling up field studies with a mathematical model. *J. Mar. Syst.* 32. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00039-8)
- Schmale, O., Krause, S., Holtermann, P., Power Guerra, N.C., Umlauf, L., 2016. Dense bottom gravity currents and their impact on pelagic methanotrophy at oxic/anoxic transition zones. *Geophys. Res. Lett.* 43, 5225–5232. <https://doi.org/10.1002/2016GL069032>
- Schönfeld, W., 1995. Numerical simulation of the dispersion of artificial radionuclides in the English Channel and the North Sea. *J. Mar. Syst.* 6. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(95\)00022-H](https://doi.org/10.1016/0924-7963(95)00022-H)
- Smagorinsky, J., 1963. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. *Mon. Weather Rev.* 91, 99. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091)
- Stipa, T., Tamminen, T., Seppälä, J., 1999. On the creation and maintenance of stratification in the Gulf of Riga. *J. Mar. Syst.* 23, 27–49. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00049-4)
- Stoicescu, S.T., Laanemets, J., Liblik, T., Skudra, M., Samlas, O., Lips, I., Lips, U., 2022. Causes of the extensive hypoxia in the Gulf of Riga in 2018. *Biogeosciences* 19, 2903–2920. <https://doi.org/10.5194/BG-19-2903-2022>
- Suhhova, I., Liblik, T., Lilover, M.-J., Lips, U., 2018. A descriptive analysis of the linkage between the vertical stratification and current oscillations in the Gulf of Finland. *Boreal Environ. Res.* 23, 83–103.
- Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M., Saaremäe, I., Kuik, J., Merilain, M., 2006. Cyclone Gudrun in January 2005 and modelling its hydrodynamic consequences in the Estonian coastal waters. *Boreal Environ. Res.* 11.
- Talpsepp, L., 2005. Coherent current oscillations and water exchange in the straits of the Gulf of Riga. *Oceanologia* 47, 115–127.

TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2007. Mõõdistustööd lainetuse parameetrite ja hoovuse režiimi hindamiseks madalike piirkonnas.

Tuomi, L., Kahma, K.K., Pettersson, H., 2010. Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic sea. *Boreal Environ. Res.* 16, 451–472.

Väli, G., Meier, H.E.M., Placke, M., Dieterich, C., 2019. River runoff forcing for ocean modeling within the Baltic Sea Model Intercomparison Project. *Meereswissenschaftliche Berichte* 113. <https://doi.org/http://doi.io-warnemuende.de/10.12754/msr-2019-0113>