



Hüdrodünaamika; veesamba füüsikaliste ja biogeokeemiliste  
parameetrite kumulatiivsete mõjude uuring Saare-Liivi  
meretuulepargi KMH raames

Tellijä: UTILITAS WIND OÜ

Versioon: 25.11.2024

## Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärk oli hinnata kolme tuulepargi arendusala kumulatiivseid mõjusid hüdrodünaamikale ning veesamba füüsikalistele ja biogeokeemilistele näitajatele. Töös käsitlesime Liivi lahe idaosas asuva kolme tuulepargi ala kumulatiivseid mõjusid: Saare-Liivi esialgne ala (arendaja Utilitas Wind, edaspidi ala 1), Saare-Liivi täiendav ala (arendaja Utilitas Wind, edaspidi ala 2) ja Liivi lahe tuulepark (arendaja Enefit Green, edaspidi ala 3).

Ala 1 ja ala 2 asuvad Kihnust läänes ja edelas ning ala 3 asub Kihnust lõunas (vt. joonis 1.1). Antud hinnangutes on arvestatud arendusalade varasemate konfiguratsioonidega. Mudelarvutustes käsitletakse 120 tuulikut alal 1, 50 tuulikut alal 2 ja 67 tuulikut alal 3. Eeldatakse, et paigaldatakse 15 MW tuulikut. Hiljem on selgunud, et alale 1 paigaldatakse maksimaalselt 80 tuulikut. See tähendab, et arenduste tegelik mõju on mõnevõrra väiksem, kui aruandes toodud numbrilised hinnangud näitavad.

Terve Liivi lahe mastaapi tsirkulatsioon ei muutu, kuid esinevad lokaalsed muutused hoovuste struktuuris. Tuulepargid mõjutavad hoovusvälju ka vastastikku, näiteks ala 3 kasutamisel langevad simulatsioonide põhjal hoovuskiirused alal 2. Teisisõnu, teatav mõju kumulatiivsuse mitmete parkide kasutusega hoovusväljadele tõenäoliselt kaasneb.

Suuremad muutused kaasneksid pinnakihi hoovuses. Tuuleparkide aladel pinnakihi hoovuskiirused langevad ja parke läbiv vee transport väheneb. Tuuleparkide servaaladel, eriti suvel, moodustuvad kompensatsiooniks tugevamad pinnahoovused. Seega, pinnakihi hoovuste kineetiline energia tuulepargi aladel pigem langeb ja tuuleparkide lähiümbruses pigem tõuseb. Talvisel perioodil pinnahoovused pargialadel samuti mõnevõrra aeglustuvad, kuid muutused tuuleparkide ümber on tagasihoidlikumad.

Muutused põhjakihi hoovustes on võrreldes pinnakihiiga väiksemad. Suvel jäävad muutused keskmiselt alla 1 cm/s. Talvel ulatuvad muutused põhjakihi keskmises hoovuskiiruses alal 1 ja alal 2 1 cm/s ligidale.

Võib järeldada, et lokaalselt on hoovused tuulepargialadel ja lähiümbruses mõjutatud ning mõju on intensiivsem kui rajatakse mitu tuuleparki. Liivi lahe üldtsirkulatsiooni pargid märkimisväärselt ei mõjuta.

Mitme tuulepargi koosmõjul kaasneb väike kumulatiivne mõju laineväljale. Kumulatiivne mõju lainetusele on suurim loode-kagu sihis puhuvate tuultega kiirusega 7-10 m/s. Nende tuultega

jõuab mõju alalt 3 aladeni 1 ja 2 ning vastupidi. Selliseid tuuli esineb piirkonnas ligikaudu 7% ajast. Kumulatiivne mõju lainetusele kaasneb muuhulgas ka ala 3 ning alade 1 ja 2 vahele jäävas piirkonnas. Ainult ühe arendaja tuulepargi puhul esineb mõju selles piirkonnas kas loode- või kagutuultega. Mõlema tuulepargi olemasolul esineb mõju nii kagu- kui loodetuultega. Kihnu rannikul võib keskmine laine kõrgus väheneda kolme pargi olemasolul 1-2 cm. Väheldane kumulatiivne mõju võib esineda lääne- ja loodekaarte tuultega ka Häädemeeste-Ikla-Ainaži rannikul. Keskmine mõju laine kõrgusele jääb seal tagasihoidlikuks ja jääb alla 1 cm. Tuuleparkide sees väheneb oluline lainekõrgus kõigi kolme arendusala eksisteerimisel keskmiselt 4-6%. Lainekliimat mõjutavate looduslike tegurite varieerumine on tunduvalt suurem, kui tuulepargi mõju. Liivi lahte tervikuna silmas pidades on mõju tagasihoidlik.

Soolsuse basseinimastaapi jaotust Liivi lahes tuulepargid ei muuda. Lokaalne mõju tuuleparkide läheduses on tuvastatav. Soolsus tuulepargialade piirkonnas väheneb ning see muutus on intensiivseim kõigi alade olemasolul.

Soolsuse muutused on tugevamad stratifitseeritud tingimustes. Stratifitseeritud perioodil pinnakihi soolsus tuuleparkide piirkondades pigem kahaneb, kuid tuuleparkide lähiümbruses pigem kasvab. Võib arvata, et sellised suundumused on seotud nõrgema transpordiga tuulepargi aladel ja kompensatsiooniks moodustuvate tugevamate hoovustega tuulepargi ümbruses, mis toovad sinna soolasemat vett. Ka vertikaalse segunemise vähenemine võib mingil määral panustada pinnakihi soolsuse vähenemisse. Sarnaselt pinnakihiga väheneb veidi ka põhjakihi soolsus tuuleparkide alal suvisel ajal. Seevastu tuuleparkidest edelas, sügavamal alal, kust peaks toimuma soolasema vee transport tuuleparkide piirkonda, soolsus suureneb. Talvisel perioodil on soolsuse muutuste mustrid väga varieeruvad, aga üldine tendents on sarnane stratifitseeritud perioodile, st. pargialadel pigem soolsus veidi väheneb ning pargist eemal veidi kasvab.

Võrreldes soolsuse sesoonse ja lühiajalise muutlikkusega olemasolevas olukorras, on tuuleparkide mõju tagasihoidlik ja piirdub kuni 10% eelmainitud muutlikkusest.

Segunenud kihi paksus tuulepargi aladel väheneb ning see muutus on suurim, kui rajatakse kõik kolm tuuleparki. Kolme tuulepargi koostoimel moodustub Kihnust lõunas ja edelas ala, kus segunenud kihi paksus väheneb. Pargialadest kaugemal, edelas ja lõunas segunenud kihi paksus suureneb. Viimast võib selgitada konvergentsi tsooni tekkega. Kui domineerivas voolamise suunas on hoovus parkide poolt aeglustatud, siis takistuse ette tekib konvergentsi tsoon.

Segunenud kihi paksuse vähenemine alal leiab aset hilistalvisel ja kevadisel perioodil, mõnevõrra ka suvel.

Tuulepargid biogeokeemiliste parameetrite (toitained, üldained, klorofüll, hapnikusisaldus) basseinimastaapi jaotuseid Liivi lahes ei muuda. Mõnevõrra suureneb tuuleparkide piirkonnas pinnakihi klorofüllisaldus hilistalvel ja varakevadel ning suvel. Veidi võib varasemaks muutuda kevadõitseng. Mõju hüppelist kasvu klorofüllisaldusele tuuleparkide lisandudes ei tuvastatud.

Tuuleparkide aladel ning tuulepargi aladest edelas ja läänes väheneb juulist septembrini põhjalähedase kihi hapniku sisaldus. Hapniku vähenemisega ( $>0.3$  ml/l) mõjutatud piirkonna pindala suureneb hüppeliselt, kui lisada piirkonda kolmas tuulepark (ala 3).

Isegi kui heljumi tekitavad tööd toimuvad mitmel alal samaaegselt, siis aladelt pärit heljum ruumis samaaegselt veesambas arvestataval määral ei akumulereeru. Liivi lahes tervikuna leiab kahe või kolme tuulepargi rajamisel (võrreldes ühe pargi rajamisega) aset heljumi teke ja veesamba läbipaistvuse vähenemine suuremal alal.

Samuti leiab looduslikku fooni ületav settimine aset suuremal alal, kui tuuleparke rajatakse rohkem kui üks. Vähesel määral võib ruumis akumulereuda alal 1 ja alal 2 tekkiva heljumi settimine. Alal 3 tekkiva heljumi kumulatiivne settimine aladelt 1 ja 2 pärit materjaliga on väga väike.

Kokkuvõttes, mitmete tuuleparkide ehitamisel ja kasutamisel suureneb mõju vähemalt proportsionaalselt tegevuste mahtudega: ehitusaegse mõju puhul tekitatud heljumi hulga võrra ja kasutusaegse mõju puhul tuulikute arvu võrra. Heljum veesambas kumulatiivselt erinevatelt arendusaladelt ei koondunud ning ka erialadelt pärit heljumi kumulatiivne settimine ühte piirkonda on tagasihoidlik. Mõju lainetusele on kumulatiivne üksnes teatud tuulesuundadega. Parkide mõju hoovustele on kumulatiivne. Ühe pargi tuulikud võivad mõjutada hoovuseid teise pargi alal. Hoovused pargialadel muutuvad nõrgemaks, kuid tugevnevad parkide servas. Mõju veesamba omadustele on samuti kumulatiivne. Soolsus tuuleparkide piirkonnas langeb ja tõuseb äärealadel. Segunenud kihi paksus väheneb Kihnust läänes ja lõunas, kuid kasvab parkidest edelas, avamere suunas. Segunenud kihi paksuse vähenemine kevadel Kihnust läänes ja lõunas võib esile kutsuda mõnevõrra varasema kevadõitsengu. Juulist septembrini vähenevad veidi põhjakihi hapnikusisaldused. Hapniku vähenemisega ( $>0.3$  ml/l) mõjutatud piirkonna pindala suureneb hüppeliselt, kui lisada piirkonda kolmas tuulepark. Erialadelt pärit heljumi ja selle settimise ruumis akumulereerumine on marginaalne.



Verifitseerimaks antud töös toodud hinnanguid kumulatiivsete mõjude osas on vajalik teostada seiret Tallinna Tehnikaülikool (2024) soovitatud mahus esimese tuulepargi rajamisest alates.

# Sisukord

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Kokkuvõte .....                                         | 2  |
| Sisukord.....                                           | 6  |
| 1. Taust.....                                           | 7  |
| 2. Sisendid ja metoodika .....                          | 10 |
| 2.1. Lainetus .....                                     | 10 |
| 2.2. Hoovused ja veesamba füüsikalised parameetrid..... | 11 |
| 2.3. Veesamba biogeokeemilised parameetrid .....        | 12 |
| 3. Tulemused .....                                      | 14 |
| 3.1. Hoovused ja tsirkulatsioon .....                   | 14 |
| 3.2. Lainetus .....                                     | 38 |
| 3.3. Veesamba füüsikalised parameetrid.....             | 48 |
| 3.4. Veesamba biogeokeemilised parameetrid .....        | 68 |
| 3.5. Heljumi levik.....                                 | 80 |
| 4. Kasutatud kirjandus.....                             | 86 |

# 1. Taust

Käesolev töö on koostatud Utilitase arendatava Saare-Liivi meretuulepargi KMH (keskkonnamõju hindamise) raames. Töö täiendab TTÜ tehtud põhiaruannet (Tallinna Tehnikaülikool, 2024) kumulatiivsete mõjude osas hüdrodünaamikale ning veesamba füüsikalistele ja biogeokeemilistele näitajatele. KMH protsess on peale Utilitase Wind OÜ arendusalal alustatud ka Enefit Greeni arendusalal. Töös käsitlesime Liivi lahe idaosas asuva kolme tuulepargi ala kumulatiivseid mõjusid: Saare-Liivi esialgne ala (arendaja Utilitas Wind, edaspidi ala 1), Saare-Liivi täiendav ala (arendaja Utilitas Wind, edaspidi ala 2) ja Liivi lahe tuulepark (arendaja Enefit Green, edaspidi ala 3). Alad 1 ja 2 asuvad Kihnust läänes, edelas ja ala 3 asub Kihnust lõunas (vt. Joonis 1.1). Arendusalade tuulikute arv ja paigutus on KMH protsesside käigus muutunud. Tuulikute arvu on vähendatud. Näiteks ei planeerita tuulikuid enam ala 1 põhjapoolsesse piirkonda. Kokku on alale 1 planeeritud praeguse seisuga 80 tuulikut. Antud aruandes on arvestatud arendusalade varasemate konfiguratsioonidega. See tähendab, et arenduste tegelik mõju on mõnevõrra väiksem. Mudelarvutustes käsitletakse 120 tuulikut alal 1, 50 alal 2 ja 67 tuulikut alal 3. Eeldatakse, et paigaldatakse 15 MW tuulikut. Käsitleme aruandes kolme arendusala kogumõju.

Enam kui ühel arendusalal toimuva tegevuse osas eeldame ja analüüsime kahesugust potentsiaalset kumulatiivset mõju: 1) enam kui ühe arendusala tegevus mõjutab teatud piirkonda; 2) sarnane mõju avaldub suuremal alal.

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., 2016; Tallinna Tehnikaülikool, 2024). Hoovused uurimispiirkonnas on suhteliselt nõrgad. Hoovuste ajalis-ruumiline muutlikkus on paljuski seotud tuuletingimustega. Suurem tuulepinge ja selle poolt tekitatud veetaseme gradiendid põhjustavad tugevamaid hoovuseid.

Lainetuse ajalis-ruumiline muutlikkus sõltub otseselt tuule kiirusest ja suunast. Ekstreemsetes tormides võib oluline laine kõrgus ulatuda üle 5 m . Seda kinnitavad ka Copernicuse mereteenuse mudelprodukti andmed (<https://doi.org/10.48670/moi-00014>), mille põhjal on

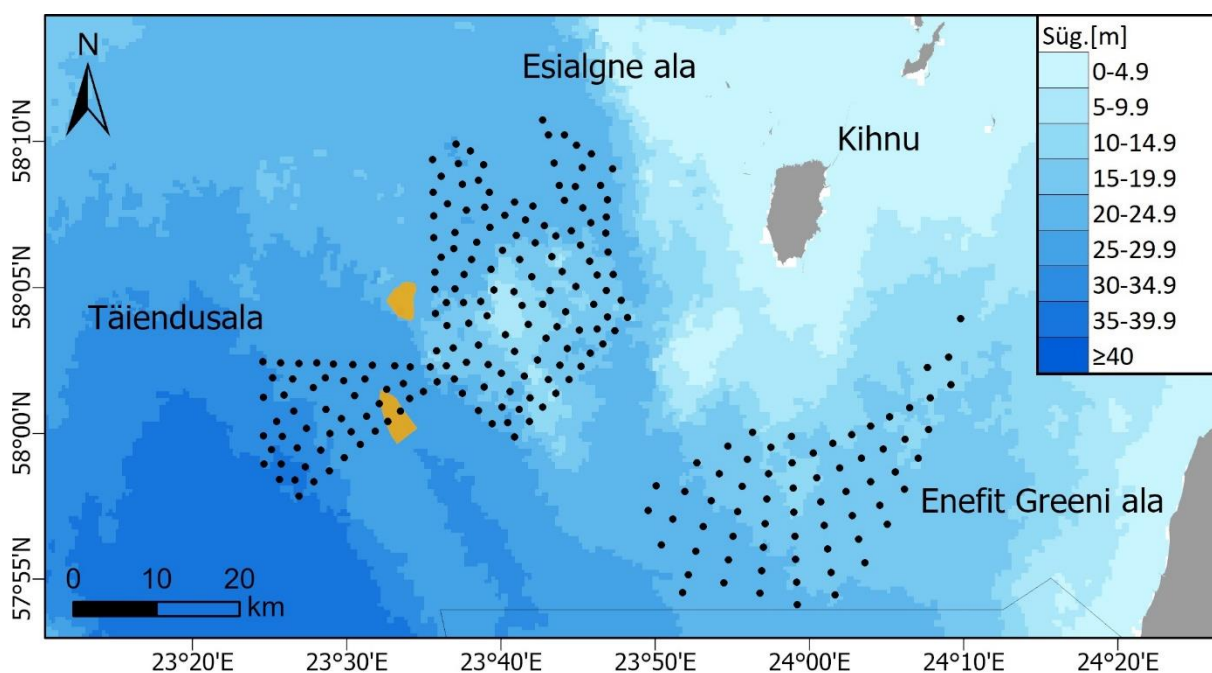
aastatel 1993-2022 olnud neli tormi, milles on oluline laine kõrgus piirkonnas olnud 5 m kandis või veidi enamgi.

Madalad väinad takistavad Läänemere avaosa süvakihi veemassi levikut Liivi lahte ja nii ei ole siin püsivat stratifikatsiooni. Liivi lahe veesammas seguneb talviti põhjani. 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. Süvakihi iseloomulikud tingimused, sh. tugevam hapnikupuudujääk esinevad tõenäoliselt arendusala sügavamas piirkonnas, alal 2.

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 hapnikuvaestes tingimustes (Aigars et al., 2015; Stoicescu et al., 2022).

Info dubleerimise vältimise eesmärgil ei ole antud aruandes toodud piirkonda kirjeldavat mõõtmisandmestikku ja valideerimisinfot. See materjal on toodud põhjaruandes (Tallinna Tehnikaülikool, 2024).

Töö teostasid TTÜ merefüüsika osakonna töötajad, projekti juhtis Taavi Liblik.

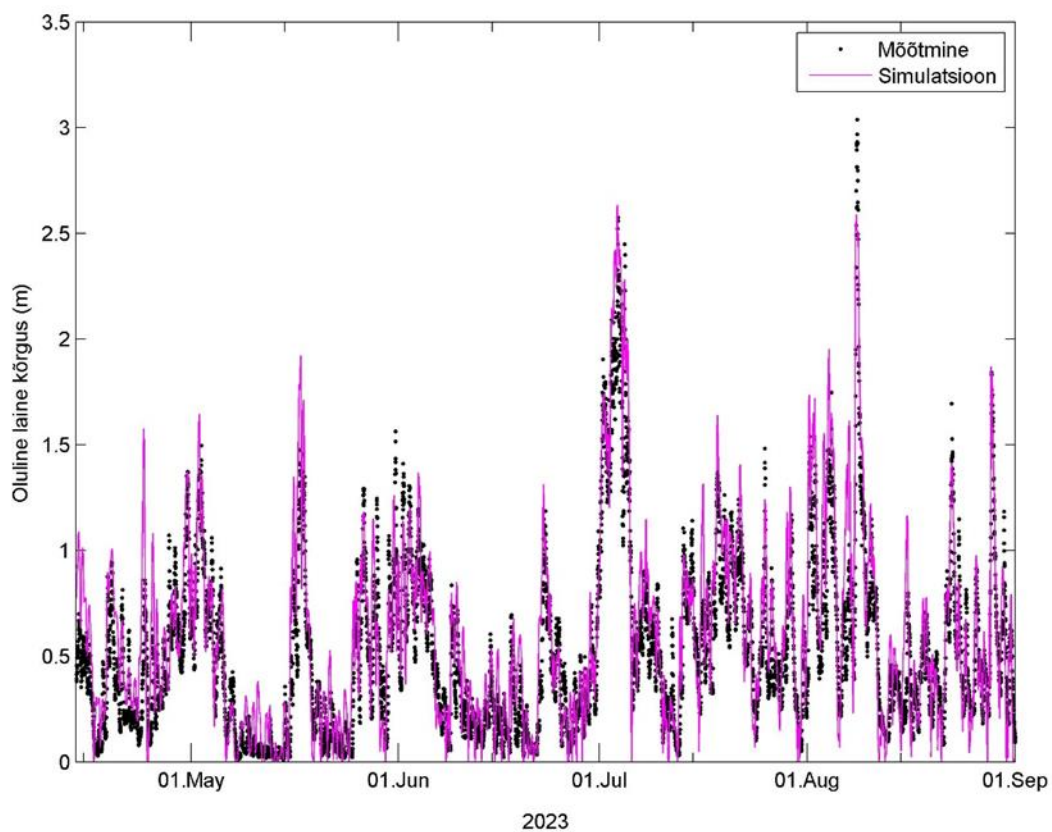


Joonis 1.1. Utilitase Saare-Liivi meretuulepargi esialgne- ja täiendusala (ala 1 ja ala 2) ning Enefit Greeni Liivi lahe meretuulepark (ala 3). Värviga on märgitud Saare-Liivi kaadamisala alternatiivi asukoht.

## 2. Sisendid ja metoodika

### 2.1. Lainetus

Lainetuse modelleerimiseks kasutasime numbrilist mudelit SWAN. Tuulikute mõju lainetusele modelleeritakse erinevate tuule kiiruste ja suundade jaoks. Tuulikud vähendavad piirkonnas tuule kiirust ja seetõttu 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). 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 2.1.1).



Joonis 2.1.1. Mõõdetud ja simuleeritud oluline laine kõrgus jaamas KW.

## 2.2. Hoovused ja veesamba füüsikalised parameetrid

Käesolevas uuringus on Liivi lahe tsirkulatsiooni modelleerimiseks kasutatud kolmemõõtmelist hüdrodünaamika mudelit GETM (General Estuarine Circulation Model), 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) parametriseringut (segunemise tugevus sõltub kiirusvälja horisontaalsetest gradientidest) ning vertikaalse segunemise arvutamiseks kasutatakse GOTM (General Ocean Turbulence Model )

modelit. Täpsemalt on arvutustes kasutusel kahel võrrandil põhinev k-e 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.

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.

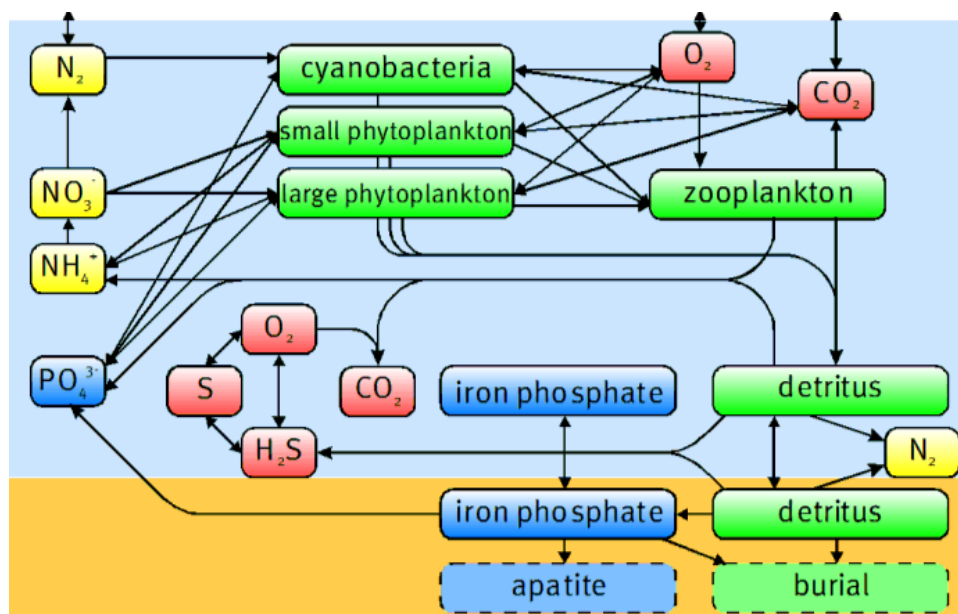
Liivi lahe tsirkulatsiooni täpsemaks modelleerimiseks kasutatakse horisontaalset lahutust 250 m kogu lahe ulatuses (joonis 2.4.2), kusjuures rajatingimused basseini lääne- ja põhjaossa võetakse eelpool kirjeldatud madala lahutusega mudelarvutustest.

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 km<sup>2</sup> alal; võib vertikaalne segunemine ja seda kirjeldav segunemiskoeffitsient suureneda 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 stsenaariumide hindamisel postide asukohtades suurendatud vertikaalse segunemisega seotud parameetreid 10%.

## 2.3. Veesamba biogeokeemilised parameetrid



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 ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ) 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 toitaineteks Redfieldi suhte järgi ning settib ka põhja. Hapnikutingimuste jälgimiseks on mudelis nii hapnik kui ka vesiniksulfaat  $\text{H}_2\text{S}$ , 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 2.3.1. ERGOM mudeli skeem. Allikas [www.ergom.net](http://www.ergom.net)

## 3. Tulemused

### 3.1. Hoovused ja tsirkulatsioon

Joonisel 3.1.1 on toodud keskmine pinnakihi tsirkulatsioon (hoovuse kiirus ja suund) ning joonistel 3.1.2 kuni 3.1.3 sama suvise ja talvise perioodi jaoks. Pinnakihi kineetilise energia ruumiline jaotus kogu perioodi ja erinevate sesoonide jaoks on toodud joonistel 3.1.4 kuni 3.1.6. Joonistel on toodud jaotused nelja stsenaariumi jaoks: olemasolev olukord (A0); tuulikud on paigaldatud alale 1 (E1); tuulikud on paigaldatud aladele 1 ja 2 (E1+L1); tuulikud on paigaldatud aladele 1, 2 ja 3 (E1+L1+EG1).

Üldiselt on pinnakihi keskmine hoovus kiirus Liivi lahes suurem basseini lääneosas ning madalam basseini ida- ja lõunaosas. Erandiks on Daugava jõevoolest mõjutatud kitsas riba piki idarannikut, kus keskmine hoovuse kiirus kõigi vaadeldud stsenaariumi ehk hetkeolukorra ning tuuleparkide erinevate konfiguratsioonide korral ületab 10 cm/s. Basseini edelaosas, piki läänerannikut ja Irbe väinas ületab keskmine hoovuse kiirus samuti 10 cm/s. Tuuleparkide piirkonnas, eriti alal 1, tekib parkide kasutuse ajal nõrgema pinnahoovusega tsoon, kuid keskmise tsirkulatsiooni lahe-mastaapi üldine skeem jääb samaks.

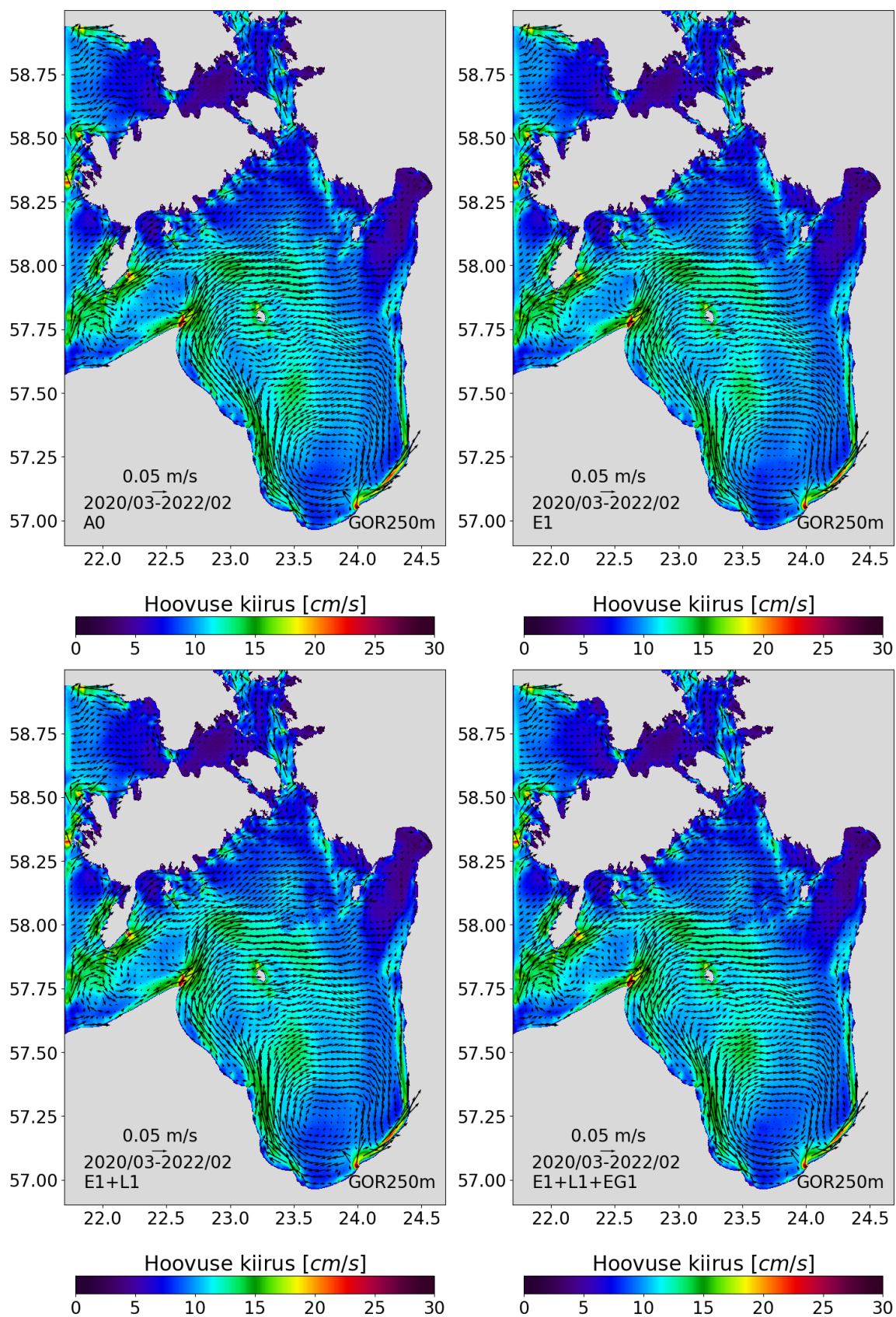
Suvisel perioodil esineb lahe pinnakihis tugev antitsükloonaalne voolamine, mis on tugev läänerannikul. Kagurannikul toimub kitsal alal üldise tsirkulatsiooniga vastassuunas voolamine. Analooget tsirkulatsioonimustrit Liivi lahes on näidanud ka (Lips et al., 2016). Kirjeldatud pinnatsirkulatsiooni suvist üldskeemi tuuleparkide kasutamine ei muuda. Lokaalsed muutused Kihnust läänes ja loodes (E1 ja E1+L1 puhul) ning ka Kihnust lõunas (E1+L1+EG1) on eristatavad. Alal 1 kiirused veidi vähenevad ja tekib tugevama voolu muster alast 1 põhjas. Tekkiv antitsükloonaalne keskmise voolamise struktuur on veelgi tugevamalt näha E1+L1 puhul. E1+L1+G1 puhul tekib lisaks alale 3 nõrga keskmise voolamisega piirkond. Alal 3 on keskmine hoovus nõrk ka olemasoleva olukorra puhul, kuid see süveneb parkide rajamise korral.

Talvisel perioodil esineb pinnakihis keskmine voolamine nii ida- kui läänerannikul põhja suunas. Lahe keskel domineerib keskmine hoovus itta, kirdesse ja põhja, mis tekitab konvergentsi tsooni lahe põhjaosasse ja omakorda transpordi Liivi lahest läbi Suure väina põhjasuunas. Kirde- ja põhjasuunaline hoovus domineerib ka tuulepargi aladel. Lahe talvises pinnakihi üldtsirkulatsioonis muutust ei kaasne, kuid on näha, et pargialadel hoovus aeglustub.

Pinnakihi keskmise kogu kineetilise energia jaotus on sarnane keskmise hoovuse kiiruse jaotusega. Kineetilise energia väärtused ületavad kohati  $200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ . Lahe kaguosas eristub selgelt Daugava väljavoolu mõju. Suhteliselt madalad kineetilise energia väärtused esinevad Pärnu lahes ning ka tuuleparkide ala ei ole kõrge kineetilise energiaga piirkond.

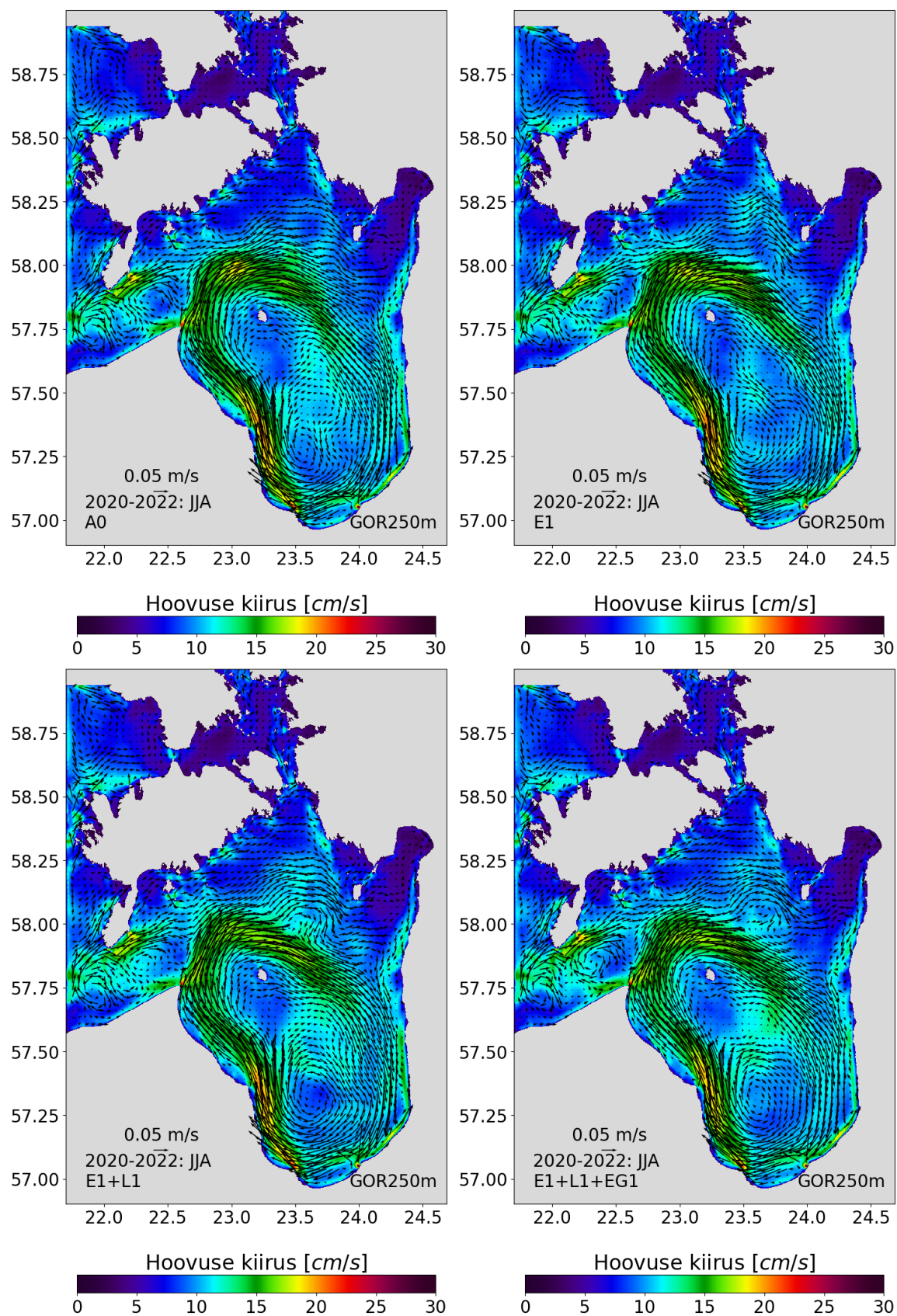
Suvel on pinnakihi kineetilise energia maksimum suurel alal Ruhnust ida-, põhja- ja läänekaares. Samuti esineb kineetilise energia maksimum Irbe väinas Sõrve poolsaarest lõunas, Jurmalast piki rannikut põhjas ja kitsas rannalähedases tsoonis Daugava suudmest idas. Talvel domineerivad enam barotroopsed hoovused ja kitsas tsoonis Daugava suudmest idas on energia võrreldes suvega veelgi kõrgem. Samuti on tugevama hoovusega piirkonnad Ruhnu ümbruses ja Kolka nina piirkonnas. Tunduvalt tugevamad pinnahoovused esinevad talvel võrreldes suvega Suures väinas. Kõigi kolme pargi kasutusega kaasneb kineetilise energia vähenemine parkide aladel (joonis 3.1.5). Suvel suureneb kineetiline energia alast 1 põhjas. Alade 2 ja 3 lisandudes kaasneb teatud kineetilise energia kasv ka nende alade ümbruses. Parkidest kaugemal arvestatavat mõju kineetilise energia jaotusele ei kaasne.

Joonistel 3.1.7 kuni 3.1.12 on toodud põhjakihi keskmine hoovuse kiirus ja kineetiline energia koos sesoonide keskmistega erinevate stsenaariumide korral. Tugevamad põhjakihi hoovused esinevad Irbe väinas ja mõningatel madalatel rannikualadel. Põhjakihi hoovused on tugevamad talvel. Tuulepargialade piirkonnas on põhjakihi hoovused suvel väga nõrgad, talvel veidi tugevamad. Suvisel perioodil puudub põhjakihi hoovustel tuuleparkide aladel selgelt prevallieriv suund ja parkide kasutuse käigus see olukord ei muutu. Talvisel perioodil teatud muutused tuuleparkide lähistel aset leiavad, kuid talvist põhjakihi üldtsirkulatsiooni tuuleparkide rajamine arvestataval määral ei muuda.

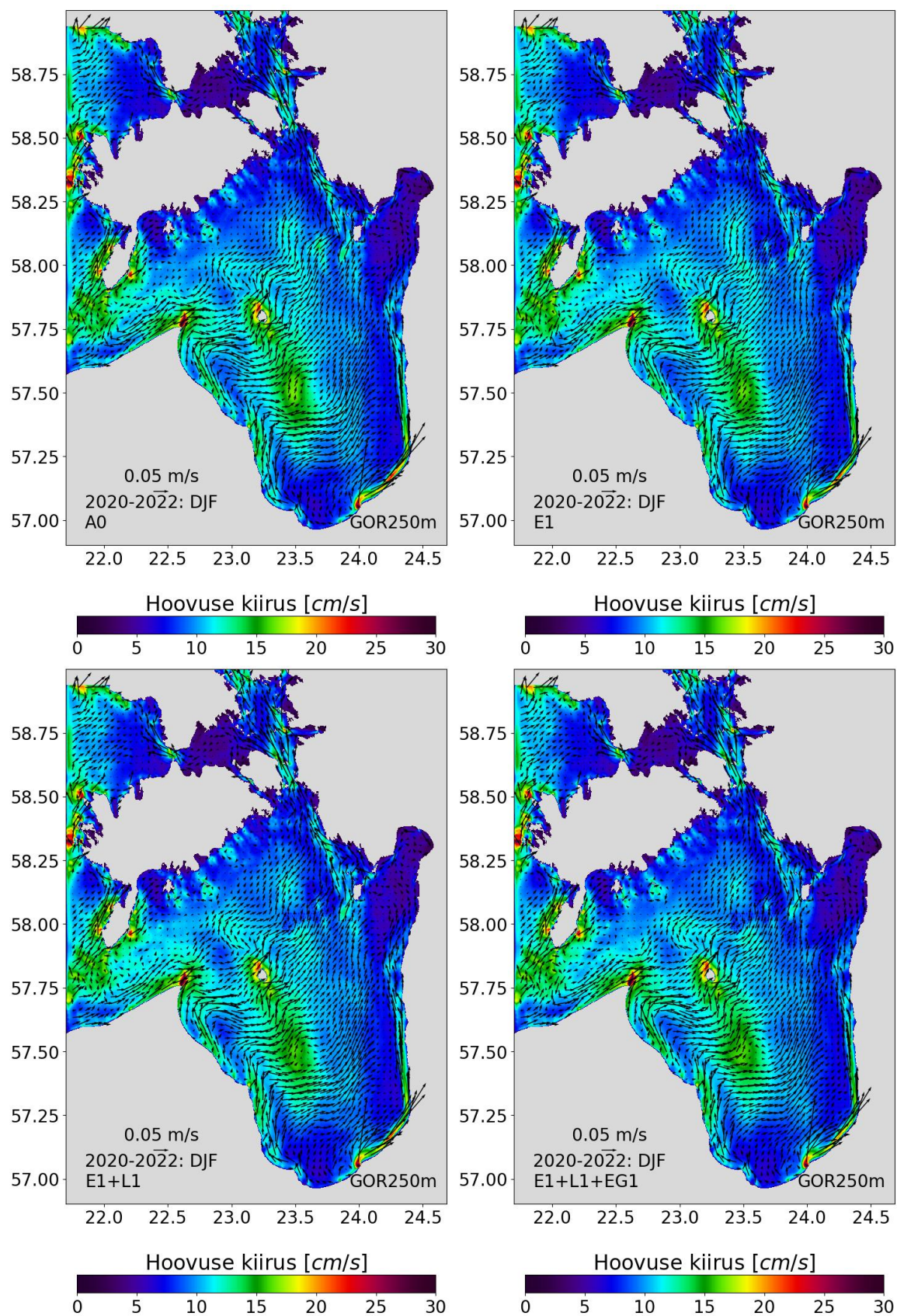


Joonis 3.1.1: Keskmine pinnakihi hoovus Liivi lahes perioodil 2020/03 kuni 2022/02 nelja stsenaariumi korral.



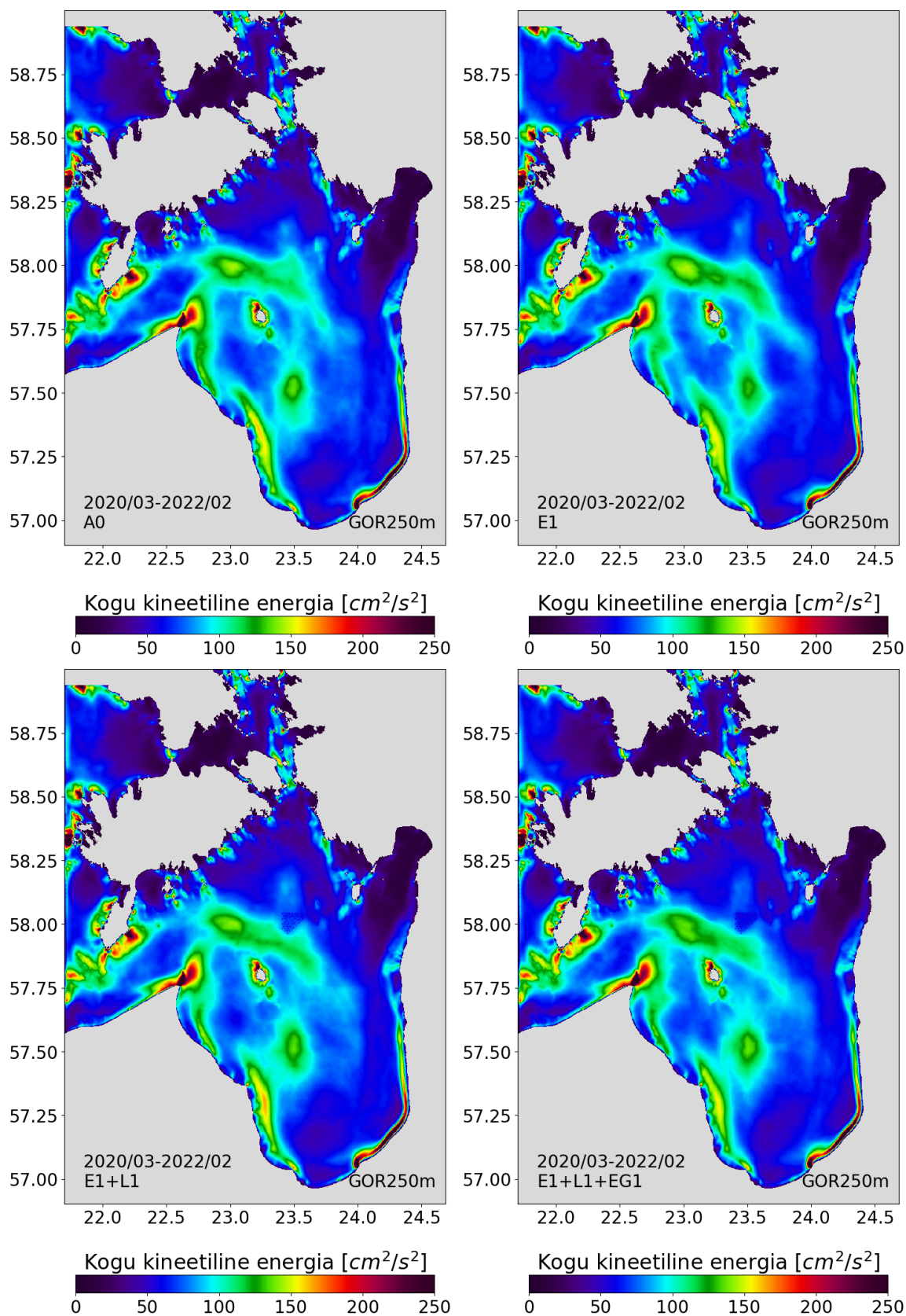


Joonis 3.1.2: Keskmine pinnakihi hoovus Liivi lahes suvisel perioodil (juuni-august) nelja stsenaariumi korral.

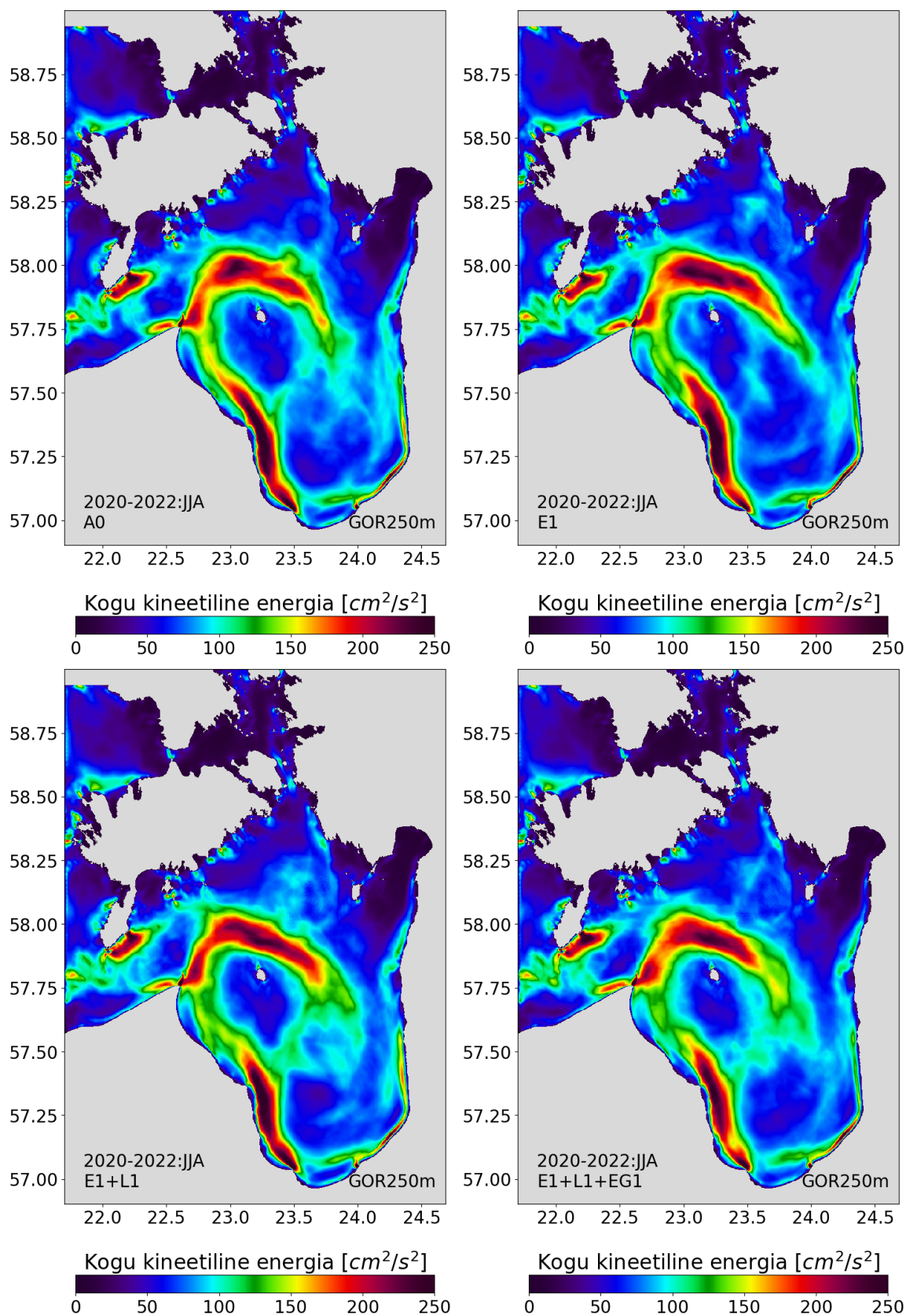


Joonis 3.1.3: Keskmine pinnakihi hoovus Liivi lahes talvisel perioodil (detsember-veebruar) nelja stsenaariumi korral.



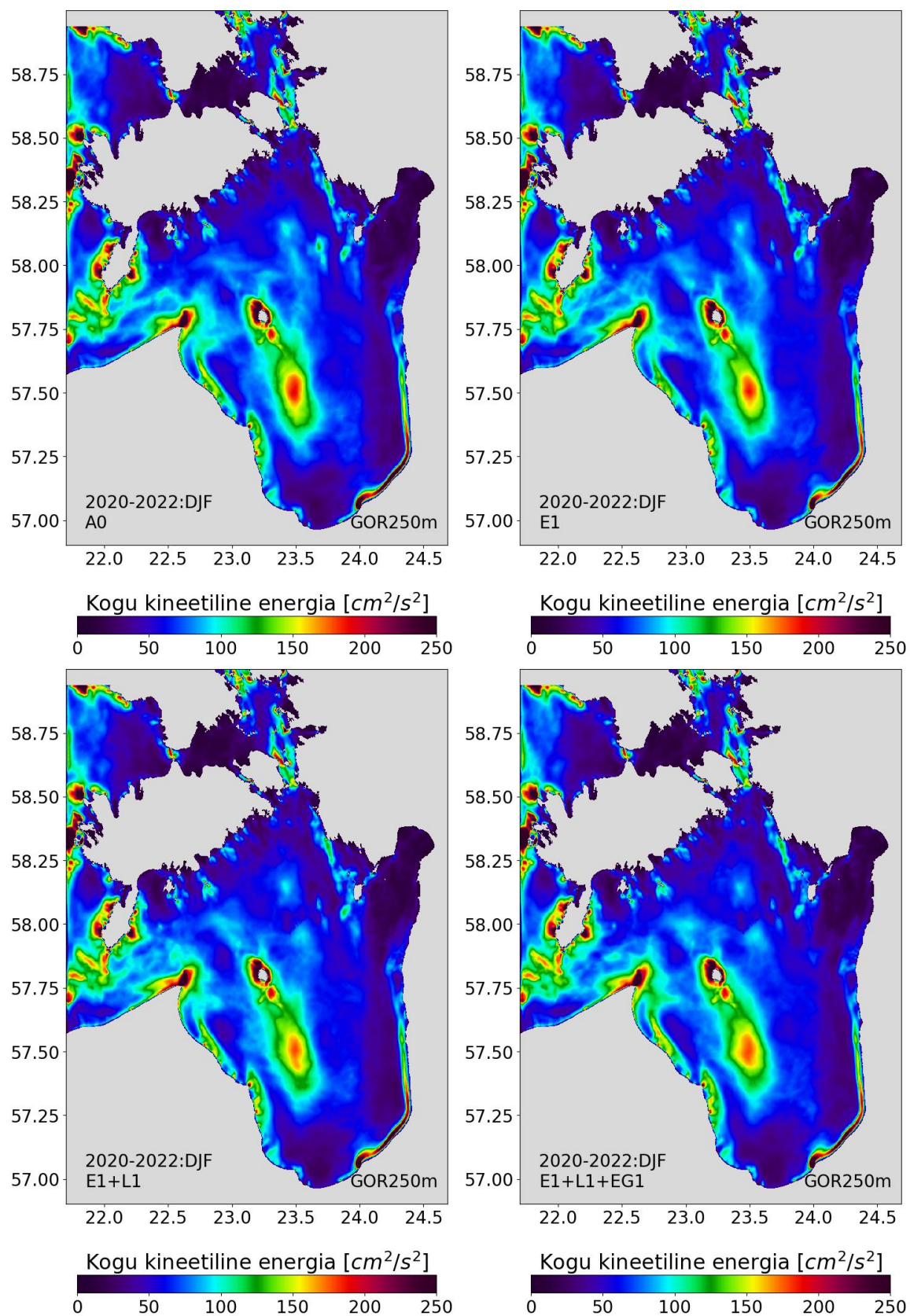


Joonis 3.1.4: Keskmine pinnakihi kineetiline energia Liivi lahes perioodil 2020/03 kuni 2022/02 nelja stsenaariumi korral.

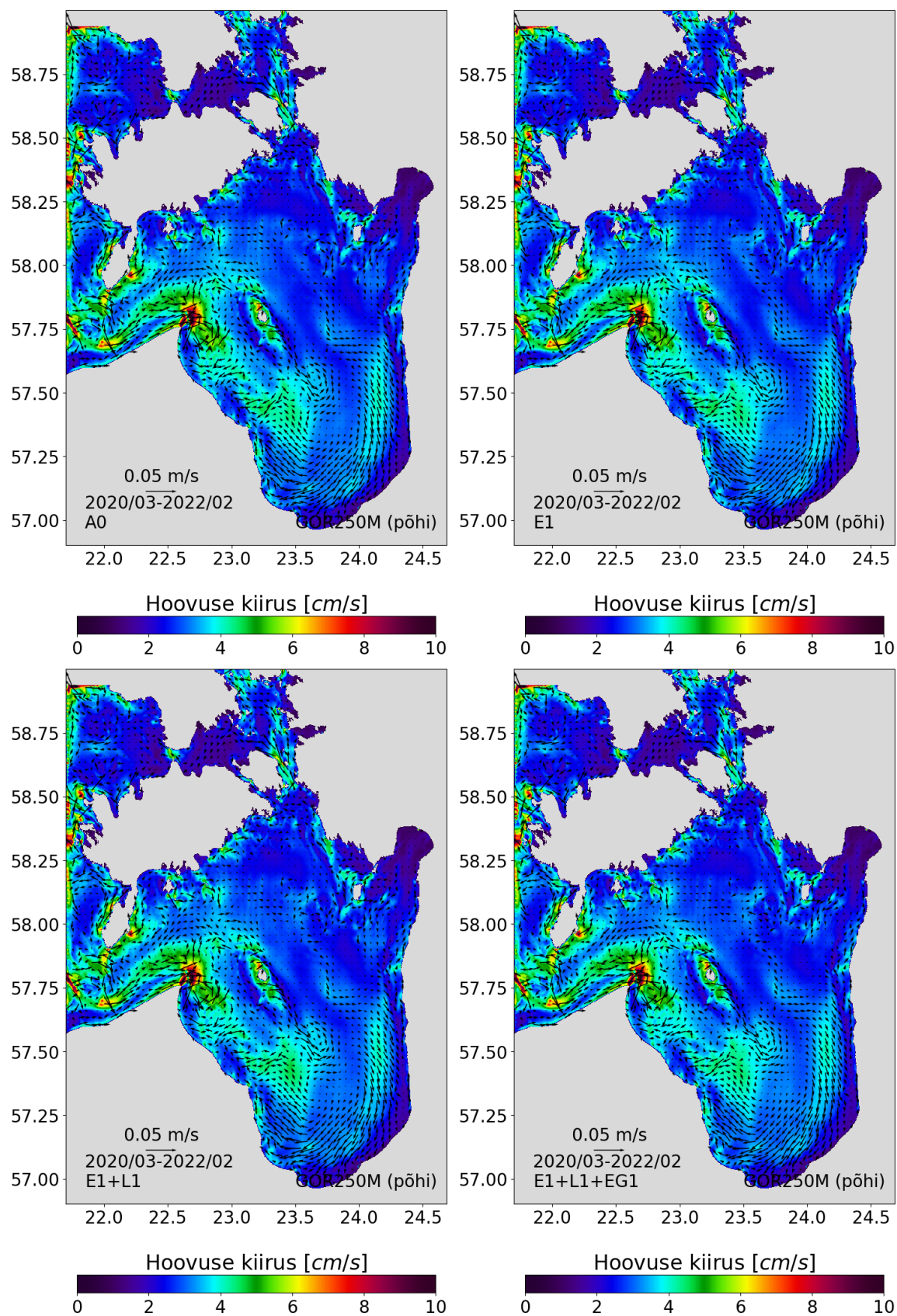


Joonis 3.1.5: Keskmine pinnakihi kineetiline energia Liivi lahes suvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



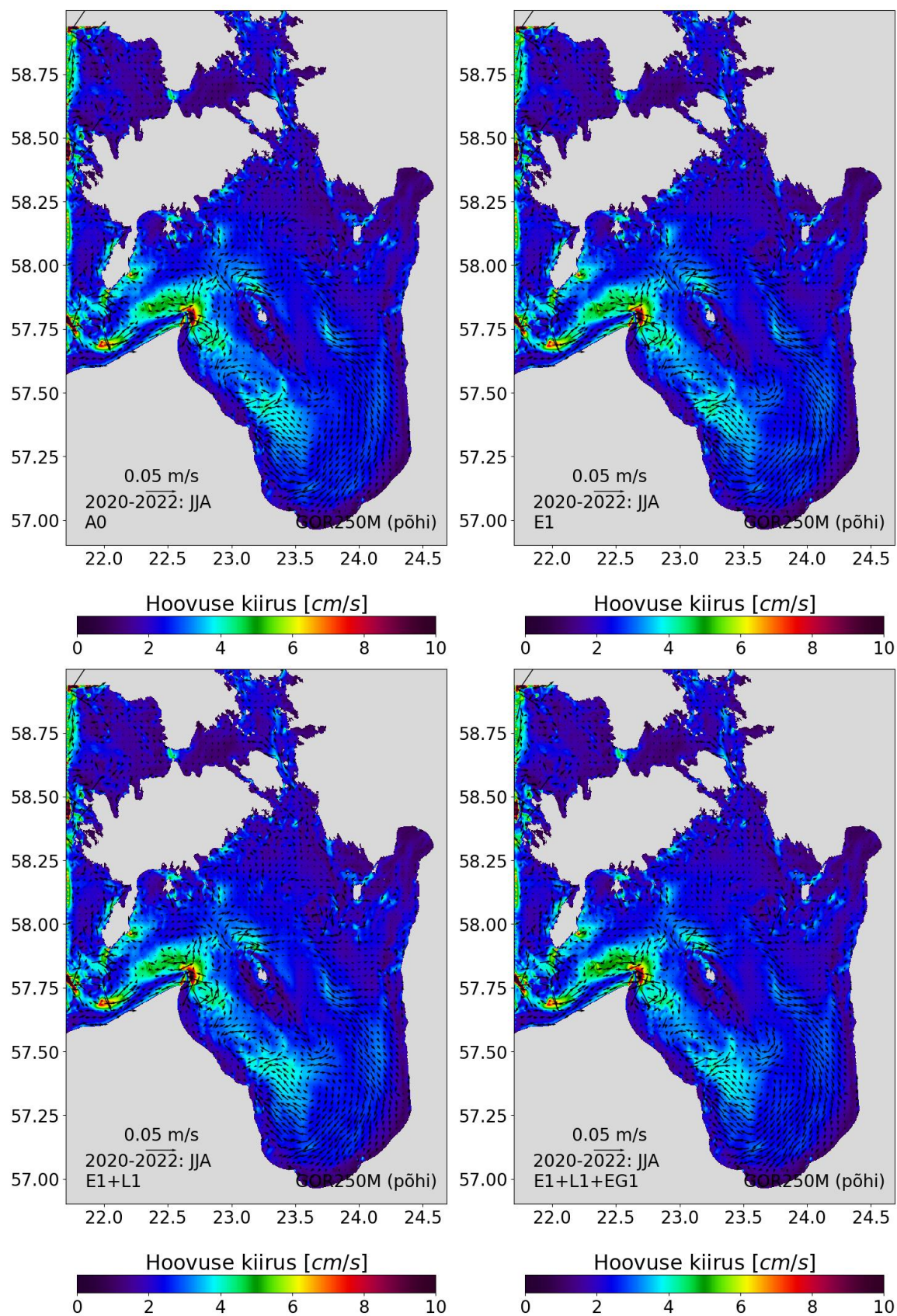


Joonis 3.1.6: Keskmine pinnakihi kineetiline energia Liivi lahes talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



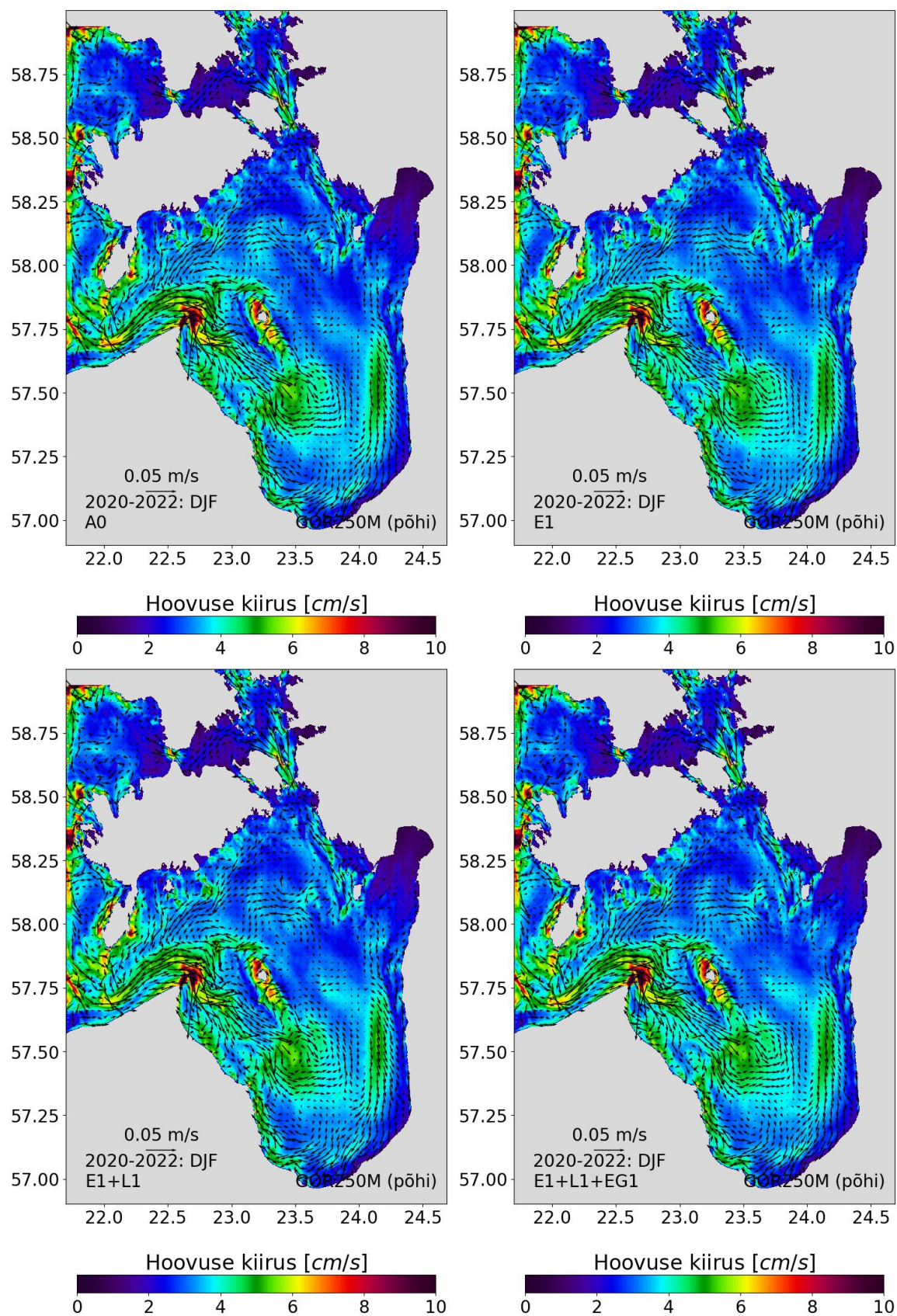
Joonis 3.1.7: Keskmine põhjalähedane hoovus Liivi lahes nelja stsenaariumi korral.



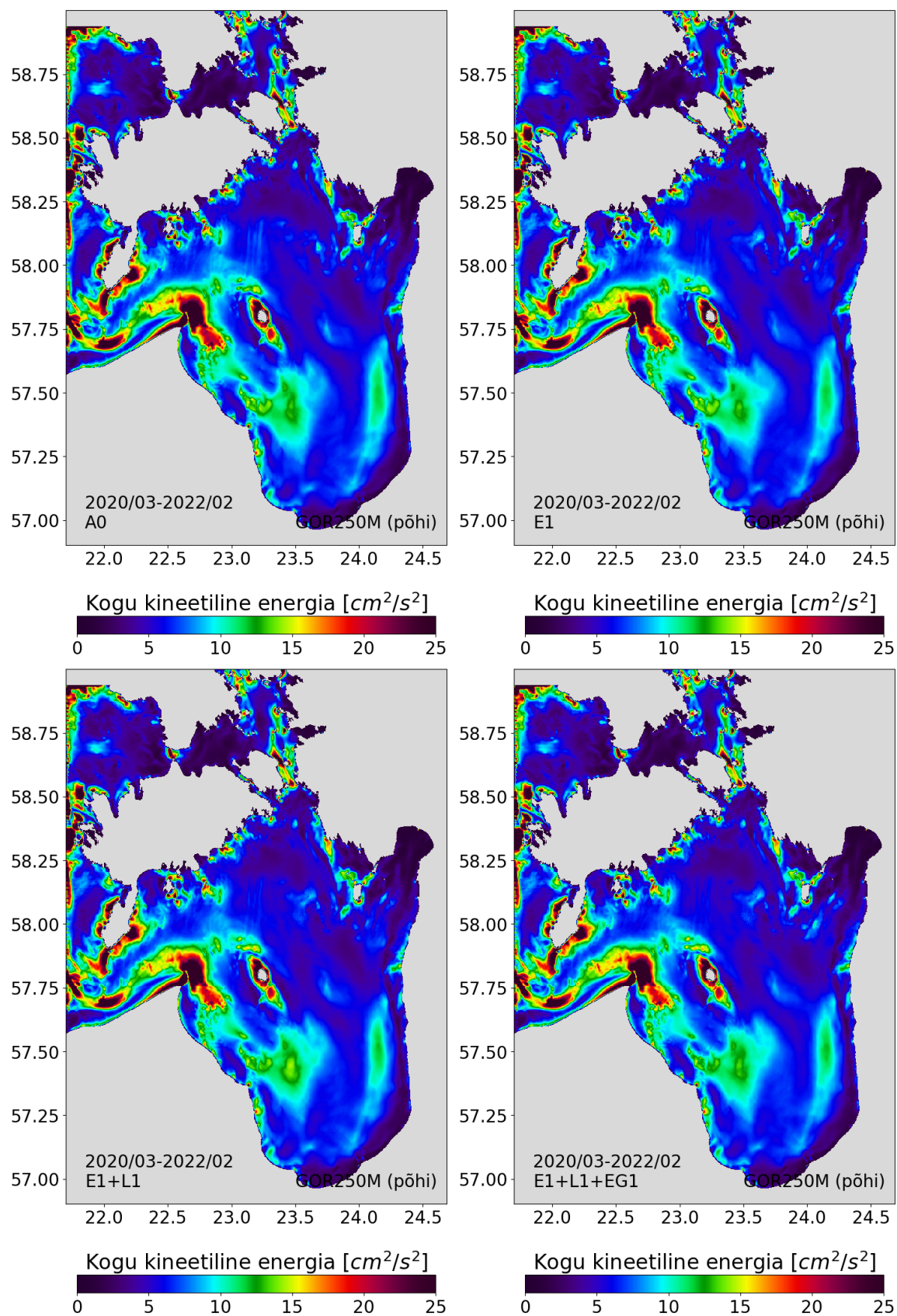


Joonis 3.1.8: Keskmine põhjalähedane hoovus suvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



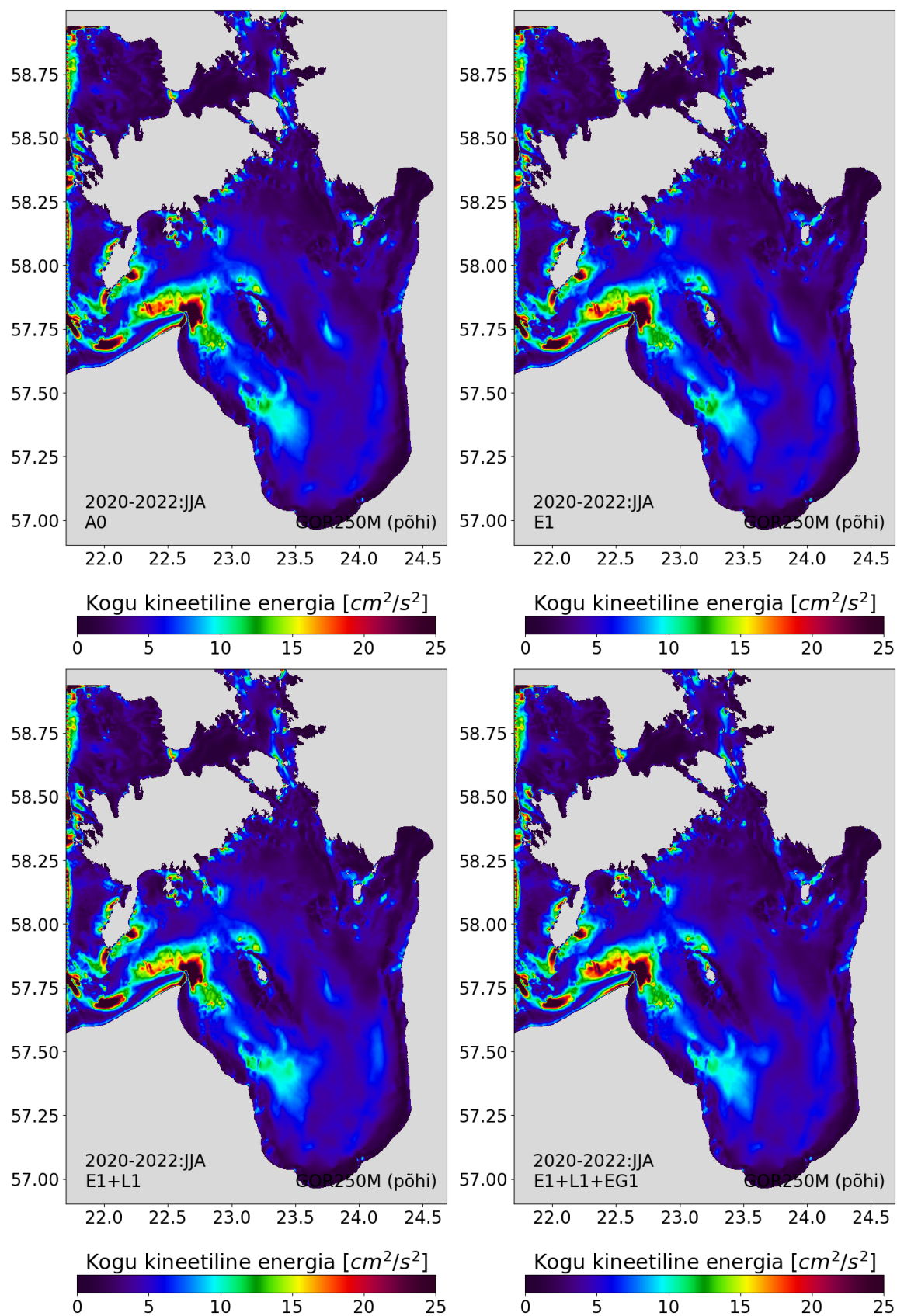


Joonis 3.1.9: Keskmine põhjalähedane hoovus talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



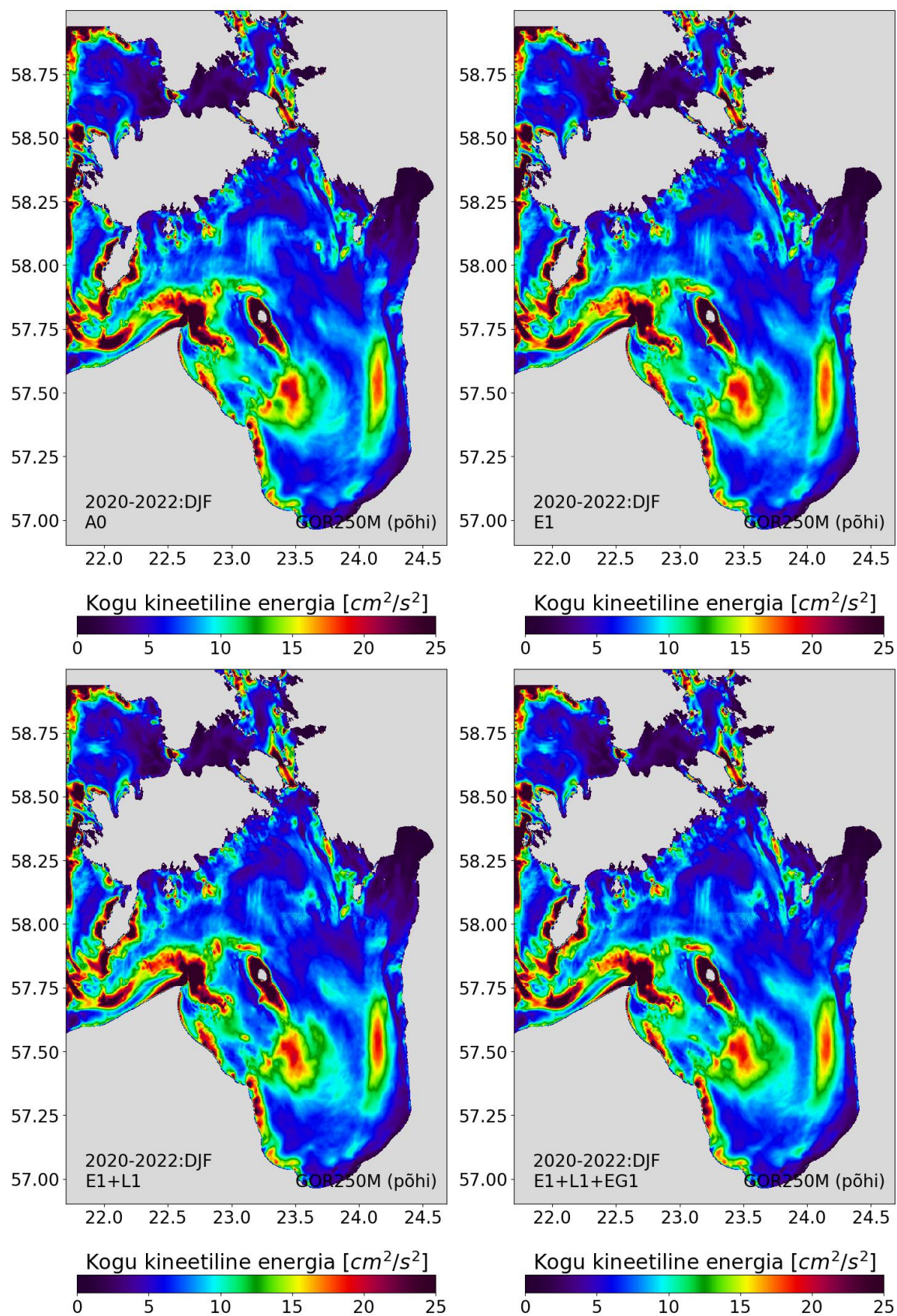
Joonis 3.1.10: Keskmine põhjalähedane kineetiline energia nelja stsenaariumi korral.





Joonis 3.1.11: Keskmine põhjalähedane kineetiline energia suvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.





Joonis 3.1.12: Keskmine põhjalähedane kineetiline energia talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.

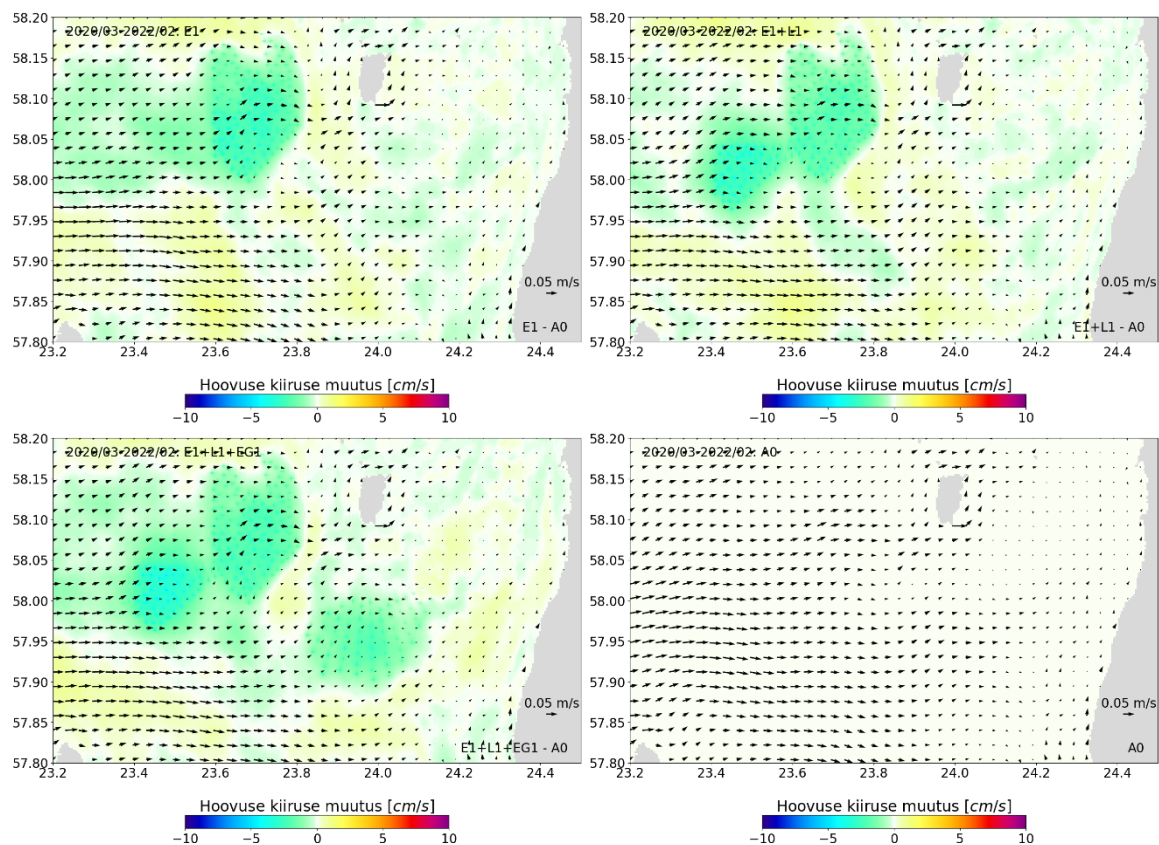
Joonistel 3.1.13 kuni 3.1.18 on toodud pinnakihi hoovuse kiiruse ja kineetilise energia muutused tuuleparkide piirkonnas võrreldes hetkeolukorraga kogu perioodi ning suvise ja talvise sesooni jaoks. Selgelt joonistub välja tendents, mille kohaselt tuulepargi aladel hoovuskiirused langevad, aga parkide ümbruses pigem kasvavad, kuigi mitte igal pool.

Tugevamad muutused esinevad suvel, st. stratifitseeritud perioodil. Tuuleparkide alasid läbib varasemast väiksem transport, mistõttu parkidest allavoolu domineerivat hoovusesuunda tekib puudujääk, mis kompenseeritakse tuulepargist lõunas ja põhjas toimuva tugevama hoovusega kaasneva transpordi abil. Kõige suurem pinnakihi hoovuskiiruste vähenemine esineb ala 2 juures. See muutus on tugevam, kui rajatakse kõik kolm parki. See tähendab, et pargid mõjutavad üksteist ja teatav mõju kumulatiivsus mitmete parkide rajamisega kaasneb.

Talvel on samuti hoovuskiiruste vähenemine parkide aladel selgelt tuvastatav, kuid pinnahoovuste tugevnemine parkide servas võrreldes suvega on tagasihoidlikum.

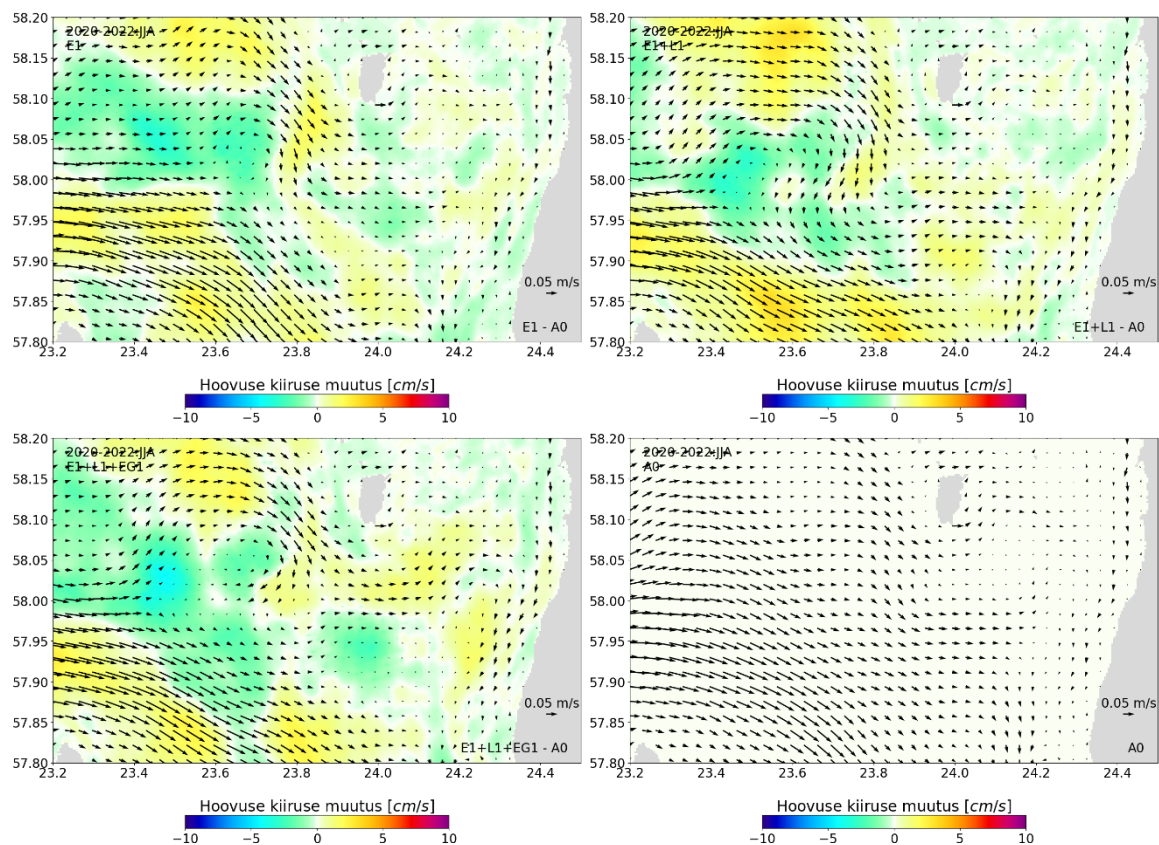
Sarnaselt hoovuse kiiruse erinevusega, on muutus näha ka pinnakihi kineetilise energia jaotustes. Üldiselt on vähenemine vahemikus  $10\text{--}20\text{ cm}^2/\text{s}^2$ , kuid tuulepargi ala 2 piirkonnas isegi rohkem kui  $40\text{ cm}^2/\text{s}^2$ . Oluline mõju ala 2 piirkonna pinnakihi kineetilisele energiale on ka tuulepargil alal 3. Ülejäänud kahe ala mõju tuulepargi ala 1 pinnakihi kineetilisele energiale on tagasihoidlik.

Joonistel 3.1.19 kuni 3.1.24 on toodud põhjalähedase kihi hoovuse kiiruse ja kineetilise energia muutused tuuleparkide piirkonnas võrreldes hetkeolukorraga kogu perioodi ning suvise ja talvise sesooni jaoks. Muutused põhjakihis on võrreldes pinnakihiga tunduvalt väiksemad. Suvel jäävad muutused alla  $1\text{ cm/s}$ . Talvel ulatuvad muutused põhjakihi keskmises hoovuskiiruses alal 1 ja alal 2  $1\text{ cm/s}$  ligidale.

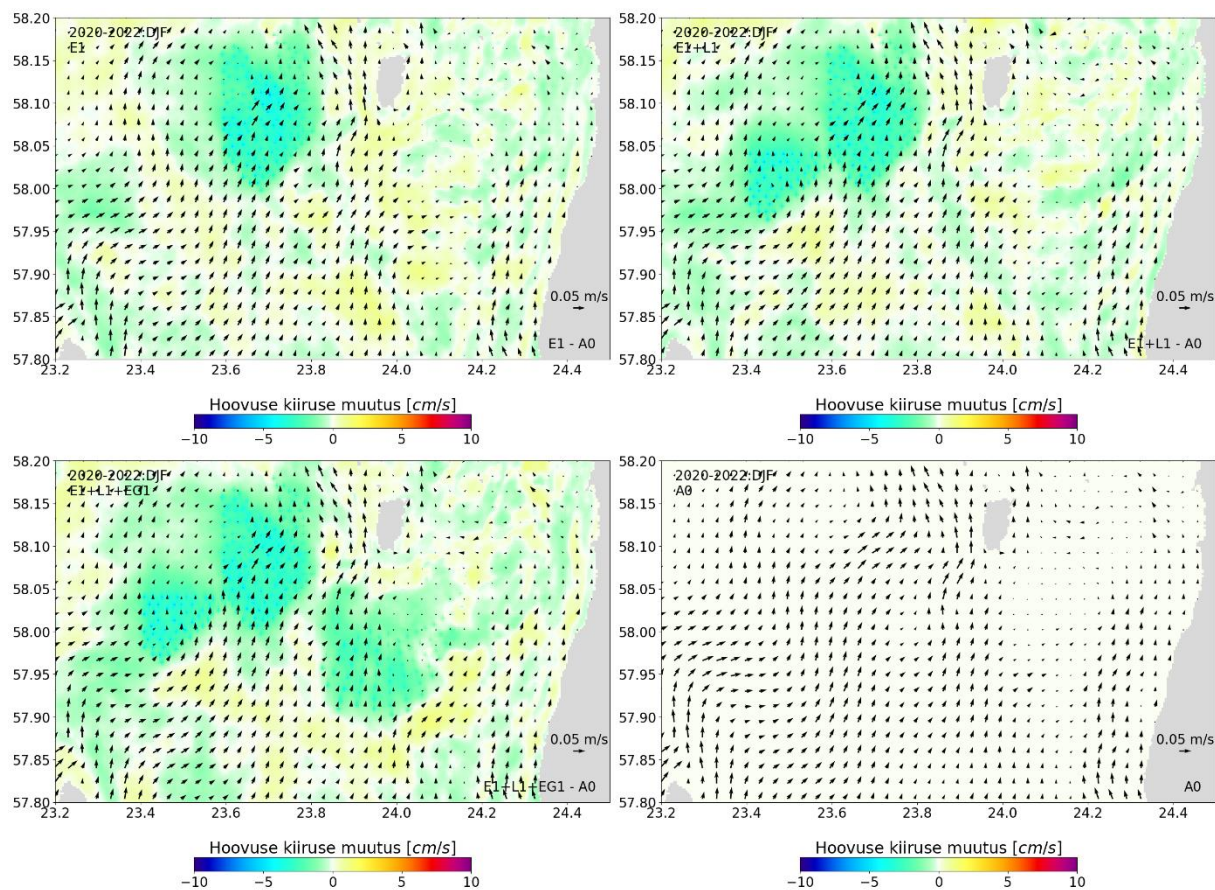


Joonis 3.1.13: Keskmise pinnakihi hoovuse kiiruse muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.



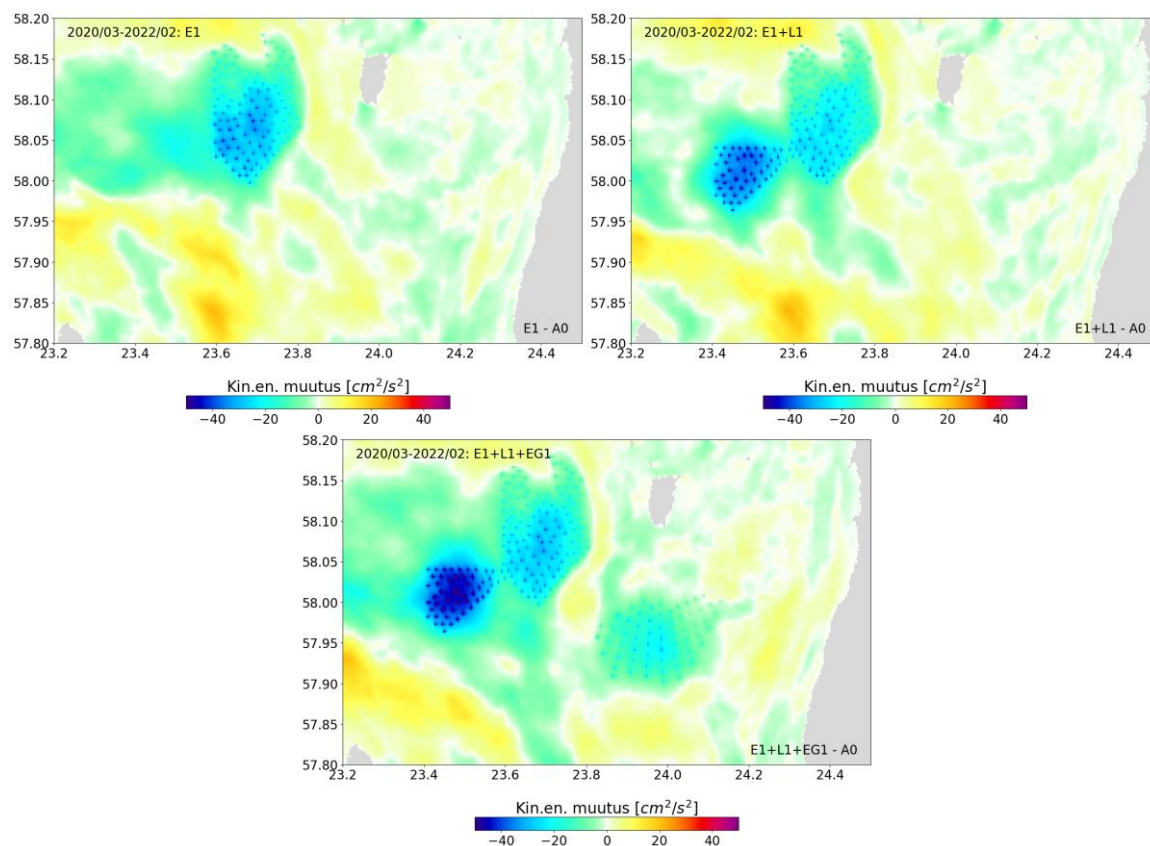


Joonis 3.1.14: Keskmise pinnakihi hoovuse kiiruse muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.

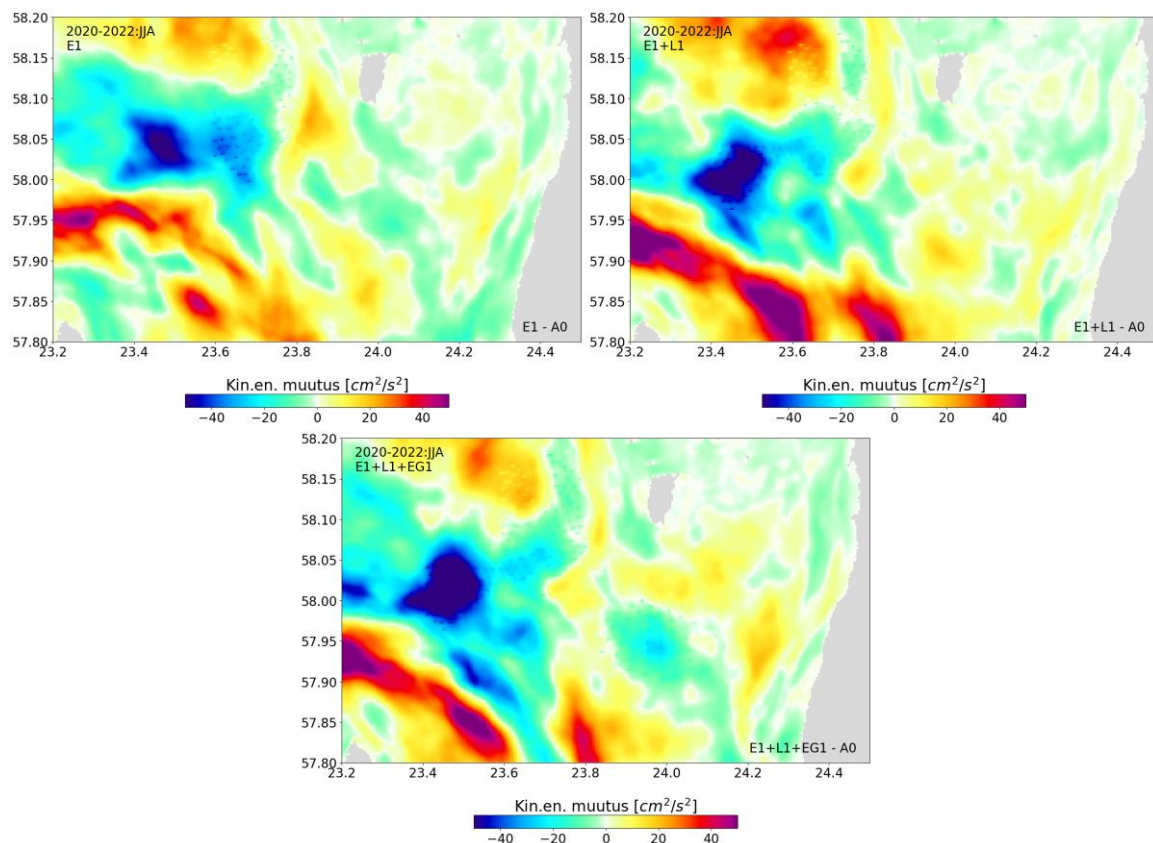




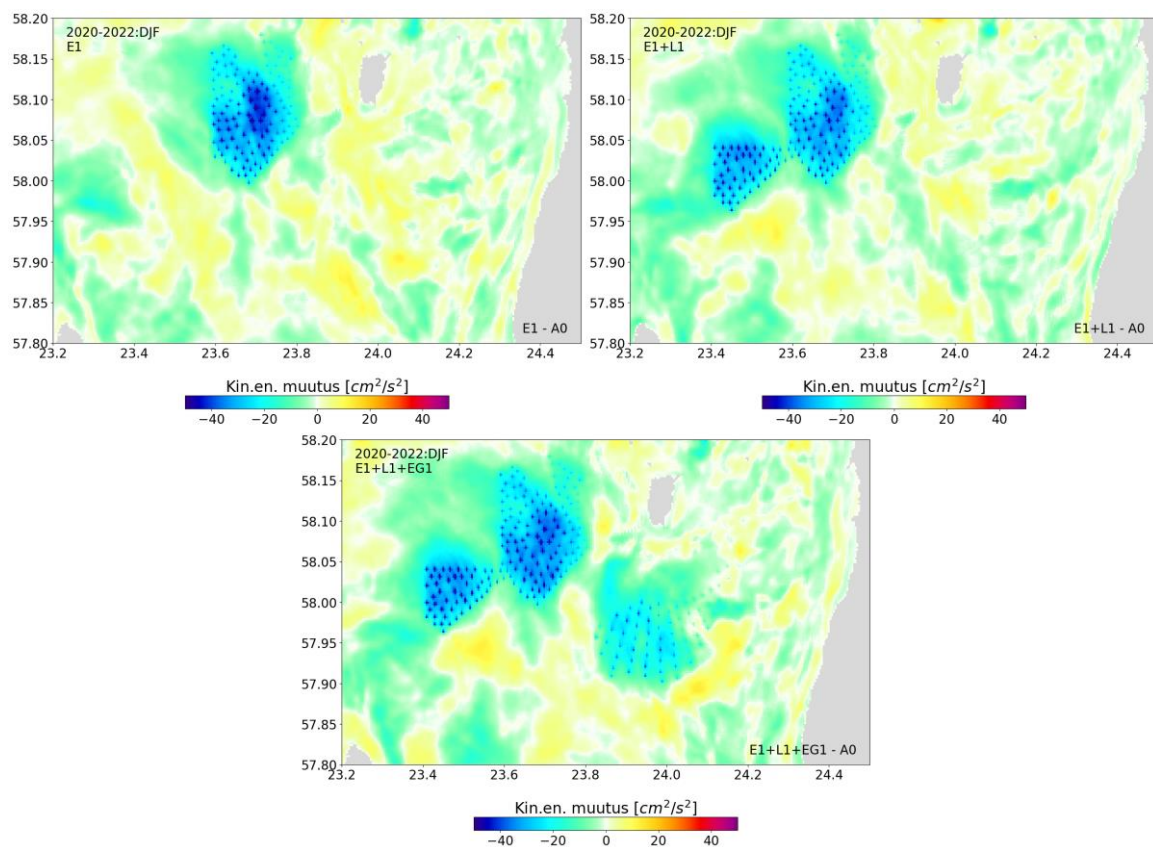
Joonis 3.1.15: Keskmise pinnakihi hoovuse kiiruse muutus talvel nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.



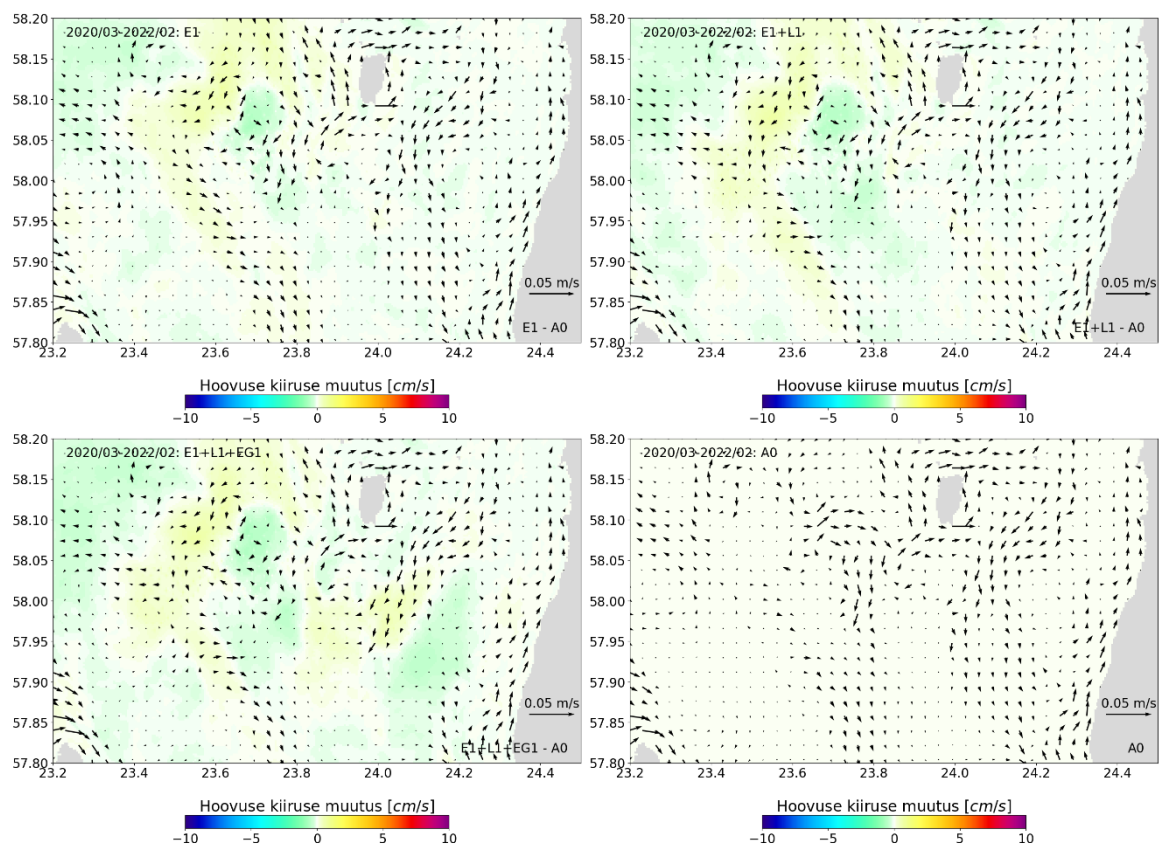
Joonis 3.1.16: Keskmise pinnakihi kineetilise energia muutus kolme stsenaariumi korral.



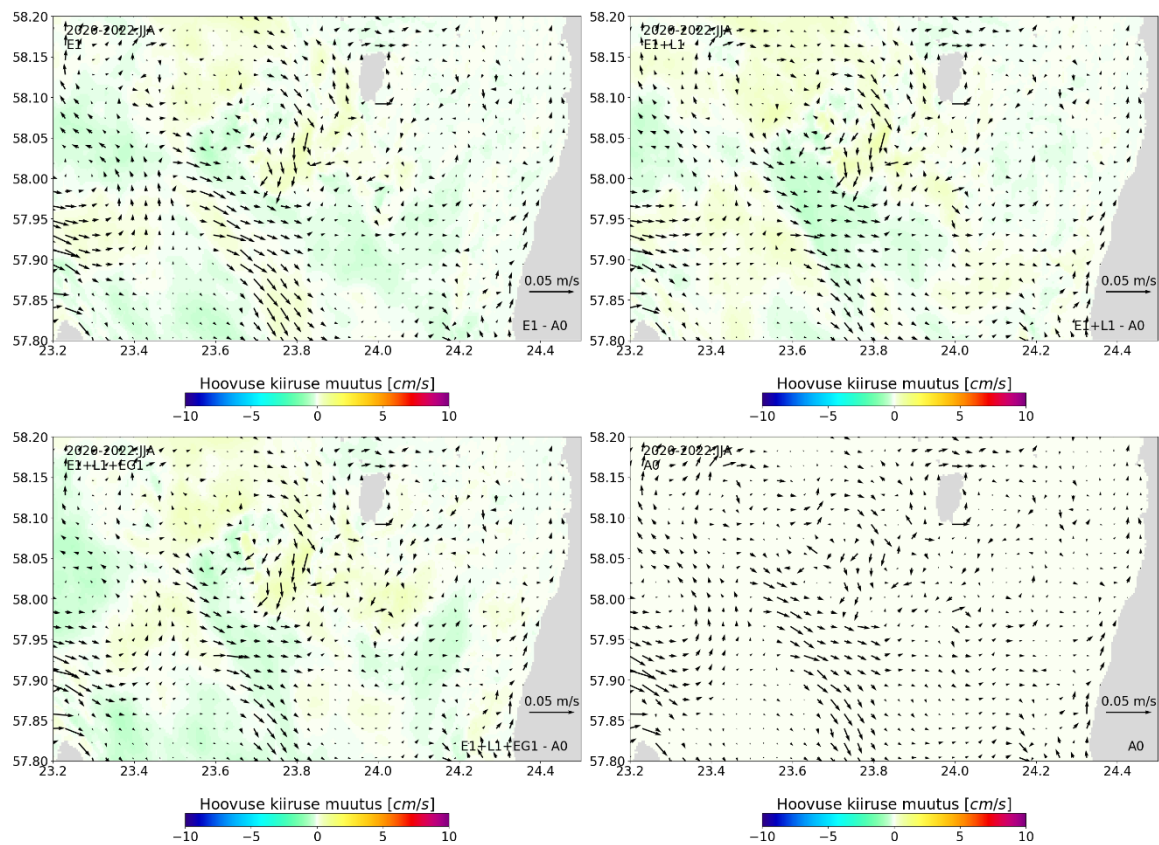
Joonis 3.1.17: Keskmise pinnakihi kineetilise energia muutus suvisel perioodil kolme stsenaariumi korral.



Joonis 3.1.18: Keskmise pinnakihi kineetilise energia muutus talvisel perioodil kolme stsenaariumi korral.

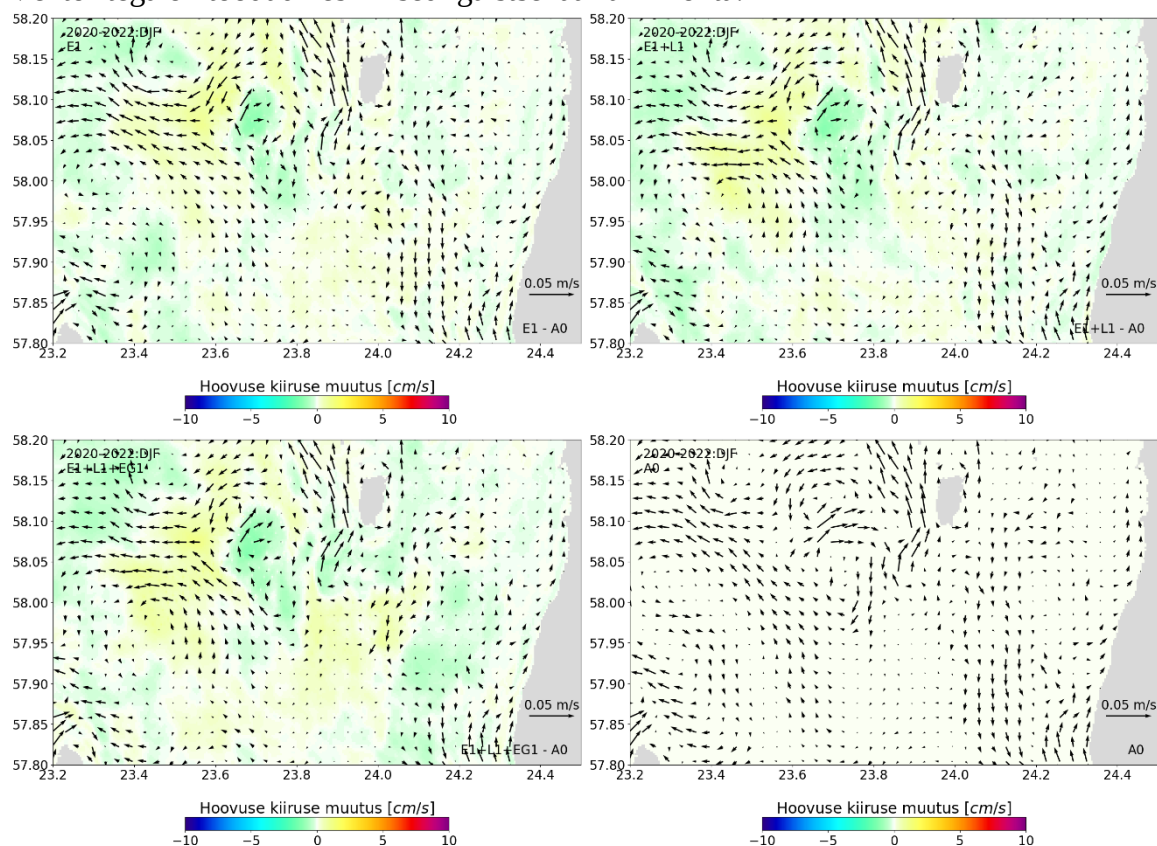


Joonis 3.1.19: Keskmise põhjakihi hoovuse kiiruse muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.



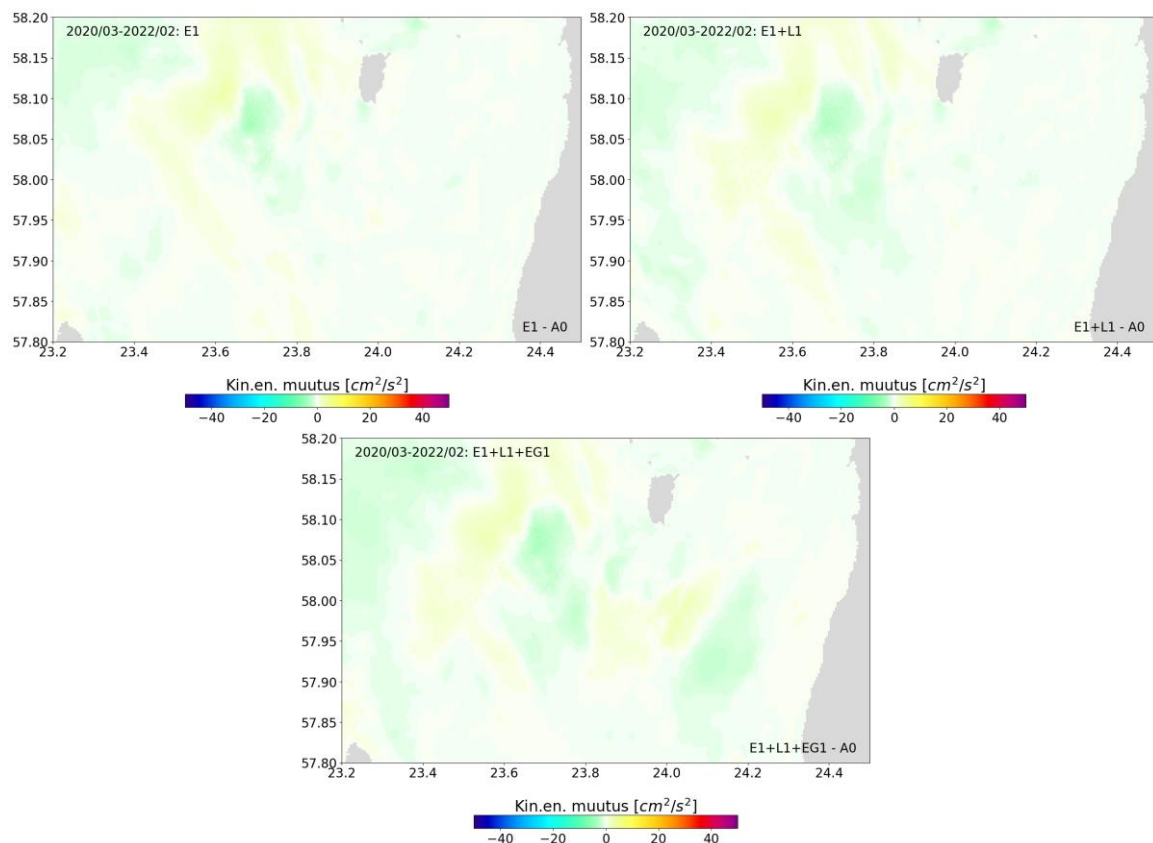


Joonis 3.1.20: Keskmise põhjakihi hoovuse kiiruse muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.

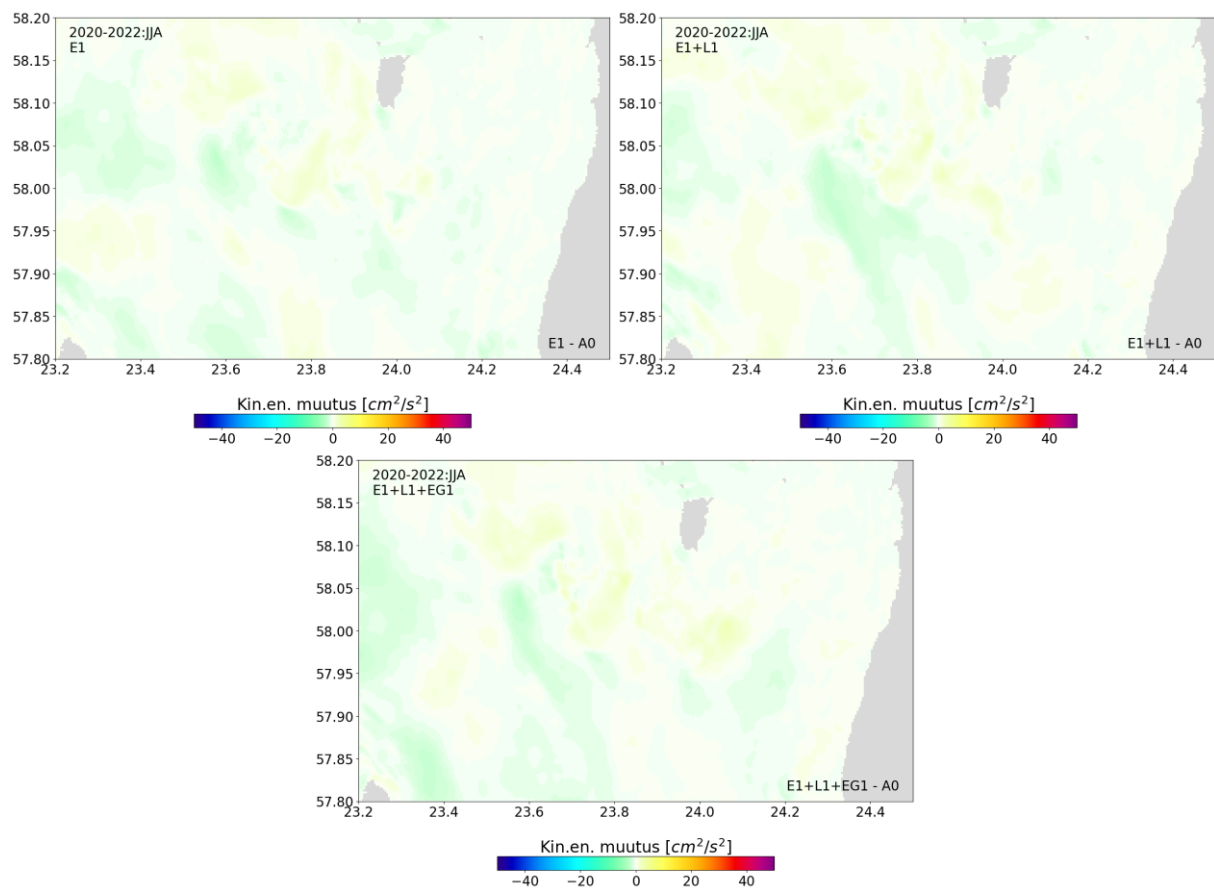


Joonis 3.1.21: Keskmise põhjakihi hoovuse muutus talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.

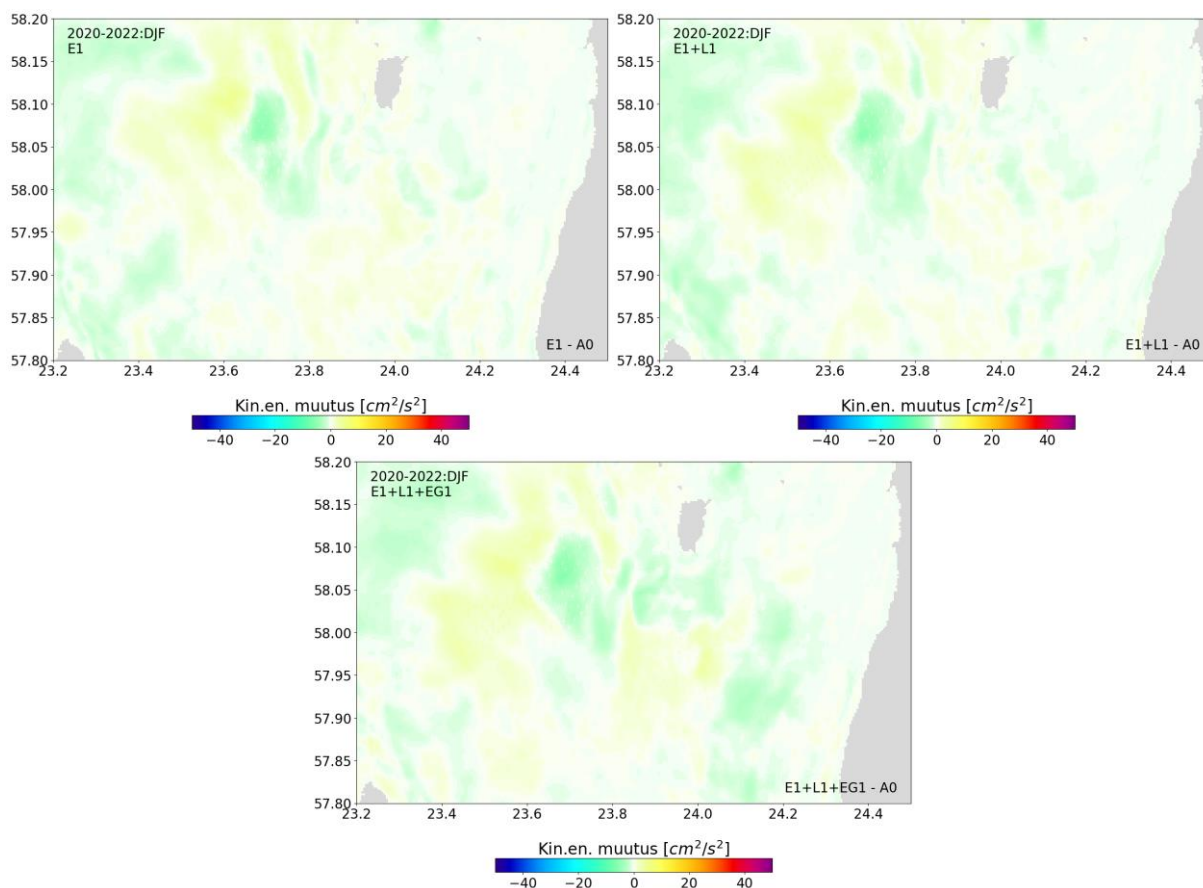




Joonis 3.1.22: Keskmise põhjakihi kineetilise energia muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.



Joonis 3.1.23: Keskmise põhjakihi kineetilise energia muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.

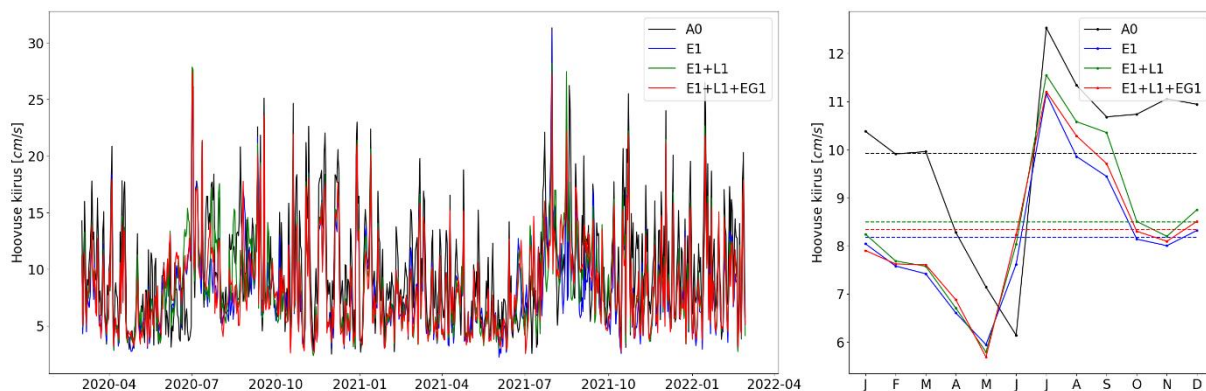


Joonis 3.1.24: Keskmise põhjakihi kineetilise energia muutus nelja stsenaariumi korral. Vektoritega on toodud keskmised iga stsenaariumi kohta.

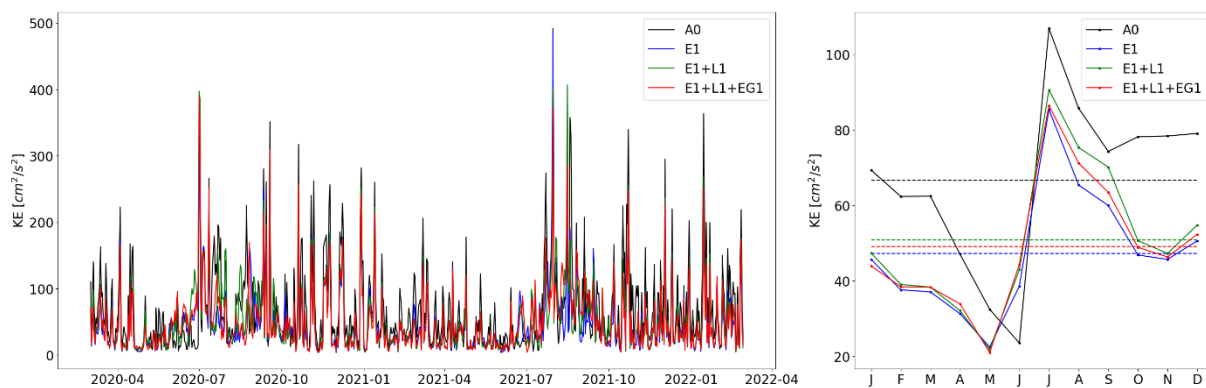
Joonisel 3.1.25 ja 3.1.26 on toodud keskmise hoovuse kiiruse ja kineetilise energia kaheaastased ja sesoonsed käigud tuulepargi alal 1. Üldiselt iseloomustab nii pinnakihi hoovuse kiiruse kui ka kineetilise energia ajalist käiku suur muutlikkus – hetkeolukorra keskmine hoovuse kiirus oli vaadeldud perioodil ligikaudu 10 cm/s, maksimaalne 1-h kiirus ületas 30 cm/s. Pinnakihi Kineetilise energia keskmine oli ligikaudu 70  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , kuid maksimaalsed väärtused üle 400  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . Sesoonselt on suurimad pinnakihi kineetilise energia ja hoovuskiiruse väärtused tuulepargi alal 1 suvisel ajal (juuli-august) ning miinimumid kevadel (mai-juuni). Tuulepargid vähendavad pinnakihi keskmisi kiirusi (ja kineetilist energiat) alal 1 oluliselt. Keskmine pinnakihi hoovuse kiirus väheneb väärtuselt 10 cm/s väärtuseni umbes 8-8,5 cm/s ja pinnakihi kineetiline energia väärtuselt 65  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  väärtuseni 40-45  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , sõltuvalt konfiguratsioonist. Hoovuskiirus alal 1 alade 2 ja 3 lisandudes täiendavalt ei lange. Suve teises pooles ja sügisel ala 2 lisandudes (E1+L1) hoovuskiirused võrreldes olukorraga, kus eksisteerib üksnes ala 1

(E1), pigem veidi tõusevad. Näha on, et sesoonne pinnakihi hoovuskiiruse kasv leiab tuuleparkide olemasolul aset mõnevõrra varem ja on tõenäoliselt seletatav stratifikatsiooni tekkega.

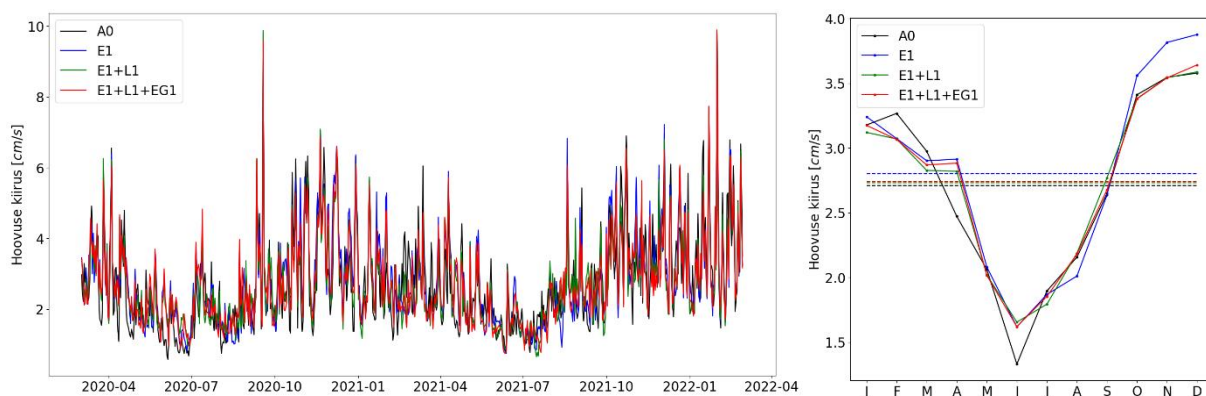
Põhjakihi hoovused on pinnakihi võrreldes nõrgemad ning sesoonne kiiruse maksimum on sügisel ja talvel. Tuulepargi mõju absoluutsetele hoovuskiirustele on võrreldes pinnakihi tagasihoidlikum ning selget muutust või muutuse sesoonsust esile ei tule.



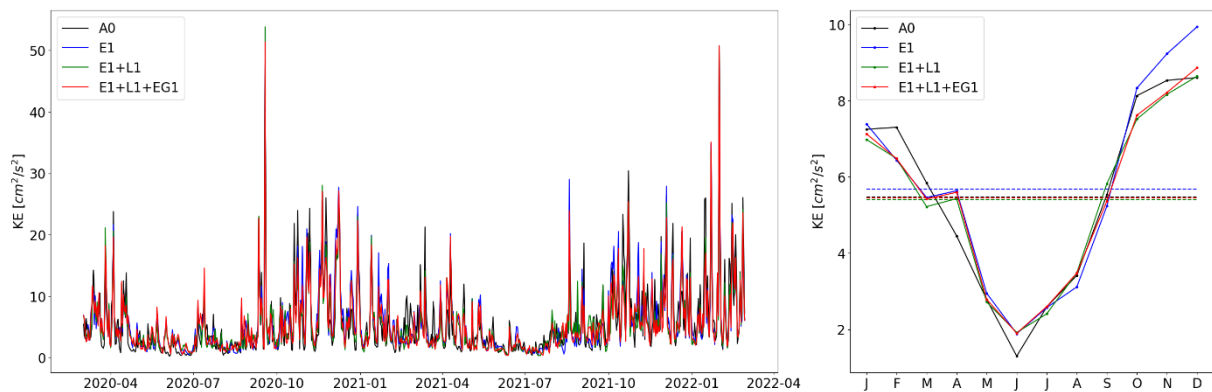
Joonis 3.1.25: Keskmise pinnakihi hoovuse kiiruse ajaline käik ja sesoonne käik alal 1.



Joonis 3.1.26: Keskmise pinnakihi kineetilise energia ajaline käik ja sesoonne käik alal 1.



Joonis 3.1.27: Keskmise põhjakihi hoovuse kiiruse ajaline käik ja sesoonne käik alal 1.



Joonis 3.1.28: Keskmise põhjakihi kineetilise energia ajaline käik ja sesoonne käik alal 1.

Kokkuvõttes, Liivi lahe mastaapi tsirkulatsioon tervikuna ei muutu, kuid esinevad lokaalsed muutused. Tuulepargid mõjutavad ka vastastikku aladel hoovusvälju, nt. ala 3 kasutamisel langevad simulatsiooni põhjal hoovuskiirused alal 2. Tuuleparkide aladel hoovuskiirused pigem langevad ja parke läbiv vee transport väheneb. Suuremad muutused esinevad pinnakihis. Tuuleparkide servaaladel, eriti suvel, moodustuvad kompensatsiooniks tugevama pinnahoovusega mustrid. Seega lokaalne hoovuste struktuur tuulepargialadel ja lähiümbruses muutub.

## 3.2. Lainetus

Tuule kiiruse vähenemine põhjustab laine energia vähenemist tuulikute allatuult.

Tuulikute tekitatud varjuefekt on tagasihoidlikum tugevate tuule kiiruste juures, mistõttu jääb tuule kiiruse  $\geq 13$  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. Kuna arvutuses kasutatud tuuleparkide konfiguratsioonides on tuulikuid aladel 1 ja 2 oluliselt tihedamalt, siis on nende alade sees ka mõju tugevam.

Arendusalad asuvad üksteise suhtes loode-kagu sihis, mistõttu ka vastavate tuule suundade puhul on potentsiaalne kumulatiivne mõju suurim. Kuigi mõju tuulepargist allatuult lainetusele väheneb ja laineenergia taastub, siis jõuab mõju ühe tuulepargi ala juurest teise juurde.

Kagutuulte kiirusega 7-10 m/s puhul ulatub mõju ala 3 poolt põhjustatud olulise laine kõrguse vähenemine suurusjärgus 3-6 cm ala 1 kagupoolsete tuulikuteni. Ülejäänud tuule kiiruse ja suundade kombinatsioonide puhul on ala 3 tuulepargi mõju ulatumine aladeni 1 ja 2



tagasihoidlikum või olematu. Kagutuuled ei ole meie piirkonnas eriti sagedased, ERA5 (Hersbach et al., n.d.) 1992-2021 andmetel esineb Liivi lahes tuuli kagust 10-11% ajast. Kui võtta arvesse tuuled üksnes kriitilises kiiruse vahemikus (7-10 m/s), siis selliste kagutuulte osakaal kogu 1992-2021 aegreast on olnud 3%.

Kuna valitud arendusala konfiguratsioonides on aladel 1 ja 2 oluliselt rohkem tuulikuid, siis on alade 1 ja 2 mõju alale 3 loodetuultega suurem kui vastassuunaline mõju kagutuultega. Loodetuulte kiirusega 7-10 m/s puhul ulatub alade 1 ja 2 poolt põhjustatud olulise laine kõrguse vähenemine suurusjärgus 5-8 cm ala 3 loodepoolsete tuulikuteni. Loodetuulte osakaal tuulte aegreast on 13% ja kriitilises kiiruse vahemikus (7-10 m/s) loodetuulte osakaal on olnud 4%.

Läänetuulte kiirusega 7-10 m/s puhul ulatub alade 1-2 poolt põhjustatud olulise laine kõrguse vähenemine suurusjärgus 4-6 cm ala 3 loodepoolsete tuulikuteni. Läänetuulte osakaal tuulte aegreast on 16% ja kriitilises kiiruse vahemikus (7-10 m/s) läänetuulte osakaal on olnud 5%.

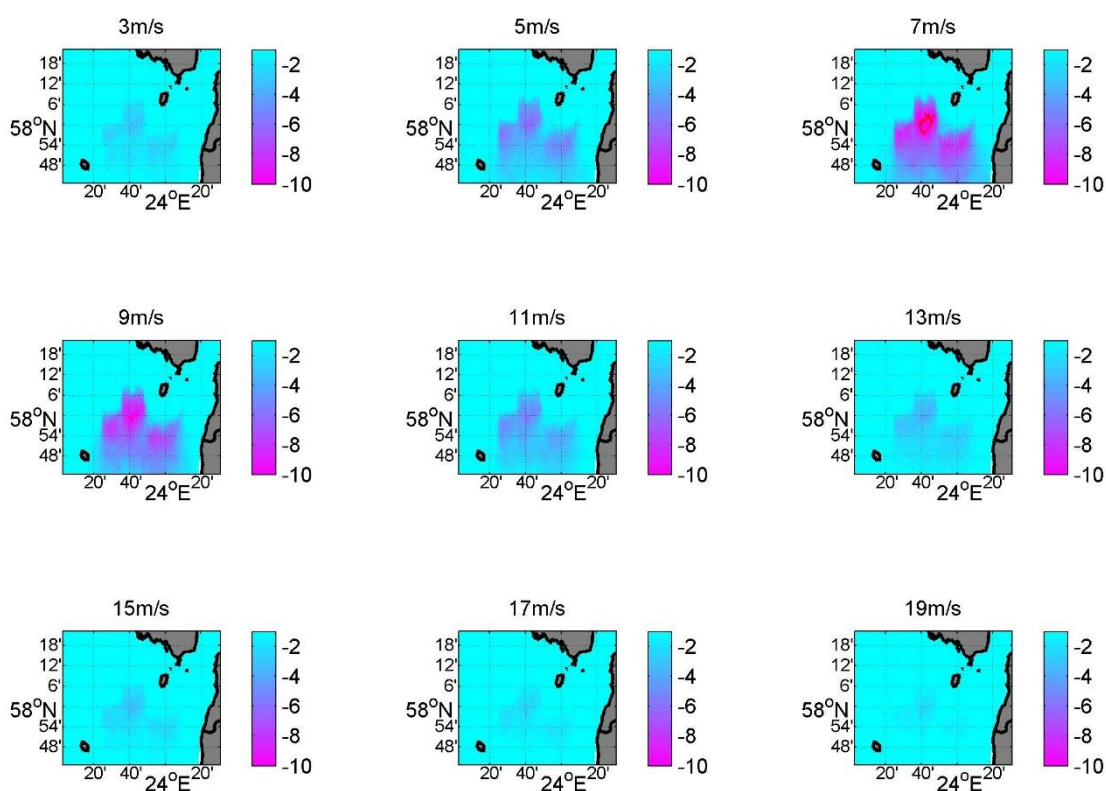
Märkimist väärib ka ala 3 ning alade 1 ja 2 vahele jääv merepiirkond. Ainult ühe arendaja tuulepargi puhul esineb mõju kas loode- või kagutuultega. Mõlema tuulepargi olemasolul esineb mõju nii kagu- kui loodetuultega.

Laine kõrguse vähenemine kolme arendusala koos eksisteerides on tõenäoliselt suurem, kui üksikute arendusalade summa (st. kui ülejäänud kahte mitte arvestada). Sellest hoolimata on mõju pikaajalisele keskmisele lainekõrguse väljale ka kolme arendusala koos eksisteerides suhteliselt tagasihoidlik. Keskmise oluline laine kõrgus ala 1 keskel väheneks ca 6% ning alal 2 ja alal 3 ca 4%. Mõju on mõnevõrra suurem tuulepargi aladest idas ja kirdes, sest valdavad tuuled puhuvad edelast, läänest. Keskmise mõju on veidi tagasihoidlikum suvel (joonis 3.3.8) ja mõnevõrra suurem talvel (joonis 3.3.9). Samas ei ole me arvesse võtnud jää esinemist, mistõttu joonisel 3.3.9 presenteeritu illustreerib maksimaalset keskmist mõju. Kuna viimaste aastate talved on jäävaesed ja domineerivate tuulte suund on edelast-läänest, siis võib arvata, et hinnang oluliselt tegelikkusest kõrvale ei kaldu.

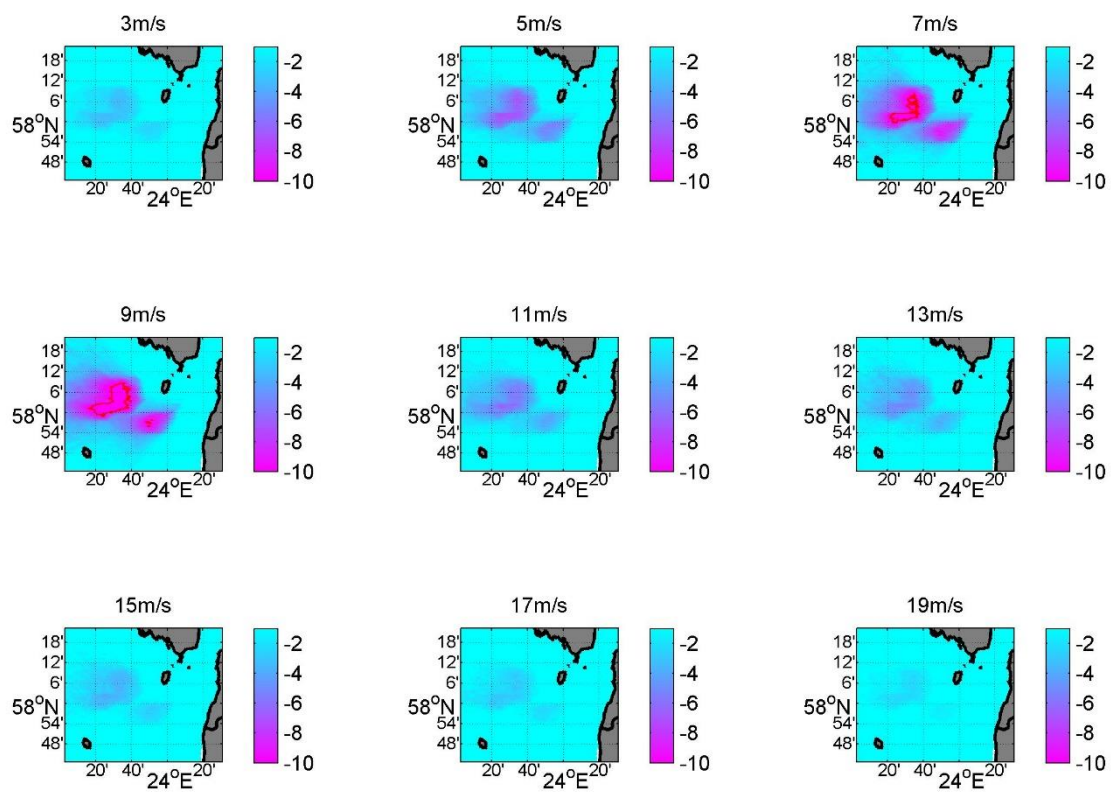
Kihnu lähisel võib keskmine laine kõrgus väheneda 1-2 cm. Mõju on võrreldes üksnes ala 1 ja ala 2 kasutamisega veidi suurem, sest lisaks läänekaarte tuultega kaasnevale lainetuse vähenemisele, oleks ala 3 pargi poolt mõjutatud ka lõunakaarte tuultega tekkiv lainetus Kihnu lähedal. Üheaegselt alad 1 ja 2 ning ala 3 pargid Kihnu lähedal lainetust ei mõjuta, sest Kihnu jääb parkidest allatuult erinevate tuule- ja laineleviku suundadega. Väheldane üheaegne kumulatiivne mõju võib esineda lääne- ja loodekaarte tuultega Hädemeeste-Ikla-Ainaži rannikul. Keskmise mõju jääb seal tagasihoidlikuks ja on alla 1 cm.

Piiriülene mõju on peamiselt seotud ala 3 tuulepargiga. Soodsa tuulega võib laine kõrgus piirialal väheneda 10 cm või veidi enamgi. Loodetuultega alad 1 ja 2 ilmselt süvendavad mõju, kuid keskmine laine kõrguse vähenemine piirialal piirdub paari cm.

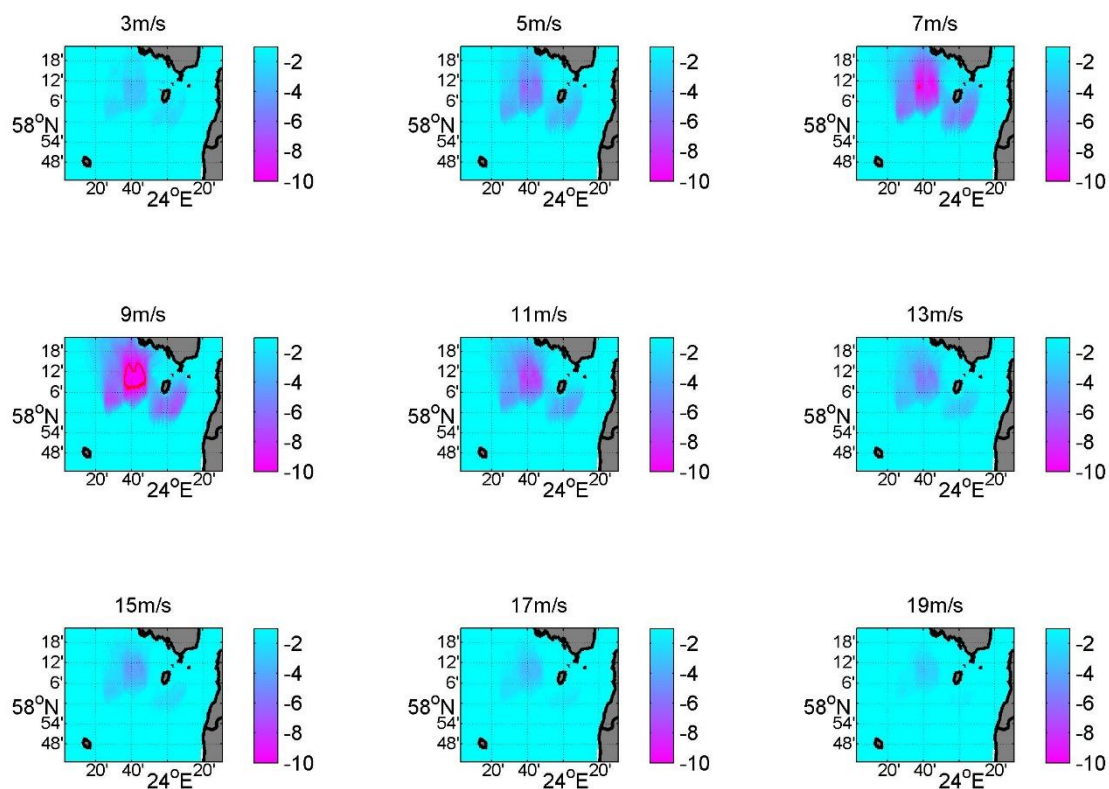
Kokkuvõttes, kuigi mitme tuulepargi koosmõjul kumulatiivsed mõjud kaasnevad, on lainekliimat mõjutavate looduslike tegurite varieerumine tunduvalt suurem, kui tuulepargi mõju. Tuuleparkide sees väheneb oluline lainekõrgus keskmiselt 4-6%. Liivi lahte tervikuna silmas pidades on mõju tagasihoidlik.



Joonis 3.3.1. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine põhjatuulega aladele 1-3 paigutatud tuulikute korral.

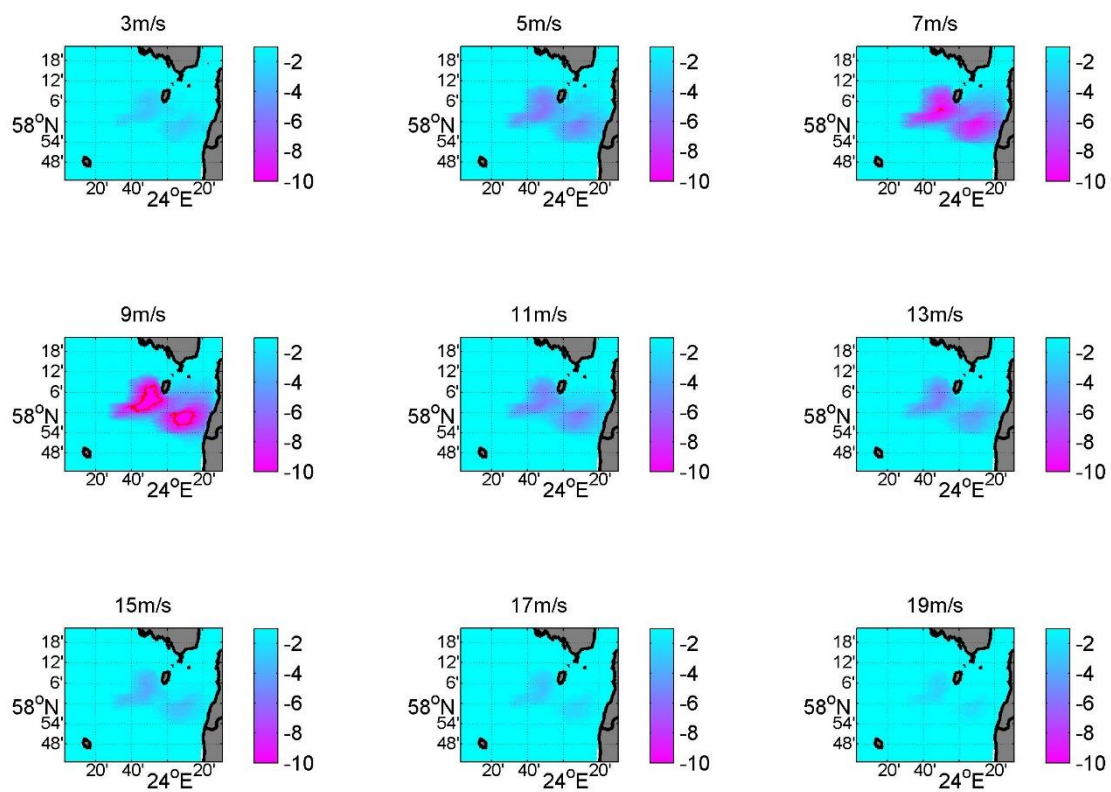


Joonis 3.3.2. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine idatuulega aladele 1-3 paigutatud tuulikute korral.

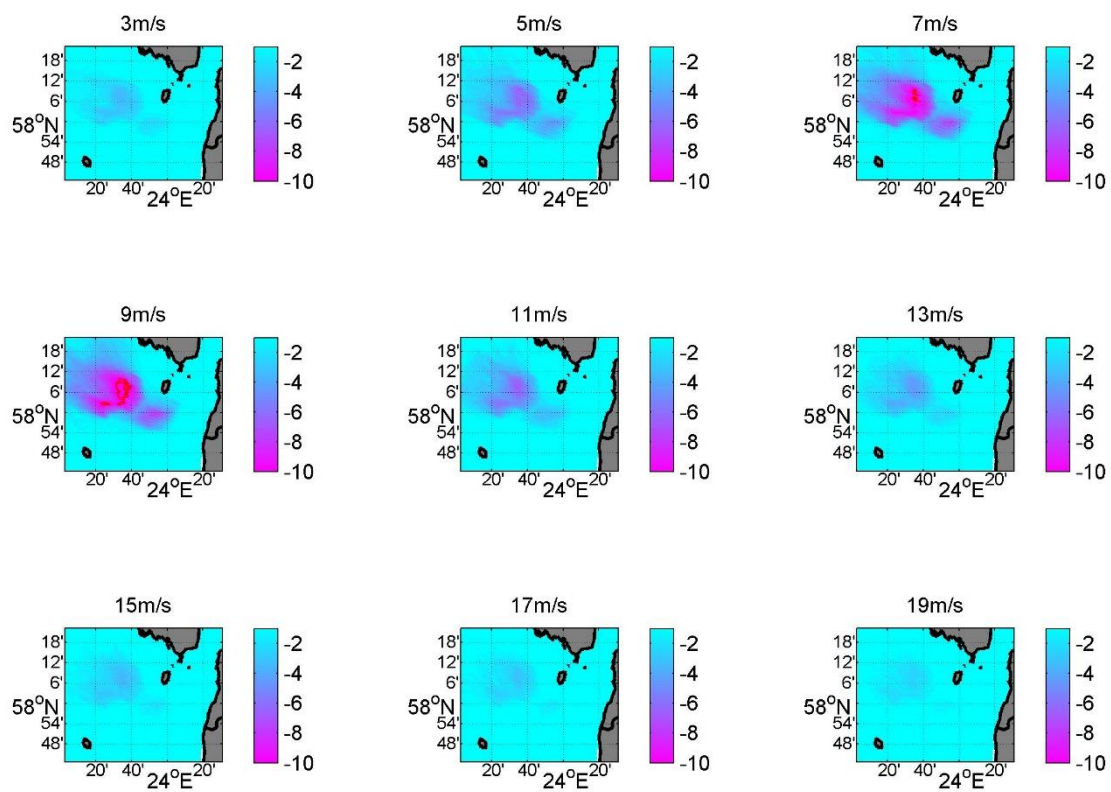


Joonis 3.3.3. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine lõunatuulega aladele 1-3 paigutatud tuulikute korral.

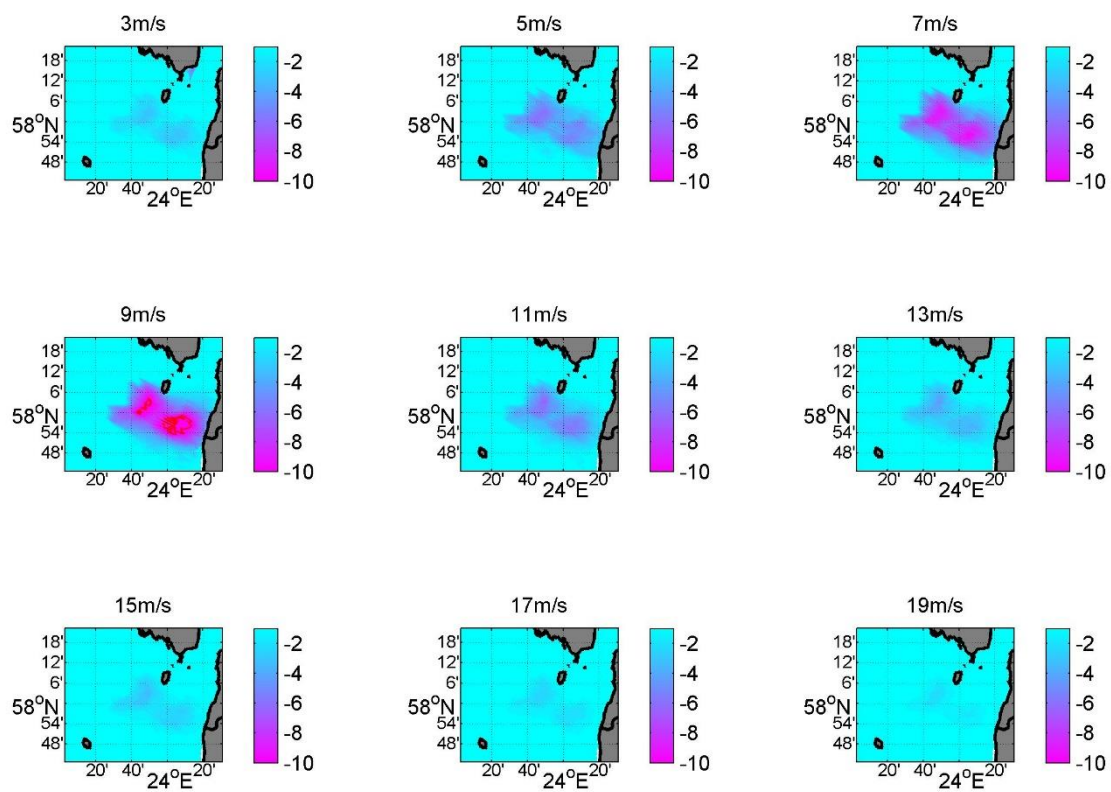




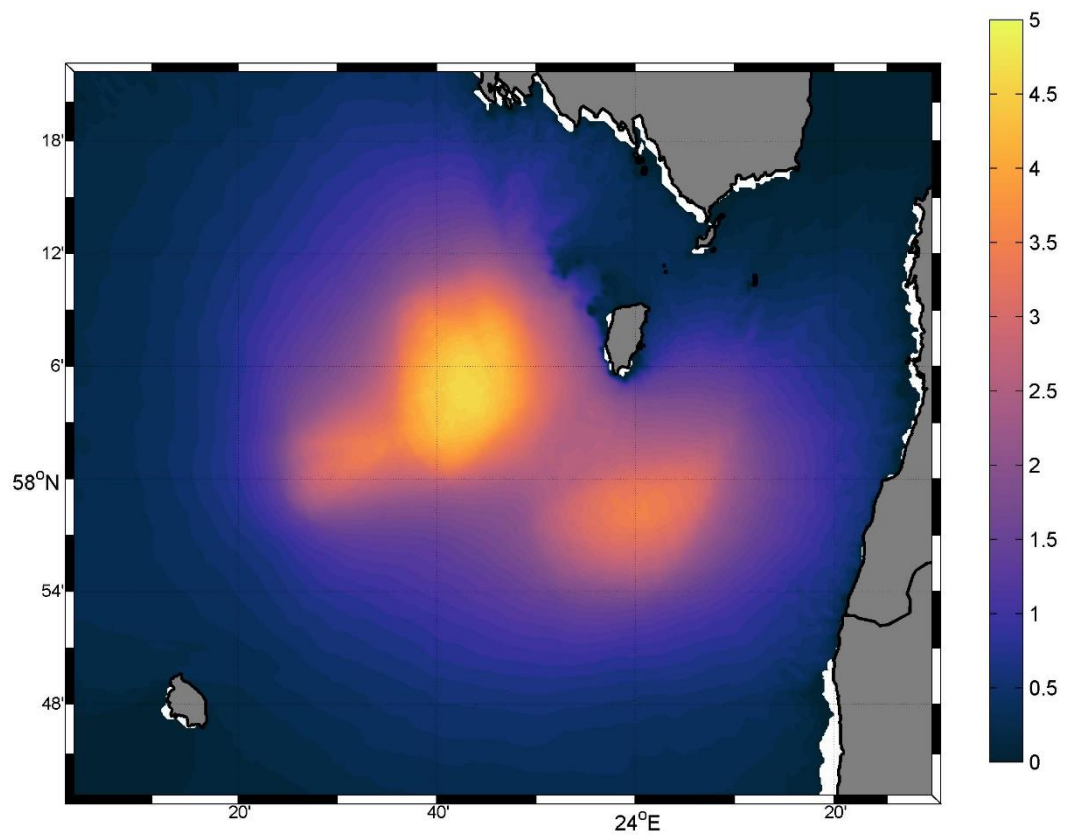
Joonis 3.3.4. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine läänetuulega aladele 1-3 paigutatud tuulikute korral.



Joonis 3.3.5. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine kagutuulega aladele 1-3 arendusalale paigutatud tuulikute korral.

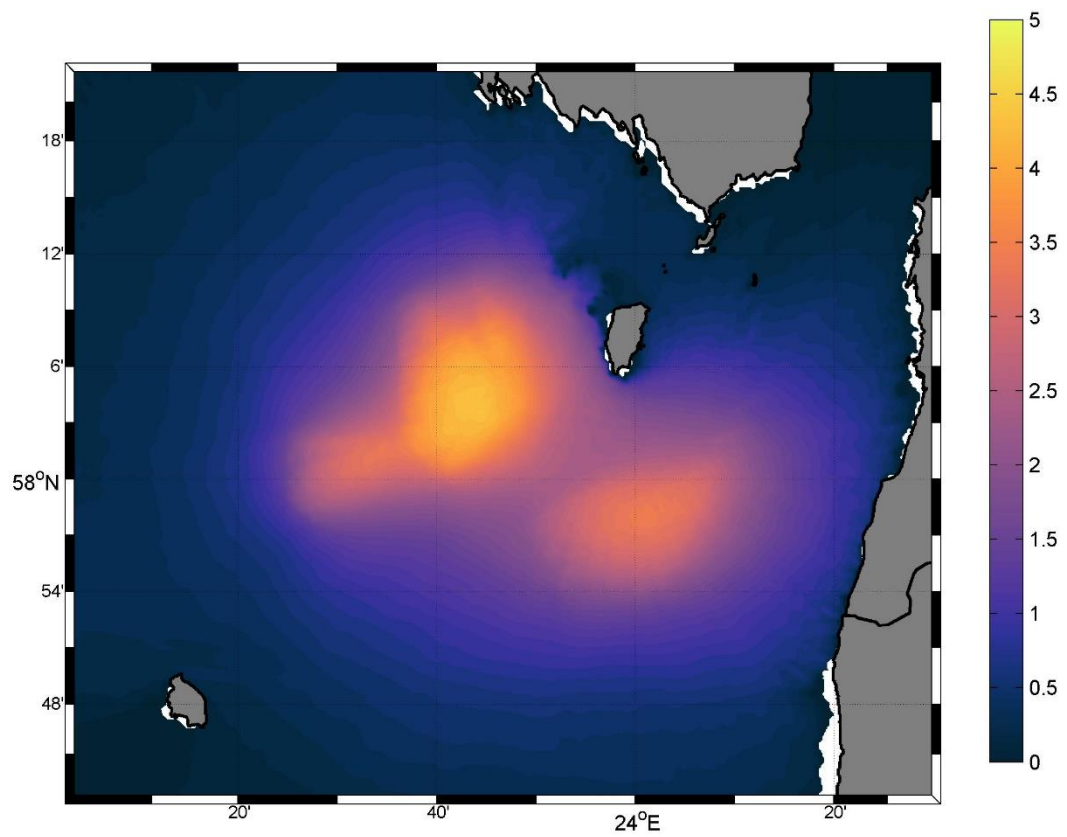


Joonis 3.3.6. Olulise laine kõrguse (cm) vähenemine loodetuulega aladele 1-3 arendusalale paigutatud tuulikute korral.

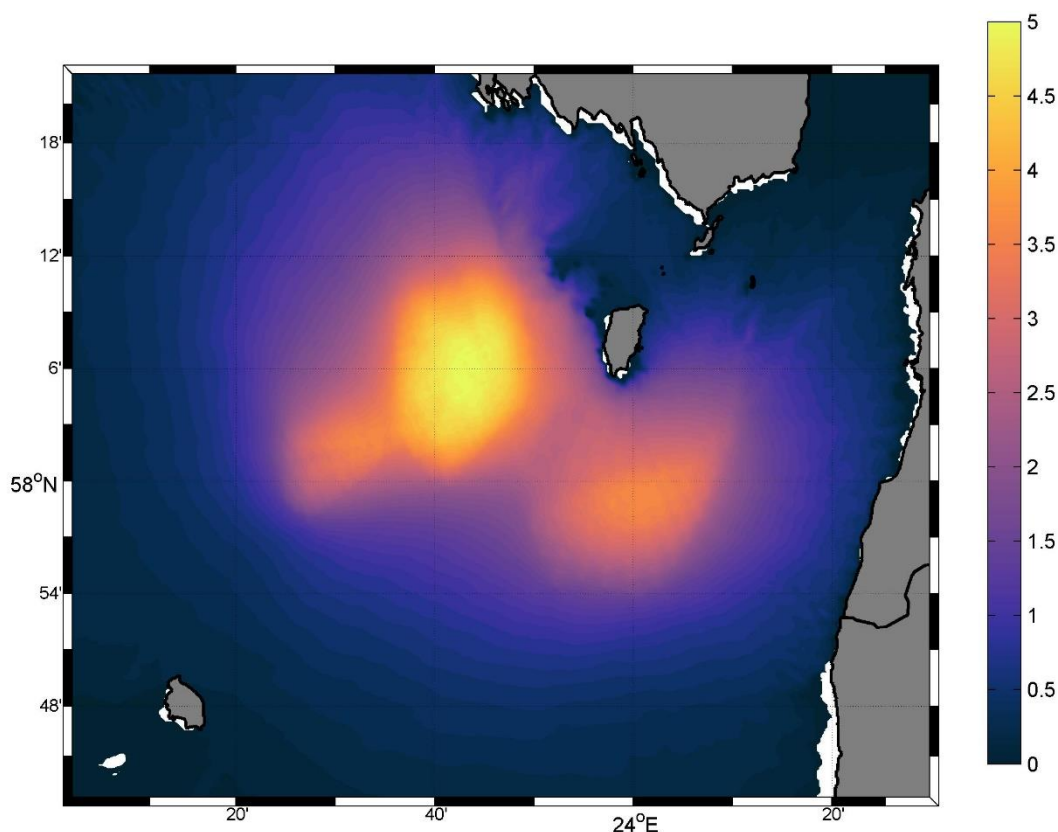


Joonis 3.3.7. Olulise laine kõrguse (cm) keskmine vähenemine kolme arendusala koosmõjul.





Joonis 3.3.8. Olulise laine kõrguse (cm) keskmine vähenemine suvel kolme arendusala koosmõjul.



Joonis 3.3.9. Olulise laine kõrguse (cm) keskmine vähenemine talvel kolme arendusala koosmõjul.

### 3.3. Veesamba füüsikalised parameetrid

Joonis 3.3.1 - 3.3.6 on toodud keskmised pinna- ja põhjakihi soolsused hetkeolukorra ning erinevate tuuleparkide olemasolu korral kahe aasta keskmisena ning suve- ja talvekuude keskmisena.

Liivi lahte iseloomustab tugev soolsuse kagu-loodesuunaline gradient. Suurimad pinnakihi soolsuse väärtused on Irbe väinas ning väiksemad lahe lõuna- ja idapoolses osas, kus Daugava jõevoolu mõju on suur ning soolsus alla 3 g/kg. Pärnu lahe siseosas on Pärnu jõe mõju tõttu soolsus samuti madal, alla 4 g/kg. Sesoonselt on pinnakihi soolsus kõrgem talvel ja madalam suvel. Selle tingib peamiselt sesoonsus stratifikatsioonis. Suvel on stratifikatsioon tugev ning Läänemere avaosast pärit soolasem vesi seguneb väga aeglaselt ülemise, vähem tiheda kihiga, mistõttu on alumises kihis soolasem ja ülakihis magedam vesi. Talvel on veesammas läbi

segunenud ja nii on ka soolsus vertikaalselt ühtlane, st. pinnakihi soolsus on talvel suurem kui suvel. Seetõttu asetsevad pinnakihi soolsuse jaotuse horisontaalsed isojooned suvel ja talvel erinevates asukohtades. Nt. võib sellise soolsusega vett, mis suvel asub Kolka neeme lähistel leiduda talvel Kihnuga samal pikkuskraadil.

Sarnaselt pinnakihile, on ka põhjakihi soolsuse jaotus Liivi lahes ruumiliselt varieeruv. Suurimad soolsused on lahe sissepääsu lähistel ning estuaarsele tsirkulatsioonile omaselt liigub soolakeel piki Kolka poolsaart basseini lääneosas. Lahe põhjaosas on meri madalam ja põhjalähedane soolsus väiksem.

Soolsuse üldist jaotust Liivi lahes tuulepargid ei mõjuta, see tähendab, et suuremastaapsed gradiendid jõe suudmete, avalahe ja väinade vahel eksisteerivad ka koos tuuleparkidega. Võrreldes sesoonsete muutustega pinnakihi soolsuses on parkide poolt tekitatud muutus Liivi lahe soolsuse jaotustele tagasihoidlik.

Lokaalne mõju tuuleparkide läheduses on tuvastatav. Nii vertikaalse segunemise mõjutamine, aga ka hoovuste muutmine mõjutavad potentsiaalselt soolsuse välju. Soolsuse erinevused pinna- ja põhjakihis tuuleparkide lähistel on toodud joonistel 3.3.7 - 3.3.12.

Osutub, et ala 1 kasutuse puhul tuuleparkide piirkonnas pinnakihi soolsus valdavalt langeb. Alast 1 põhjas ja lõunas pinnakihi soolsus mõnevõrra suureneb. Kui alale 1 lisaks võtta kasutusele ka ala 2, siis pinnakihi soolsuse suurenemise tendents parkidest lõunas süveneb. Pinnakihi soolsuse vähenemine on intensiivseim kõigi alade koosmõjul. Kõige suurem muutus on tuvastatav ala 3 piirkonnas, kus soolsuse vähenemine ulatub 0,1 g/kg. Mandriranniku lähedal ja Pärnu lahe suudmes pinnakihi soolsus kolme pargi koosmõjul veidi suureneb.

Ka põhjakihis keskmine soolsus tuulepargialadel valdavalt väheneb. Erinevus olemasoleva olukorraga on põhjakihis võrreldes pinnakihiga mõnevõrra väiksem ning jääb alla 0,1 g/kg. Sarnaselt pinnakihiga, on mõju tugevaim parkide koosmõjul st. kõigi kolme pargi koostoimel. Viimasel juhul on parkide piirkonnast edelas tuvastatav soolsuse suurenemise signaal.

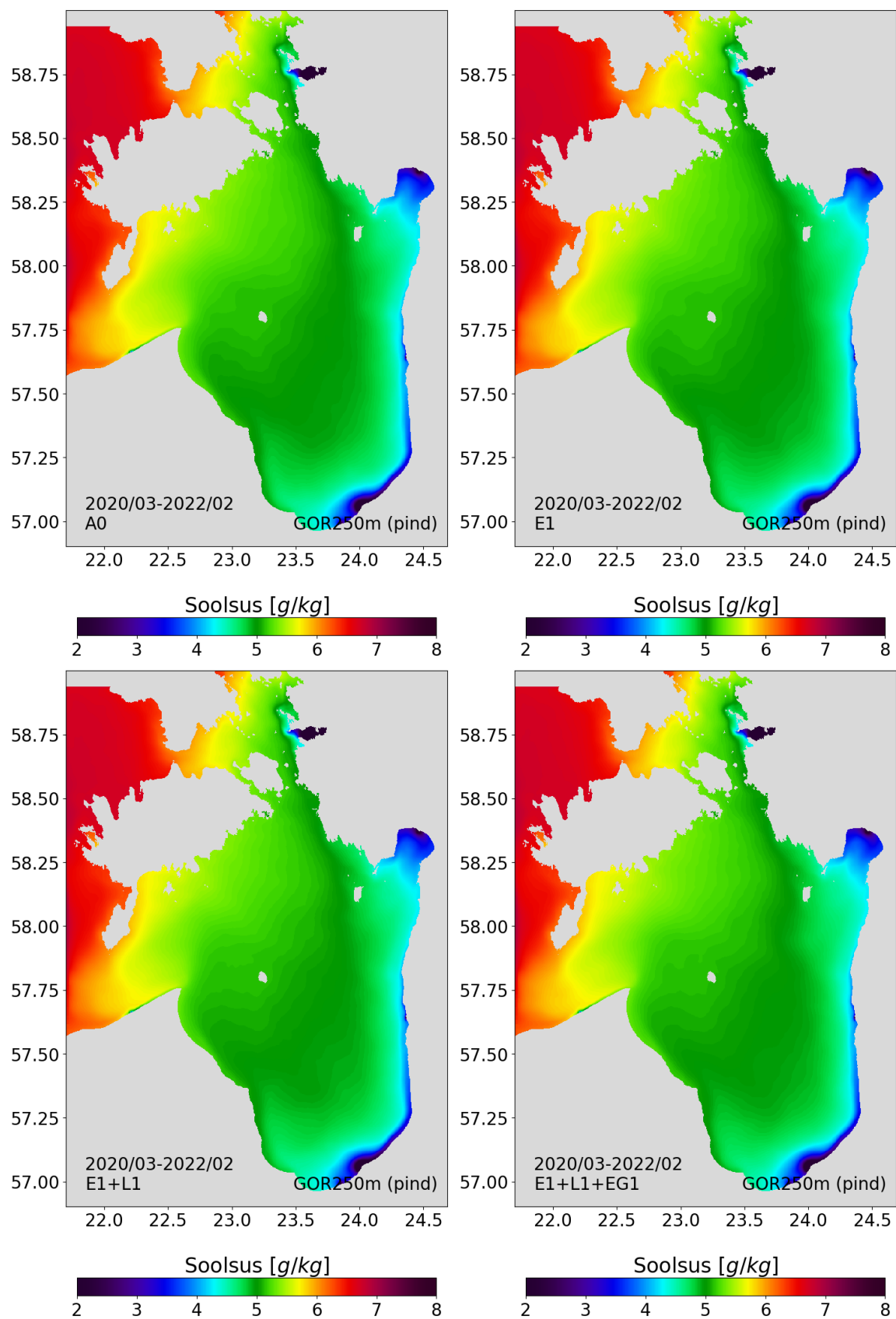
Võrdlus talviste ja suviste pinna- ja põhjakihi soolsuste olemasoleva olukorra ja tuuleparkidega stsenaariumite vahel tuuleparkide lähipiirkonnas viitab, et kolme pargi koosmõjul on sesoonselt ja kihiti mitmesuunaline mõju. Tugevaim mõju avaldub reeglina kui kõik kolm parki rajatakse.

Mõju on selgepiirilisem suvel, stratifitseeritud tingimustes. Põhjakihi soolsus tuuleparkide alal suvisel ajal kahaneb. Seevastu tuuleparkidest edelas, sügavamal alal, kust peaks toimuma soolasema vee transport tuuleparkide piirkonda, soolsus suureneb. Pinnakihi soolsus

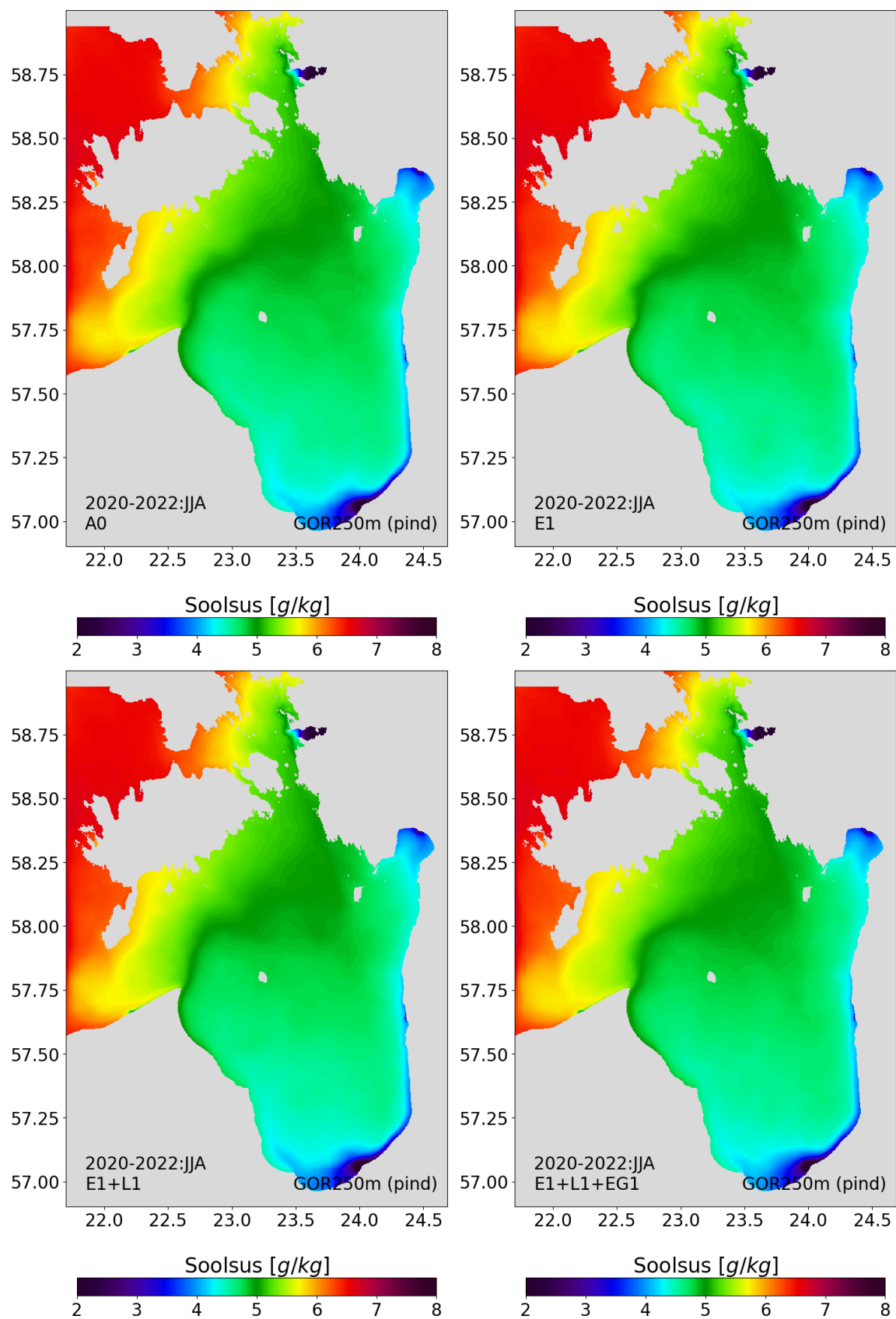
tuuleparkide piirkondades samuti pigem kahaneb, eriti alal 3, kuid tuuleparkide ümbruses soolsus pigem kasvab. Võib arvata, et sellised suundumused on seotud nõrgema transpordiga tuulepargi aladel ja kompensatsiooniks moodustuvate tugevamate hoovustega tuulepargi ümbruses. Teisisõnu soolase vee transport tuulepargi aladele langeb, kuid tõuseb seevastu naaberaladel.

Talvisel perioodil on muutused pinna- ja põhjakihis sarnased. Muutuste mustrid on väga varieeruvad ja ilmselt võib arvestatava osa kirjutada siin mittelineaarsete protsessidega seotud mudeli määramatuse arvele, aga üldine tendents on ka siin, et pargialadel pigem soolsus veidi väheneb ning pargist eemal veidi kasvab.

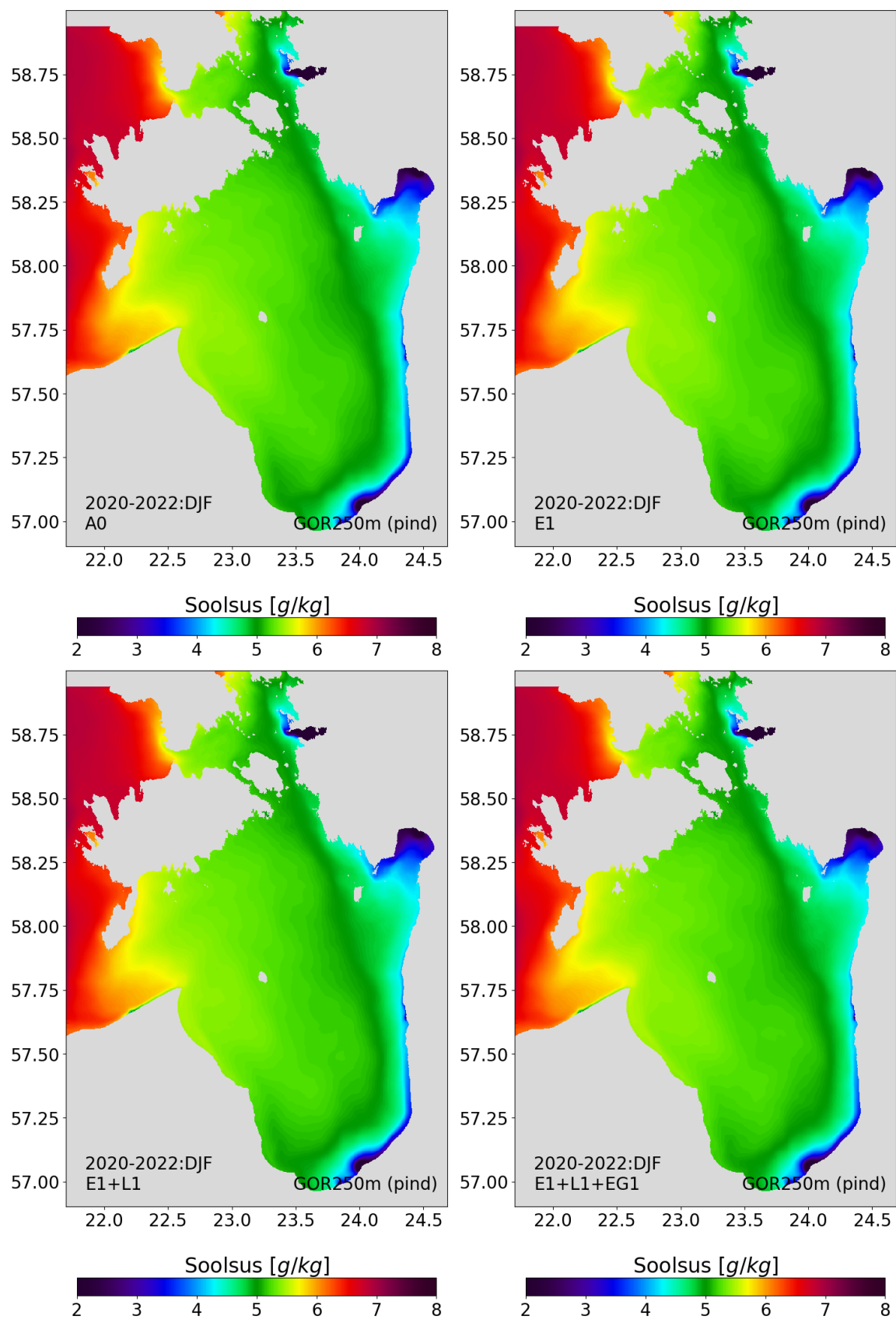




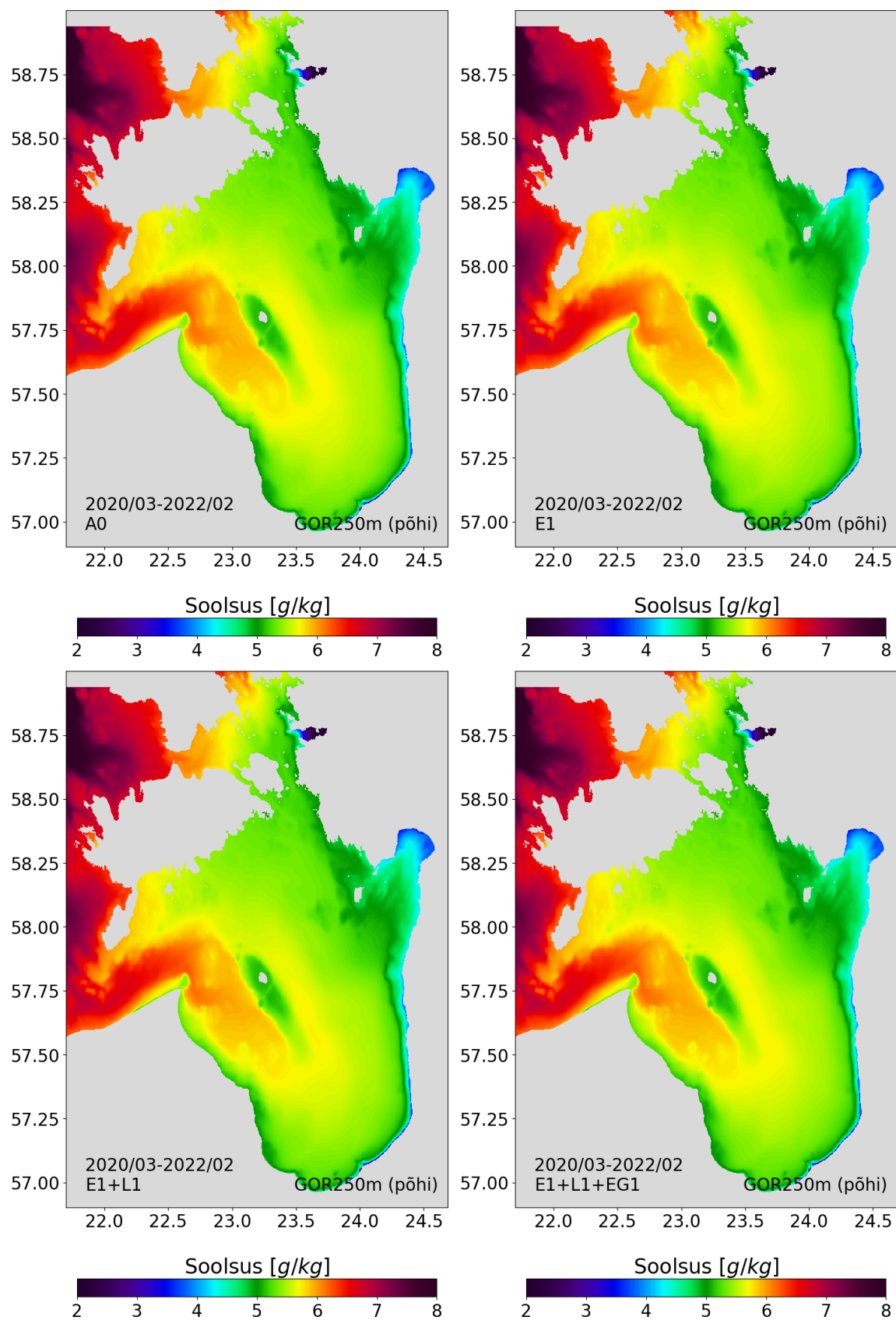
Joonis 3.3.1: Pinnakihi keskmine soolsuse jaotus nelja stsenaariumi korral.



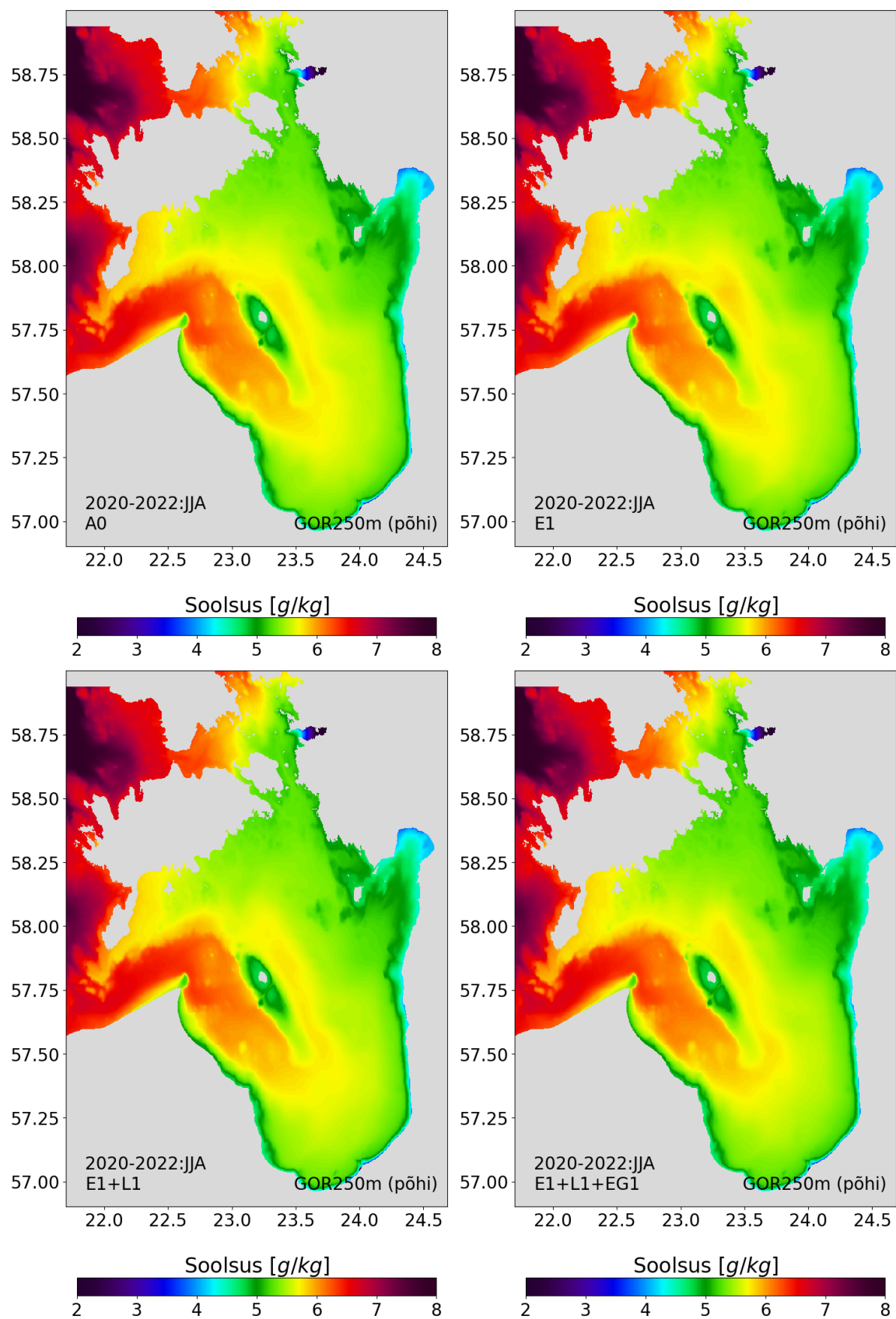
Joonis 3.3.2: Pinnakihi keskmine soolsuse jaotus suvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



Joonis 3.3.3: Pinnakihi keskmine soolsuse jaotus talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.

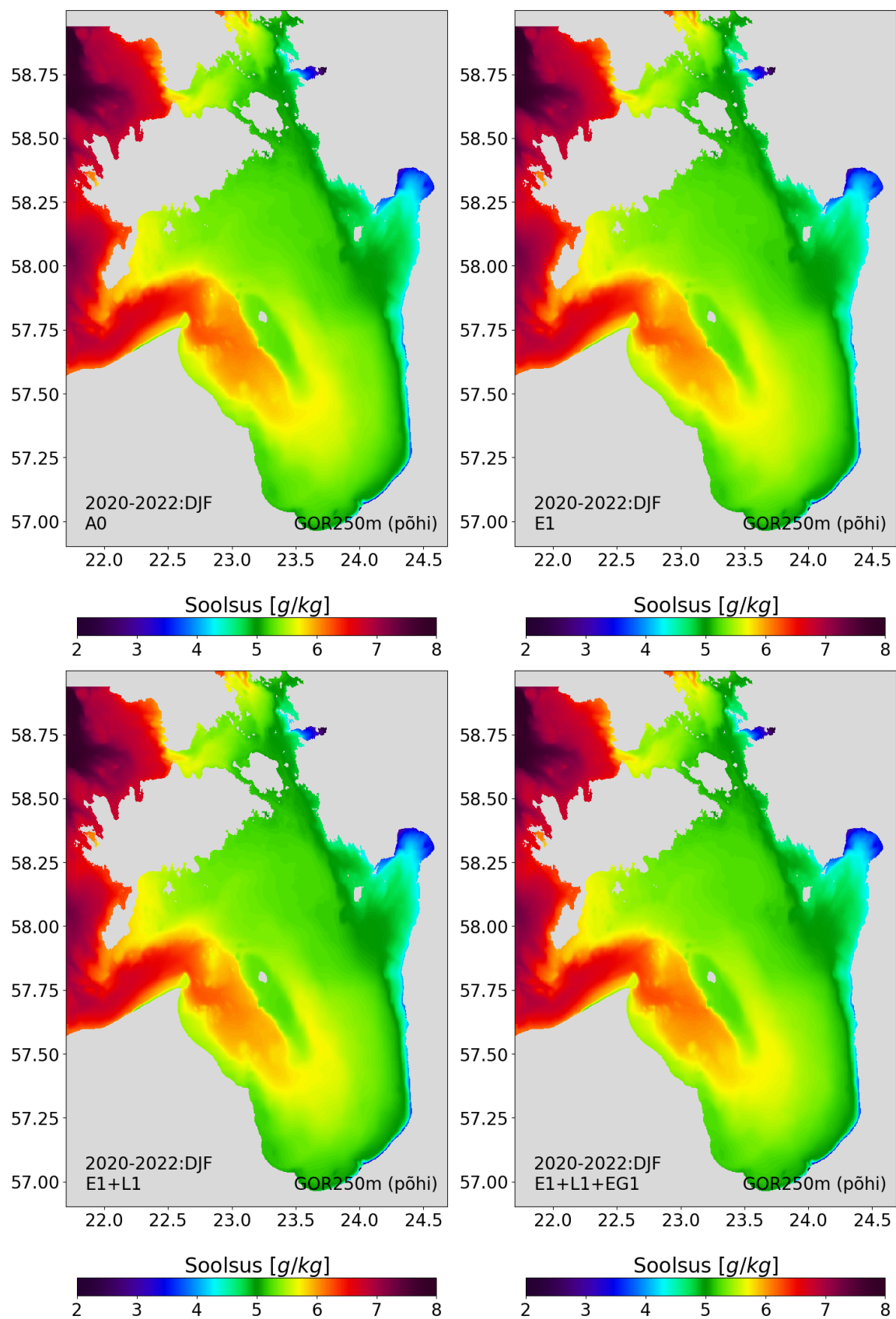


Joonis 3.3.4: Põhjakihi soolsuse jaotus nelja stsenaariumi korral.

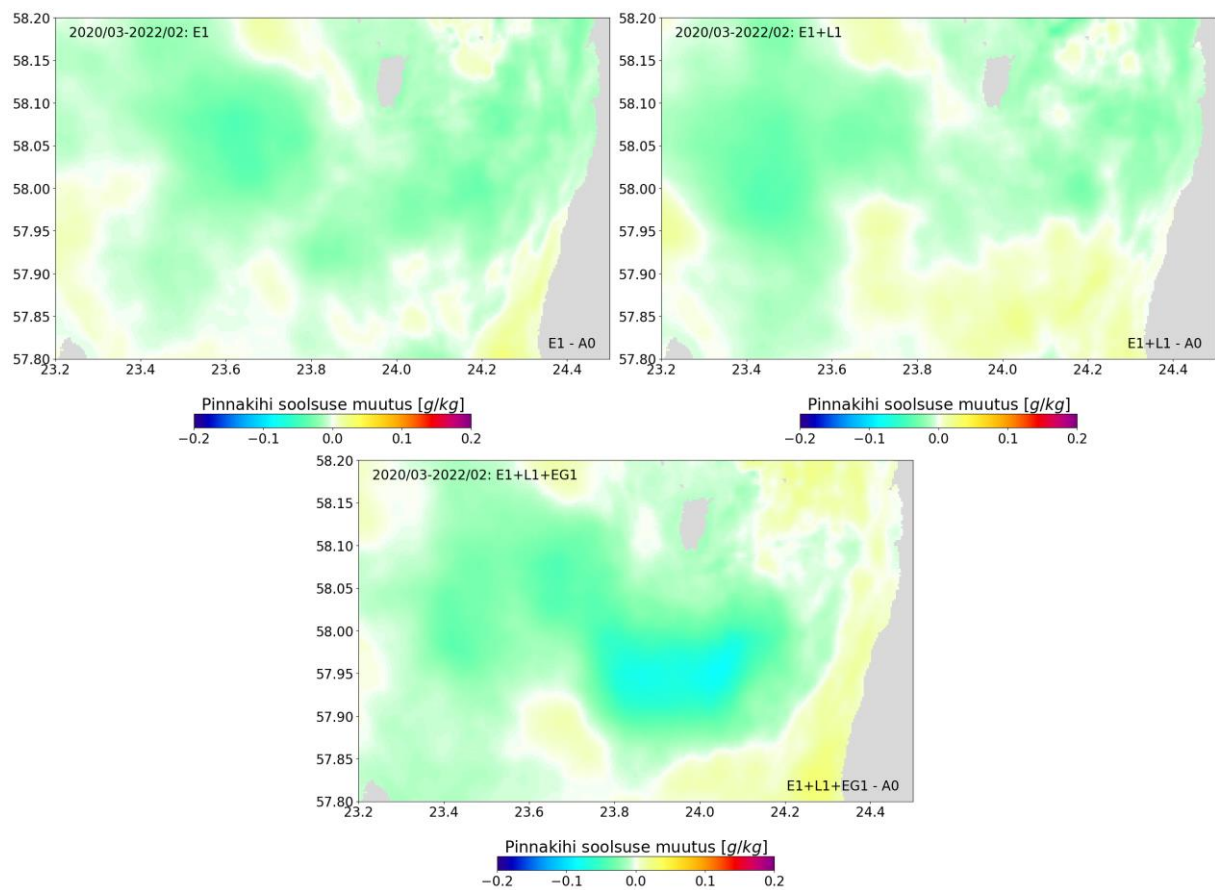


Joonis 3.3.5: Põhjakihi keskmine soolsuse jaotus suvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.

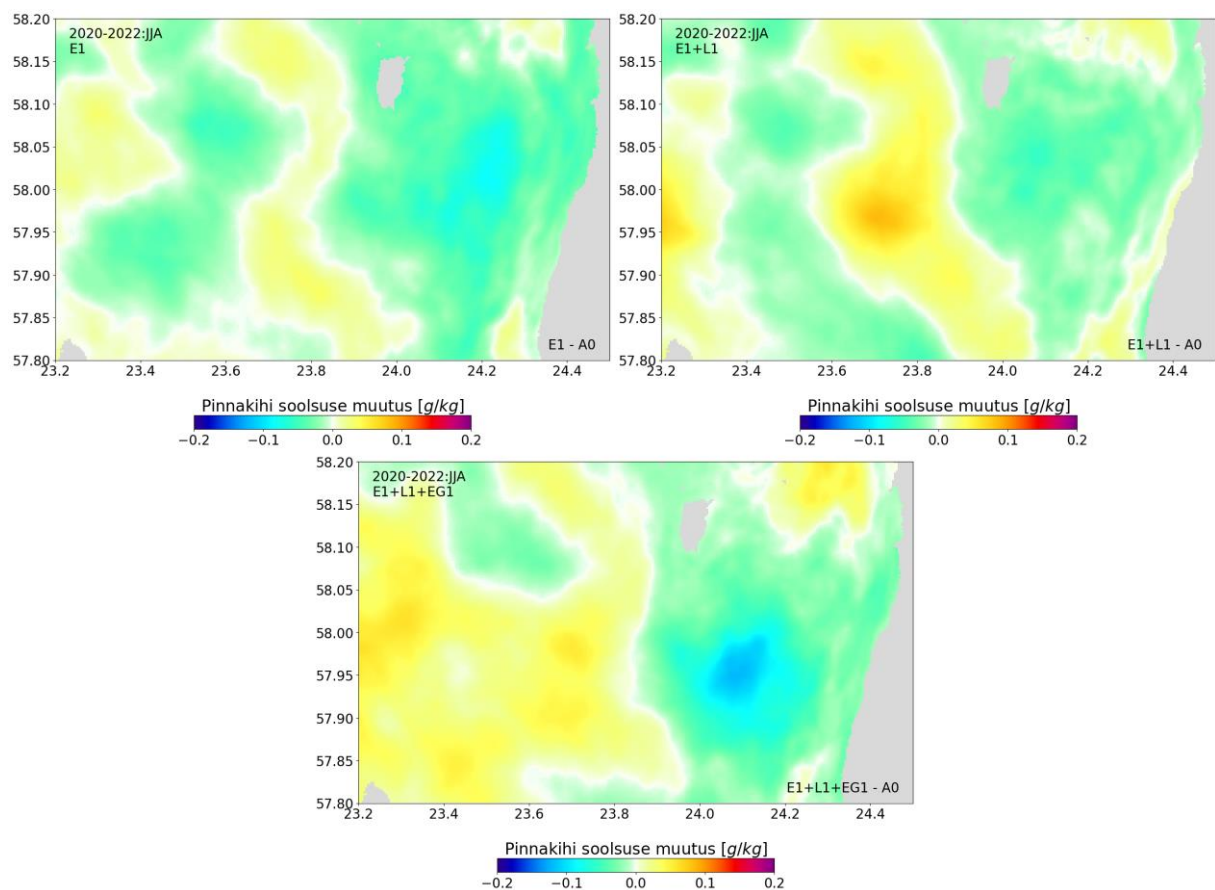




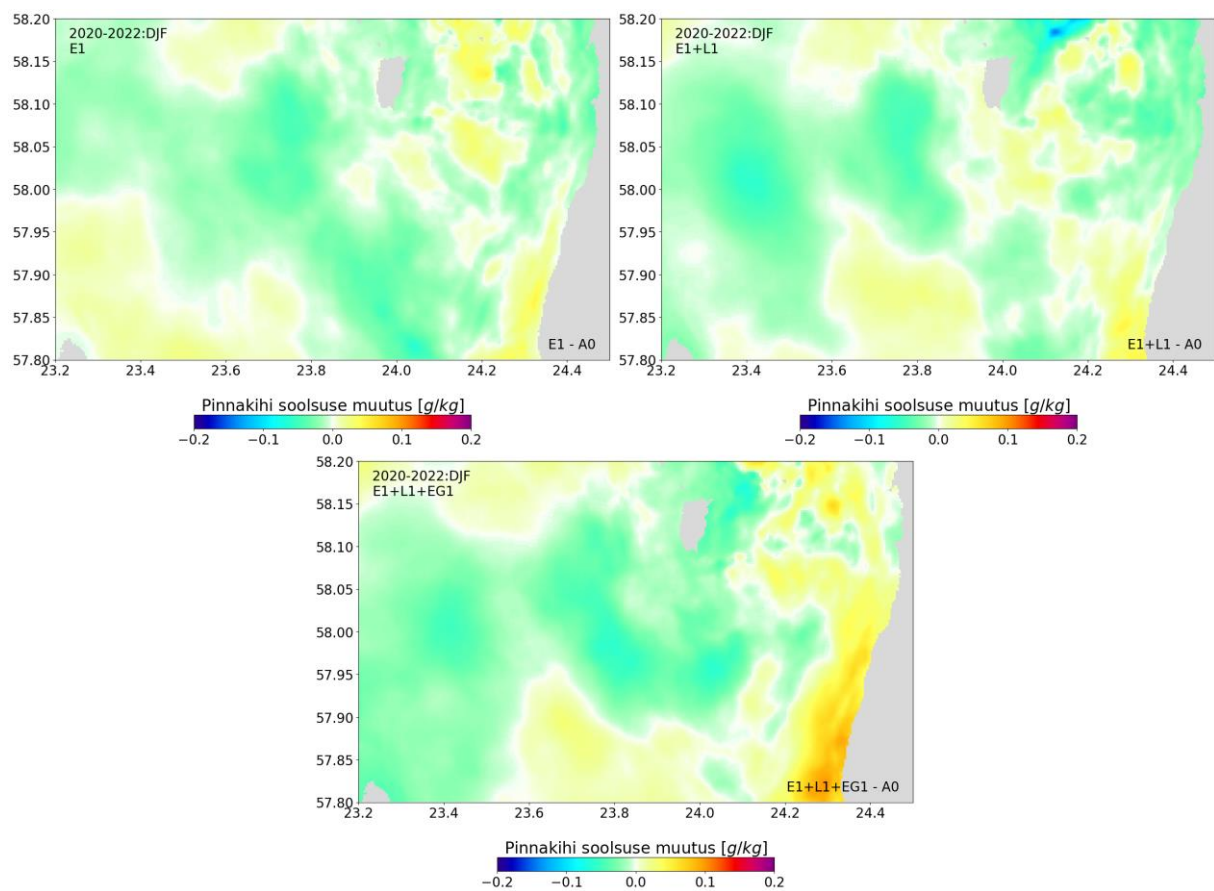
Joonis 3.3.6: Põhjakihi keskmine soolsuse jaotus talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



Joonis 3.3.7: Pinnakihi soolsuse erinevused kolme stsenaariumi korral.

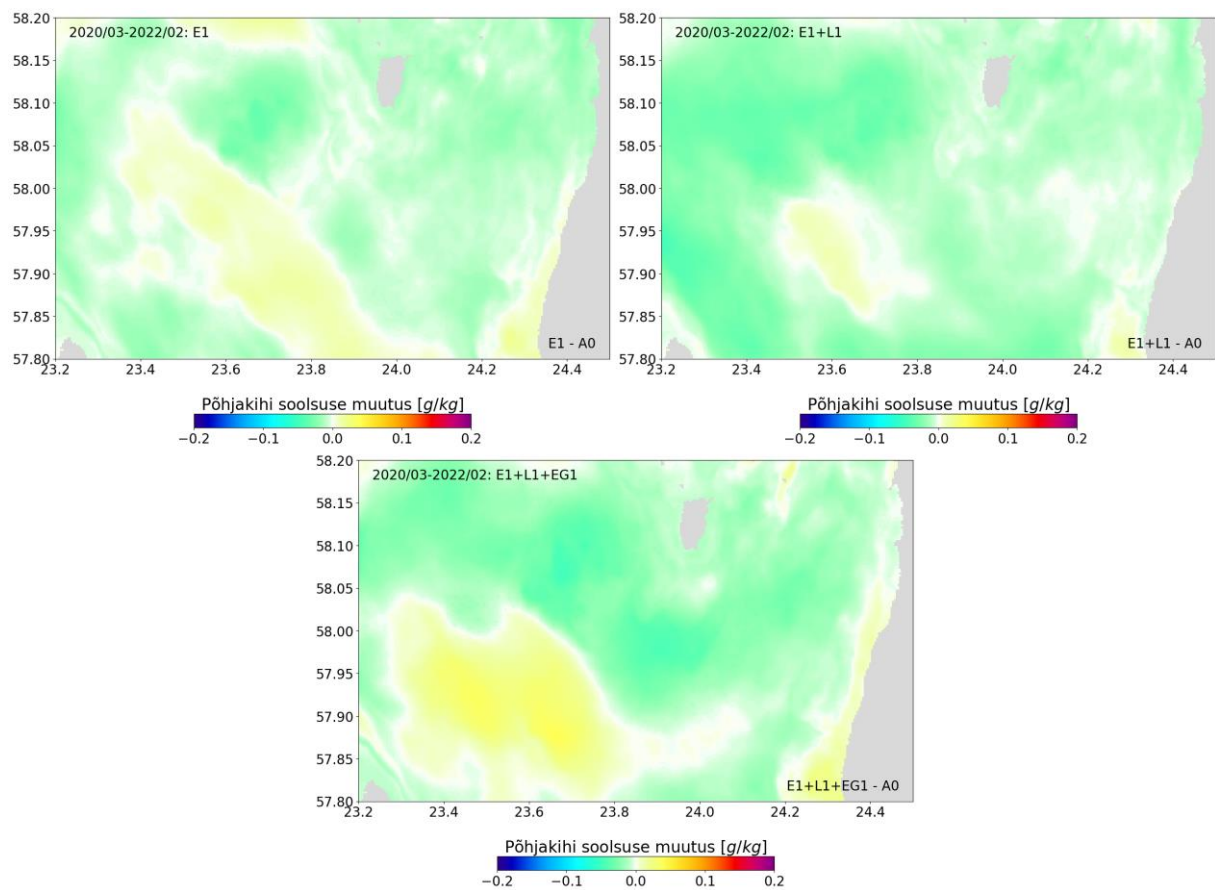


Joonis 3.3.8: Pinnakihi soolsuse muutus suvisel perioodil kolme stsenaariumi korral.

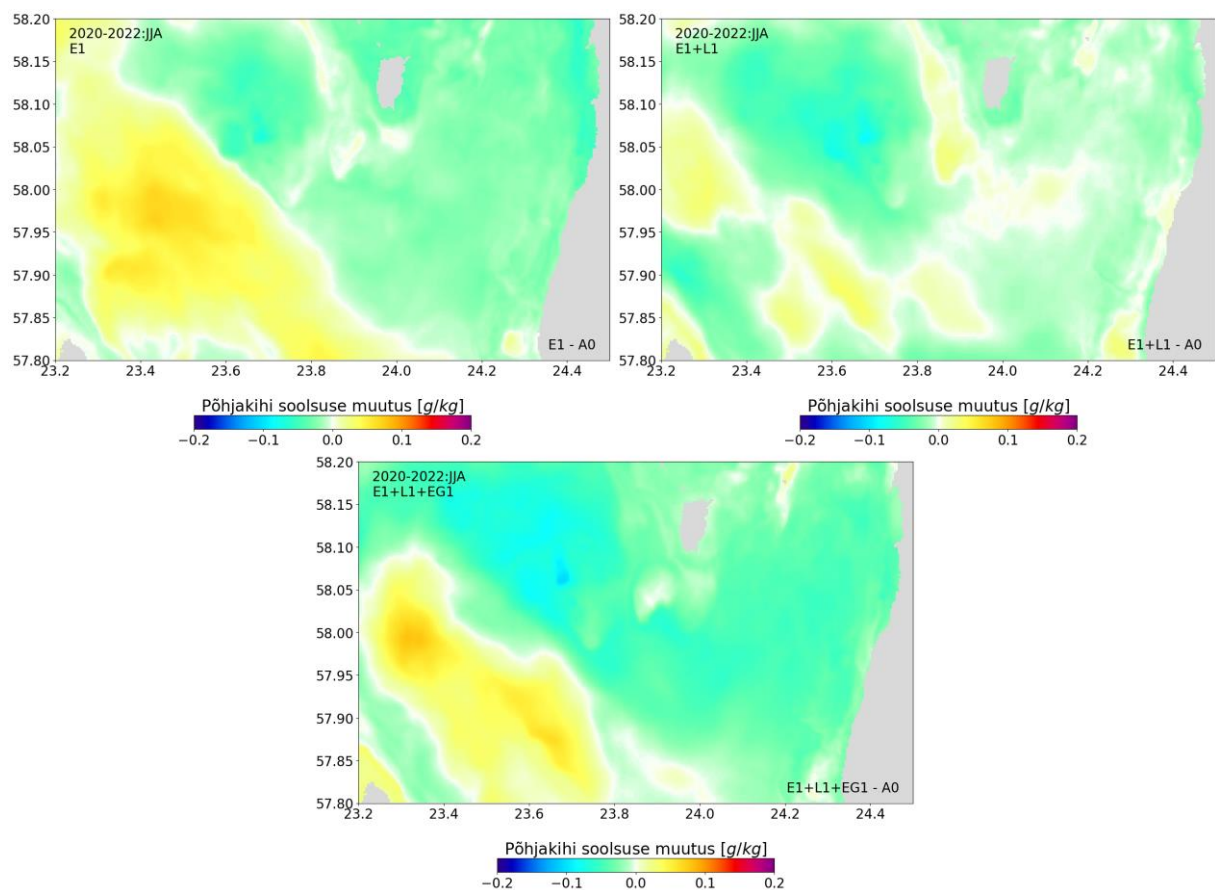


Joonis 3.3.9: Pinnakihi soolsuse muutus talvisel perioodil kolme stsenaariumi korral.

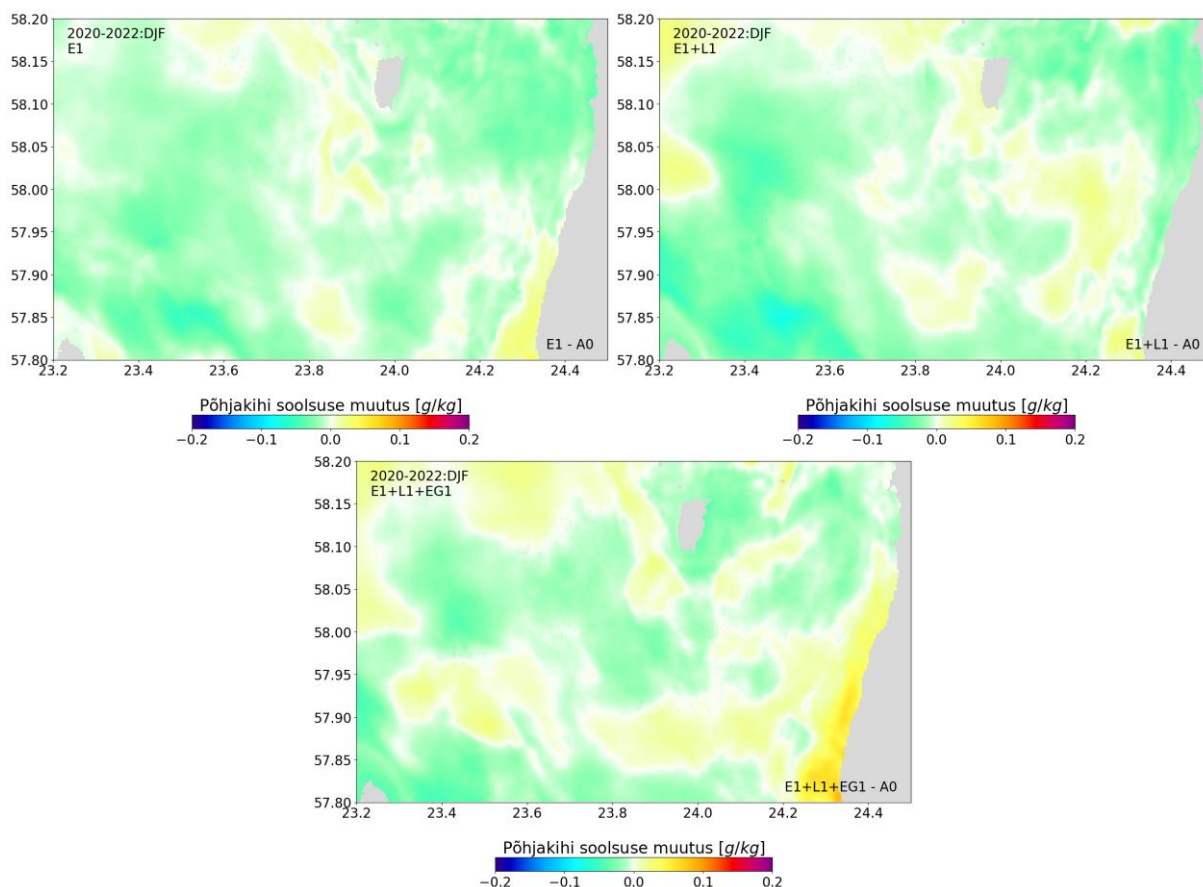




Joonis 3.3.10: Põhjakihi soolsuse erinevused kolme stsenaariumi korral.



Joonis 3.3.11: Põhjakihi soolsuse erinevus suvisel perioodil kolme stsenaariumi korral.



Joonis 3.3.12: Põhjakihi soolsuse erinevus talvisel perioodil kolme alternatiivi korral.

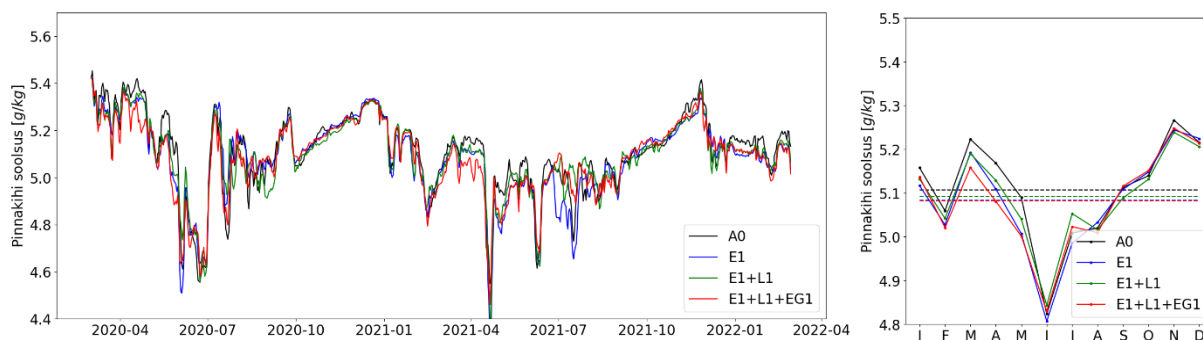
Joonisel 3.3.13 ja 3.3.14 on toodud keskmise soolsuse ajalised käigud ala 1 piirkonnas pinna- ja põhjakihis. Suurimad soolsused põhjakihis on sesoonselt hilissuvel/varasügisel augustis-septembris ning väikseimad soolsused pinnakihis juunis, mil kevadise suurvee mõju on jõudnud tuulepargi piirkonda ning tekkinud on tugevam stratifikatsioon. Tuuleparkide väike mõju soolsusele on nähtav nii pinna- kui põhjalähedases kihis. Kevadel langeb soolsus pinnakihis ligikaudu 0,05-0,09 g/kg, seejuures on muutus suurim, kui rajada kõik kolm parki. Veelgi väiksem vähenemine on pinnakihi soolsuses näha talvel. Ülejäänud aastaegadel selget muutust välja ei joonistu.

Põhjalähedases kihis on soolsuse vähenemise signaal näha kevadest sügiseni. Kõige suurem erinevus; ligi 0,1 g/kg esineb augustis ning see on olemasoleva olukorra ja stsenaariumi vahel, mille kohaselt töötavad kõik kolm parki. See tendents (kolme pargi mõjul on soolsuse vähenemine põhjakihis suurim) on eristatav kogu stratifikatsiooni tugevnemise perioodi aprillist augustini.

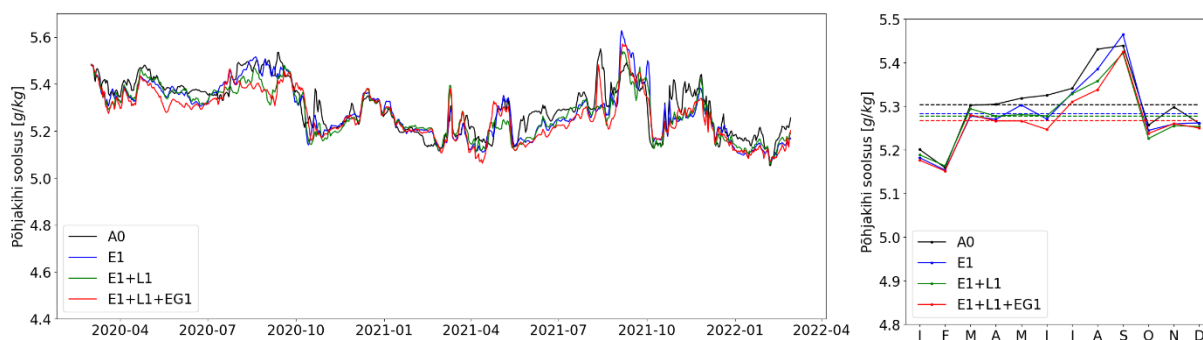
Aasta keskmised muutused on nii pinna- kui põhjalähedases kihis oluliselt väiksemad.



Simulatsioonide tulemused viitavad, et muutused ala 1 soolsuses aset leiavad, kuid võrreldes loodusliku muutlikkusega, mis pinnakihi on vahemikus 4,4 kuni 5,4 g/kg ja põhjakihi 5,1 kuni 5,6 g/kg; on tuuleparkide rajamisega kaasnevad muutused reeglina alla 10%.



Joonis 3.3.13: Pinnakihi keskmise soolsuse ajaline käik kahe aasta vältel (vasakul) ja sesoonselt (paremal) alal 1. Horisontaaljoontega on näidatud kogu aasta keskmised.

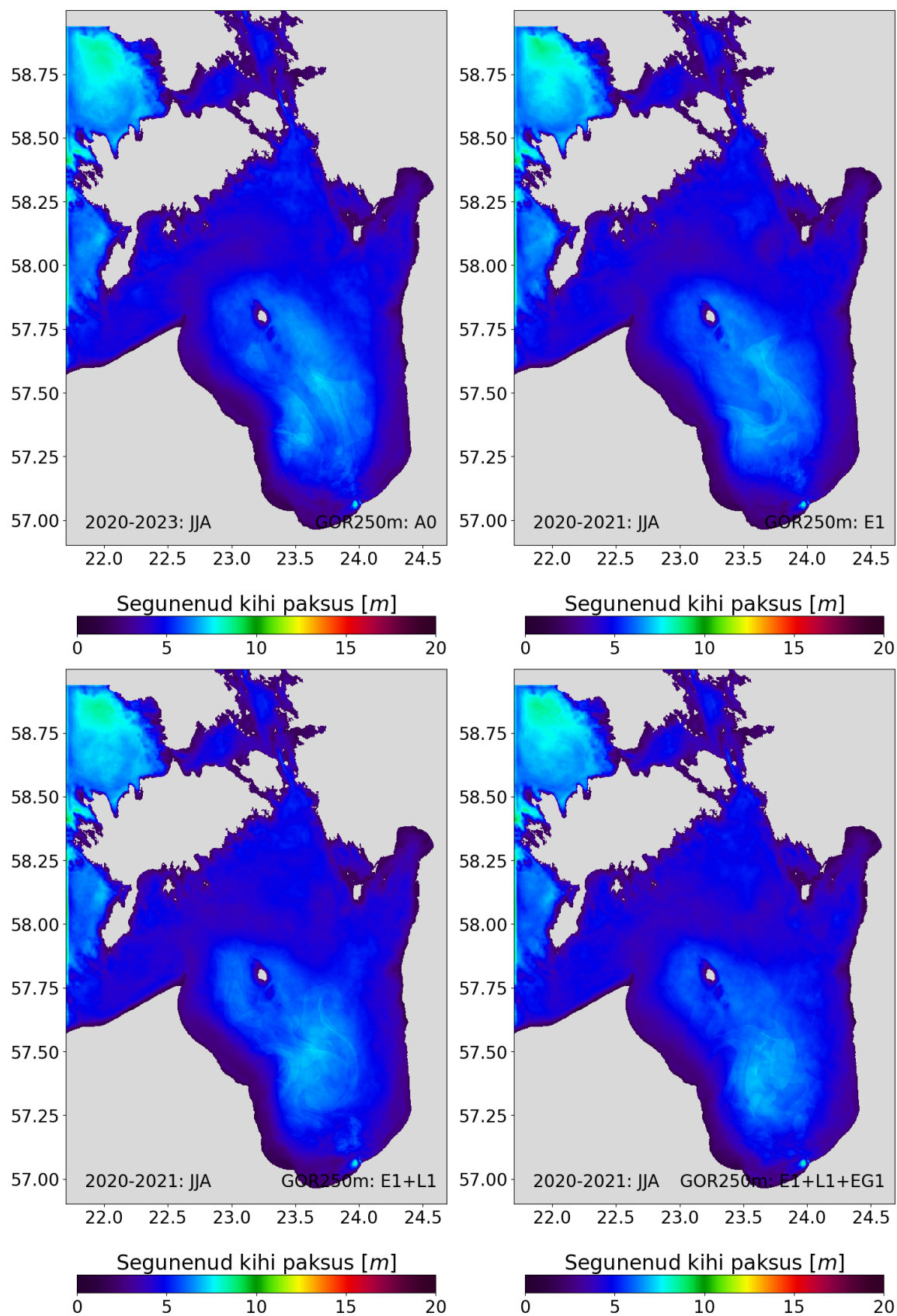


Joonis 3.3.14: Põhjakihi keskmise soolsuse ajaline käik kahe aasta vältel (vasakul) ja sesoonselt (paremal) alal 1. Horisontaaljoontega on näidatud kogu aasta keskmised.

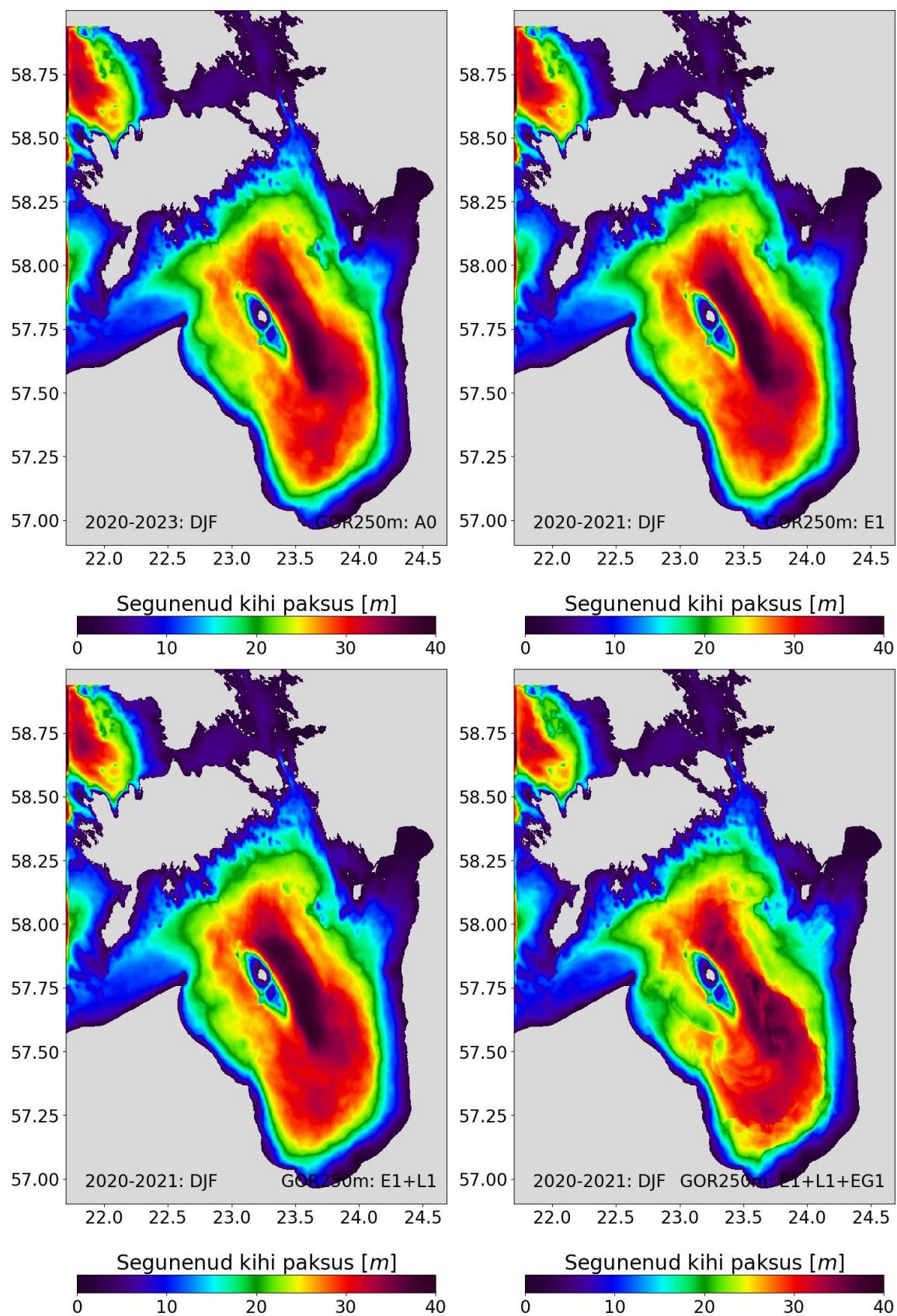
Joonistel 3.3.15 ja 3.3.16 on toodud keskmise segunenud kihi paksuse ruumilised jaotused suvise ja talvise sesooni jaoks. Segunenud kihi paksus on oluline primaarproduksioonile. Kui kiht on oluliselt suurem eufotse kihi paksusest, siis tugevat primaarproduksiooni aset ei leida. Stratifikatsioon Liivi lahes on tugevaim suvel. Sel aastaajal on segunenud kihi paksus tunduvalt väiksem eufotsest kihi paksusest ning segunenud kihi paksus tavaliselt primaarproduksiooni ei piira. Talvisel perioodil on stratifikatsioon nõrk või olematu ning veesammas on enamasti läbi segunenud pinnalt põhjani. Stratifikatsioon tekib kevadel ja esmaselt pigem magedama vee leviku tõttu. Kuigi kevadel on stratifikatsioon nõrk, on see piisav, et tagada kevadõitsengu jaoks vajalik stabiilne ülemine kiht. Basseinimastaapi segunenud kihi paksuse jaotustele tuuleparkide rajamisel mõju ei ole.

Joonistel 3.3.17 kuni 3.3.19 on toodud segunenud kihi paksuse ruumilised jaotused tuuleparkide lähipiirkonnas kahe aasta keskmisena ning suvise ja talvise sesooni jaoks. Lokaalsed muutused

leiavad aset. Tuuleparkide alade lähipiirkonnas segunenud kihi paksus pigem väheneb ning see tendents süveneb tuuleparkide lisandudes. Absoluutväärtustes (m) on suvel muutused tagasihoidlikumad ja talvel suuremad. Samas, pidades silmas, et suvel on segunenud kiht niigi õhuke, on protsentuaalselt muutus suvel võrreldes talvega vähemalt samaväärne. Kolme tuulepargi koostoimel moodustub Kihnust lõunas ja edelas võrdlemisi suur ala, kus segunenud kihi paksus väheneb. Pargialadest kaugemal, eriti lahe keskosas (Ruhnu suunas) segunenud kihi paksus suureneb. Viimast võib selgitada konvergenstsooni tekkega, mis on seotud tuulepargi poolt põhjustatud transpordi aeglustumise ülemises kihis. Kui domineerivas voolamise suunas on hoovus aeglustatud, siis takistuse ette tekib konvergenstsoon, tekib lokaalne daunvellingu efekt.

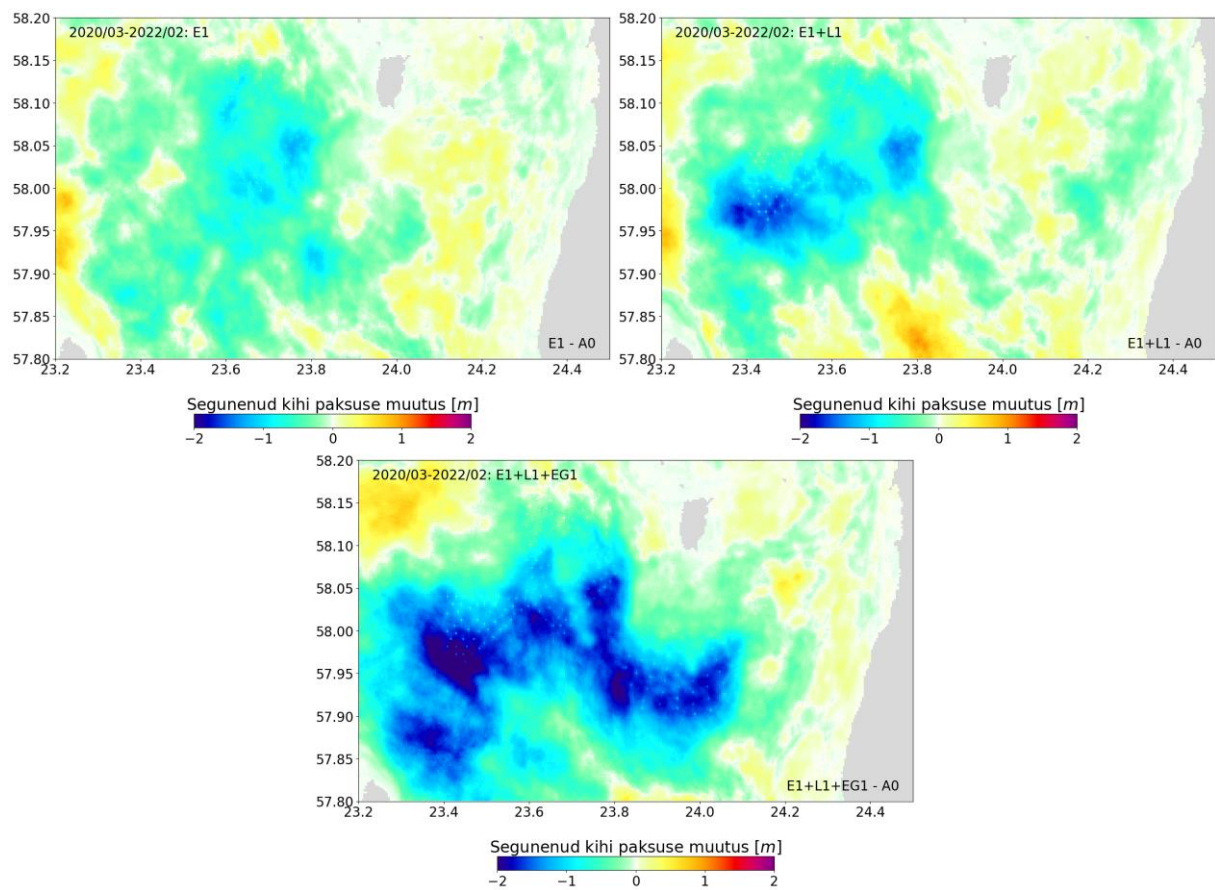


Joonis 3.3.15: Keskmine segunenud kihi paksus suvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.

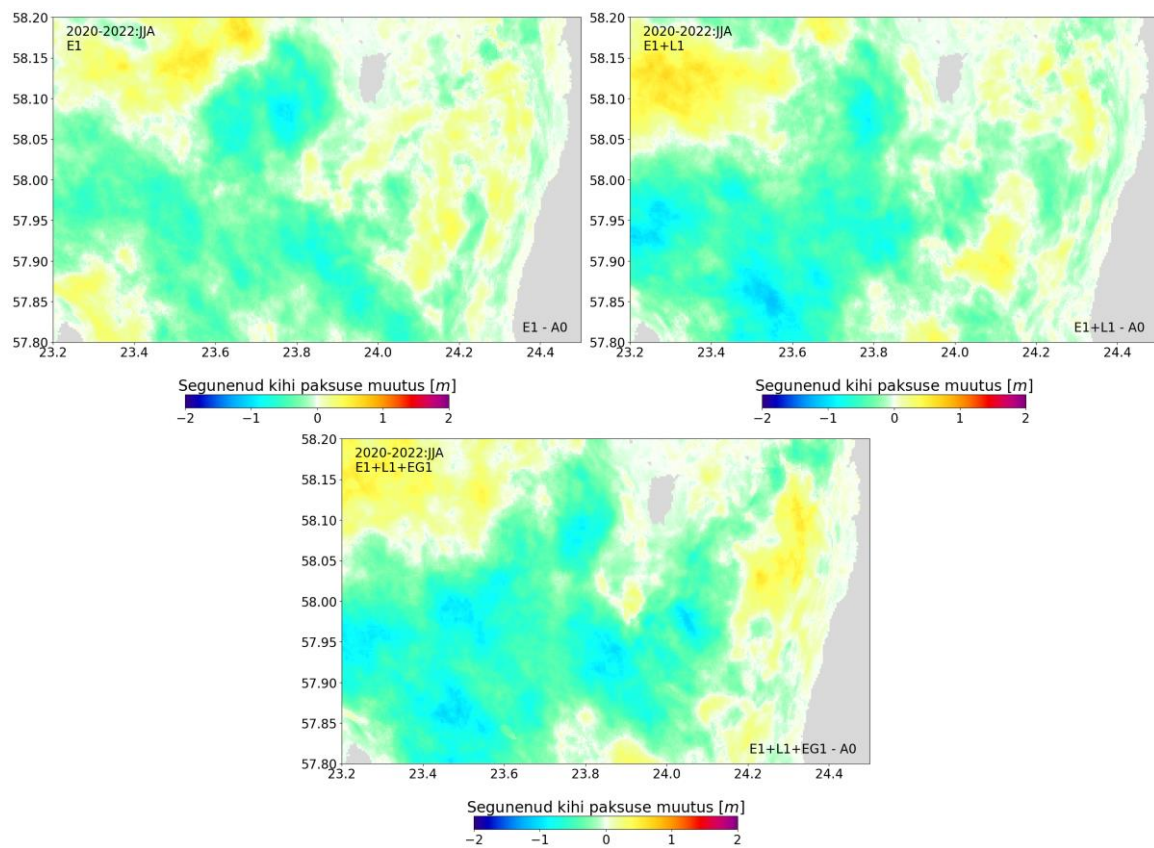


Joonis 3.3.16: Keskmine segunenud kihi paksus talvisel perioodil nelja stsenaariumi korral.



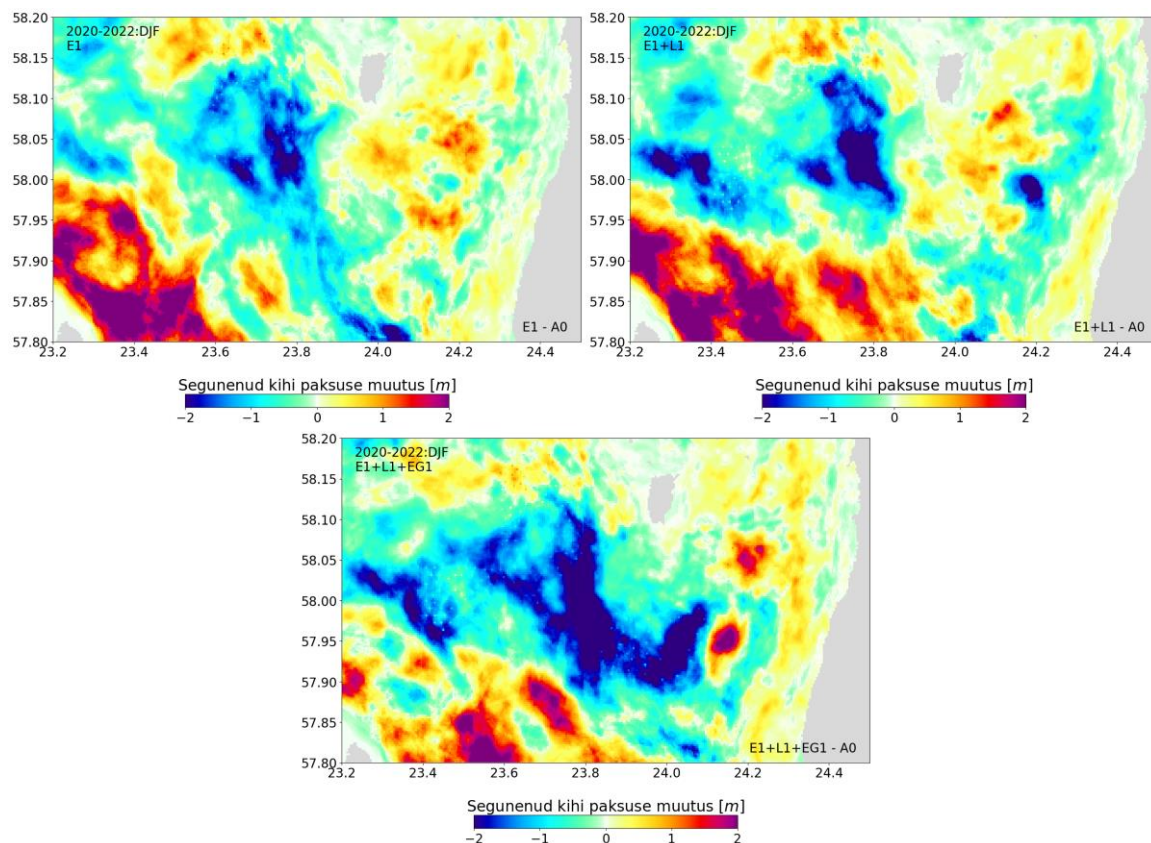


Joonis 3.3.17: Keskmine segunenud kihi paksuses muutus kolme stsenaariumi korral.



Joonis 3.3.18: Keskmine suvise segunenud kihi paksuse muutus kolme stsenaariumi korral.





Joonis 3.3.19: Keskmine segunenud kihi paksuse muutus talvisel perioodil kolme stsenaariumi korral.

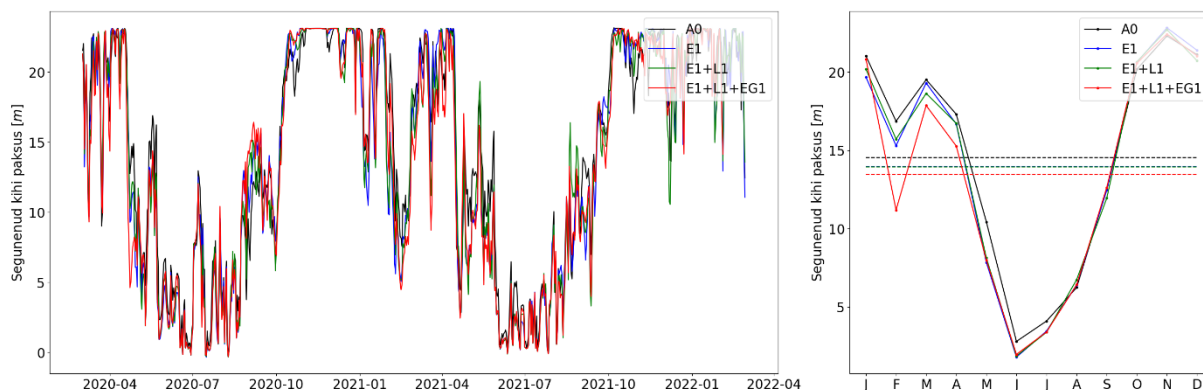
Joonisel 3.3.20 on toodud keskmise segunenud kihi paksuse ajaline käik kahe aasta vältel ning sesoonne käik tuulepargi ala 1 piirkonnas. Suurim paksus on sügis/talvisel perioodil, mil konvektiivse segunemise tuule ja lainete poolt põhjustatud vertikaalse segunemise tõttu stratifikatsioon puudub ning väiksem paksus hiliskevadel/varasuvel kui stratifikatsioon tugevneb. Aegreas on näha tugev lühiajaline muutlikkus, mis on tingitud mitmesugustest sünooptilist- ja mesomastaapi protsessidest.

Tuuleparkide mõjul segunenud kihi paksus pigem väheneb hilistalvisel ja kevadisel perioodil, mõnevõrra ka suvel. Sügisel ja talve esimeses pooles on mõju pea olematu. Need perioodid langevad sesoonselt enam vähem kokku stratifikatsiooni tugevnemise ja nõrgenemise ajavahemikega. Stratifikatsiooni tugevnemise perioodil jääb parkide tõttu segunenud kihi paksus väiksemaks. Stratifikatsiooni nõrgenemise ja lagunemise perioodil mõju ei ole, st. kui konvektsiooni ja hüdrodünaamiliste protsesside käigus vertikaalse segunemise protsessid domineerivad stabiilsust loovate protsesside üle, on parkide mõju ebaoluline.

Segunenud kihi paksuse vähenemine kevadperioodil võib kaasa tuua kevadõitsengu varasemaks nihkumise. Just varakevadel on näha ka ala 3 tugevam mõju ala 1 segunenud kihi

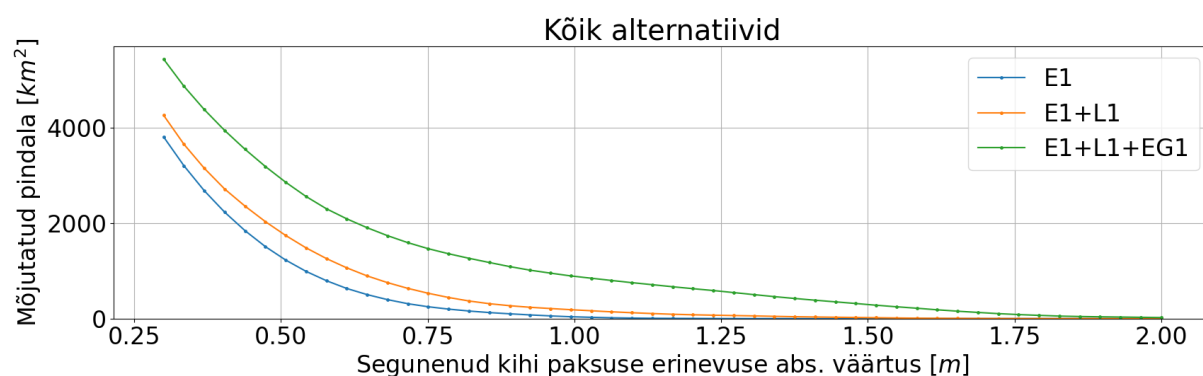
paksusele. Alates maist on muutus alal 1 sama, olenemata sellest, kas tuulikud eksisteerivad ainult alal 1 või kõigil kolmel alal.

Kogu vaadeldud perioodi segunenud kihi paksuse keskmine alal 1 vähenes lligikaudu 1 m kõigi kolme tuulepargi korral; üksnes ala 1 ning alade 1 ja 2 kasutuse korral oli mõju väiksem. Varakevadel võib mõju olla suurem.



Joonis 3.3.20: Keskmise segunenud kihi paksuse ajaline käik kahe aasta vältel ja sesoonne käik.

Joonistel 3.1.23 on toodud mõjutatud pindala sõltuvalt segunenud kihi muutusest. Seosed näitavad, et mõju kasvab tuuleparkide lisandudes. Seejuures on märkimisväärne, et kolmanda pargi lisandudes kasvab ala, kus segunenud kihi paksus muutub vähemalt 0,5 m või 1 m märgatavalt ja mittelineaarselt. Tõenäoliselt tuleb kolmanda pargi lisandudes hüppeline kasv mitme pargi mõju kumulatiivsusest.



Joonis 3.1.23: Mõjutatud pindalad sõltuvalt segunenud kihi paksuse muutuse suurusest.

Kokkuvõttes, soolsuse üldist, basseini mastapi jaotust Liivi lahes tuulepargid ei muuda. Lokaalne mõju tuuleparkide läheduses on tuvastatav. Nii vertikaalse segunemise mõjutamine, aga ka hoovuste muutmine mõjutavad potentsiaalselt soolsuse välju. Pinnakihi ja põhjalähedase kihi (st. kogu veesambas) soolsus tuulepargialade piirkonnas väheneb ning see muutus on intensiivseim kõigi alade koosmõjul.

Need muutused on selgepiirilisemad stratifitseeritud tingimustes. Pinnakihi soolsus suvel tuuleparkide piirkondades pigem kahaneb, eriti alal 3, kuid tuuleparkide lähiümbruses soolsus pigem kasvab. Võib arvata, et sellised suundumused on seotud nõrgema transpordiga tuulepargi aladel ja kompensatsiooniks moodustuvate tugevamate hoovustega tuulepargi ümbruses. Ka põhjakihi soolsus tuuleparkide alal suvisel ajal kahaneb. Seevastu tuuleparkidest edelas, sügavamal alal, kust peaks toimuma soolasema vee transport tuuleparkide piirkonda, soolsus suureneb. Talvisel perioodil on muutuste mustrid on väga varieeruvad ja tagasihoidlikumad, aga üldine tendents on sarnane stratifitseeritud perioodile, st. pargialadel pigem soolsus veidi väheneb ning pargist eemal veidi kasvab. Võrreldes sesoonse ja lühiajalise muutlikkusega alal 1 olemasolevas olukorras, on tuuleparkide mõju tagasihoidlik ja piirdub 10% eelmainitud muutlikkusest.

Segunenud kihi paksus tuulepargi aladel väheneb ning see muutus on suurim, kui rajatakse kõik kolm tuuleparki. Kolme tuulepargi koostoimel moodustub Kihnust lõunas ja edelas võrdlemisi suur ala, kus segunenud kihi paksus väheneb. Pargialadest kaugemal, edelas ja lõunas segunenud kihi paksus suureneb. Tuuleparkide mõjul segunenud kihi paksus pigem väheneb hilistalvisel ja kevadisel perioodil, mõnevõrra ka suvel. Segunenud kihi paksuse vähenemine kevadperioodil võib kaasa tuua kevadõitsengu varasemaks nihkumise.

### 3.4. Veesamba biogeokeemilised parameetrid

Joonistel 3.4.1-3.4.6 on toodud simuleeritud Liivi lahe keskmised jaotused pinnakihi üldainete, nitraatide, fosfaatide ja klorofüllü sisalduse ning põhjalähedase hapniku kohta. Üldainete sisaldused ja klorofüll on toodud suvekuude keskmistena; nitraadid ja fosfaadid talvekuude keskmistena; põhjalähedane hapnik juuli-september keskmisena. Esitatud on kõik neli stsenaariumi.

Suurim toitainete koormus Liivi lahte saabub jõgedest. Võib arvata et simulatsioon mõnevõrra alahindab ainete levikut rannatsoonist avamerele, mistõttu tekib ülehinnang ainete gradiendis idaranniku ja avamere vahel. Kirjeldatud kõrvalekalle ilmselt põhjustab produktsiooni ja hapniku tarbimise ülehindamise rannikutsoonis ja nende alahindamise avamerel. Võrdsetel alustel tehtud stsenaariumide arvutused annavad siiski aimu tuulepargi rajamise mõjust. Basseinimastaapi mõju Liivi lahe biogeokeemilistele väljadele ei kaasne. Üldainete ja toitainete

muutlikkus piirkonnas on väga suur ning pidades silmas ka mudeli määramatust, on keeruline tuuleparkide poolt põhjustatud muutust väljades tuvastada. Teatud muutused ilmselt aset leiavad, sest mõjutatud on nii hoovuste struktuur kui ka vertikaalne segunemine. Läänemere eutrofeerumise üheks peamisteks indikaatoriteks on liigne primaarproduktsoon pinnakihi ja hapniku vähenemine põhjakihi. Edasises analüüsis keskendume klorofüllü sisaldusele pinnakihi, mis kaudselt kirjeldab primaarproduktsooni intensiivsust ning hapniku sisaldusele põhjakihi.

Joonisel 3.4.7 on toodud kaheaastane aegrida ja sesoonne käik pinnakihi klorofüllü ja põhjalähedase hapniku sisalduse keskmise kohta alal 1. Jooniselt 3.4.6 on näha, et tuuleparkidega kaasnevad kõrgemad pinnakihi klorofüllü kontsentratsioonid hilistalvel, varakevadel ja suvel. Veebruari-aprilli klorofüllü sisalduse suurenemine langeb kokku segunenud kihi paksuse vähenemisega. Võib arvata, et kõrgeenenud primaarproduktsooniks vajalik stabiilne kiht tekib tuulikute alal varem. Muutuse alal 1 tekitavad kõik stsenaariumid. Kõige suurema mõjuga kipub olema kolme arendusalaga variant, kuid mitte alati.

Põhjalähedase hapniku kontsentratsioonide suurimad muutused esinevad suve lõpus, augustis ja septembris. Samal perioodil leiab hapnikupuudus põhjakihtides aset ka praegu (Liblik et al., 2023), mistõttu just sel perioodil toimuv täiendav hapniku vähenemine on merekeskkonna jaoks eriti oluline. Tõenäoliselt on muutus seotud tuule kiiruse ja vertikaalse segunemise vähenemisega. Põhiaruandes toodud modelleerimise tulemused (Tallinna Tehnikaülikool, 2024) ja mõõtmisandmete analüüs on näidanud, et põhjalähedase hapniku kontsentratsioonil Liivi lahes on arvestatav aastatevaheline muutlikkus. Liivi lahes esineb sesoonne hüpoksia ka praegu, kuid seda on regulaarselt registreeritud tuulepargi alaga võrreldes sügavamal merealal (Liblik et al., 2023; Stoicescu et al., 2022). Alal 1 tehtud mõõtmiste abil on tuvastatud suve lõpus, sügise algul hüpoksia esinemine. Simulatsiooni tulemused viitavad, et mõnevõrra võib hüpoksia esinemine alal 1 sageda. Simulatsiooni tulemustest ei ole üheselt selge, kas suurem arv tuuleparke põhjustab alal 1 kõige suurema täiendava hapnikupuuduse. Ülejäänud sesoonidel on põhjalähedase hapnikukontsentratsioonide muutused marginaalsed.

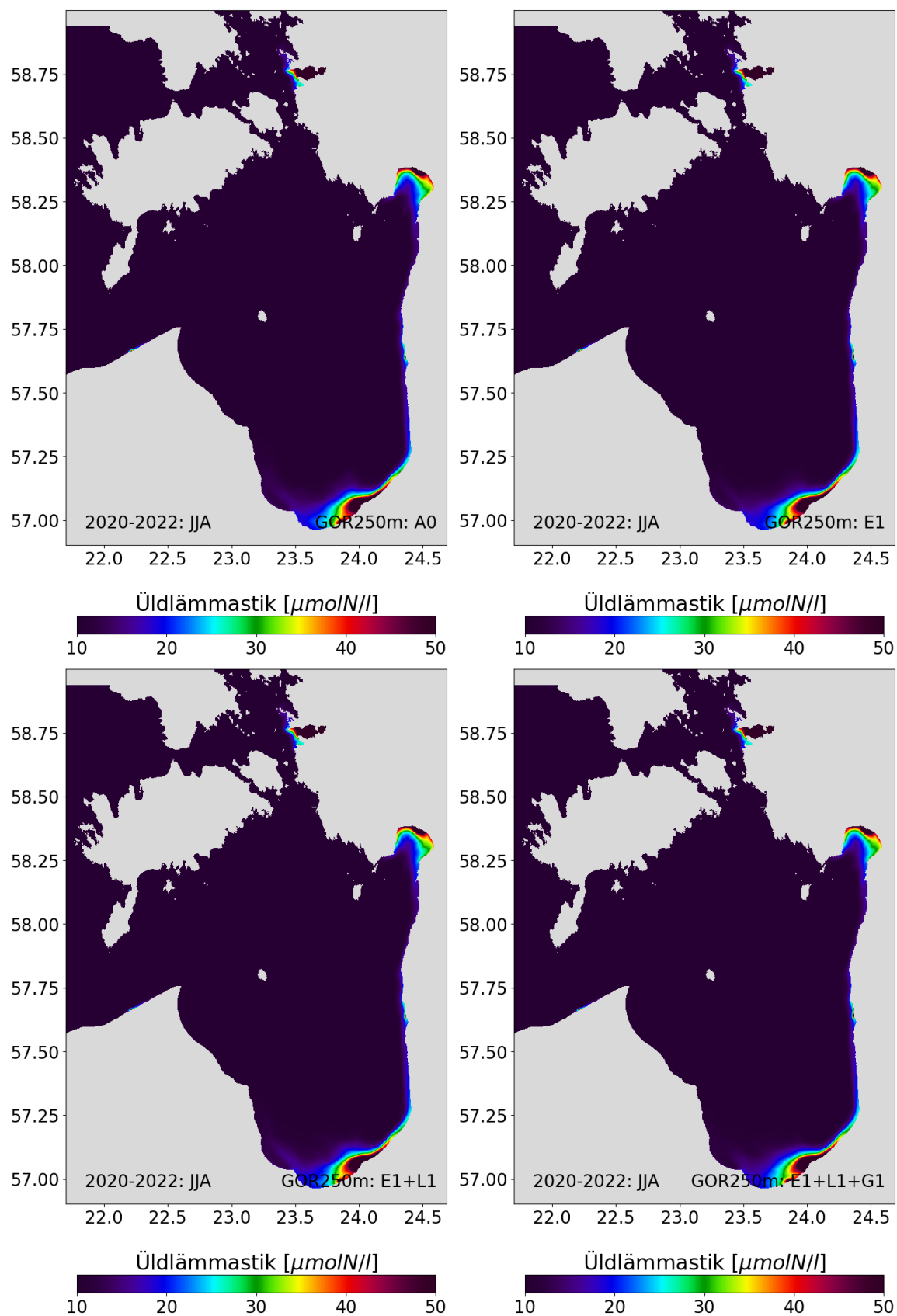
Pinnakihi klorofüllü sisalduse muutuse ruumilised jaotused varakevadel ja suvel on toodud joonistel 3.4.8 ja 3.4.9. Tagasihoidlik klorofüllü sisalduse suurenemine kevadel on näha Kihnust läänes ja edelas ning vähenemine Kihnust lõunas ja mandrirannikul. Suvisel perioodil on üldiselt näha sarnased tendentsid. Simulatsioon näitab suvel klorofüllü suurenemist mandri rannatsoonis ja vähenemist Kihnu ja mandri vahel. Ei ole selge, mis põhjusel simulatsioon sellise signaali annab ja kas ka tegelikkuses säärane muutus aset leiab.



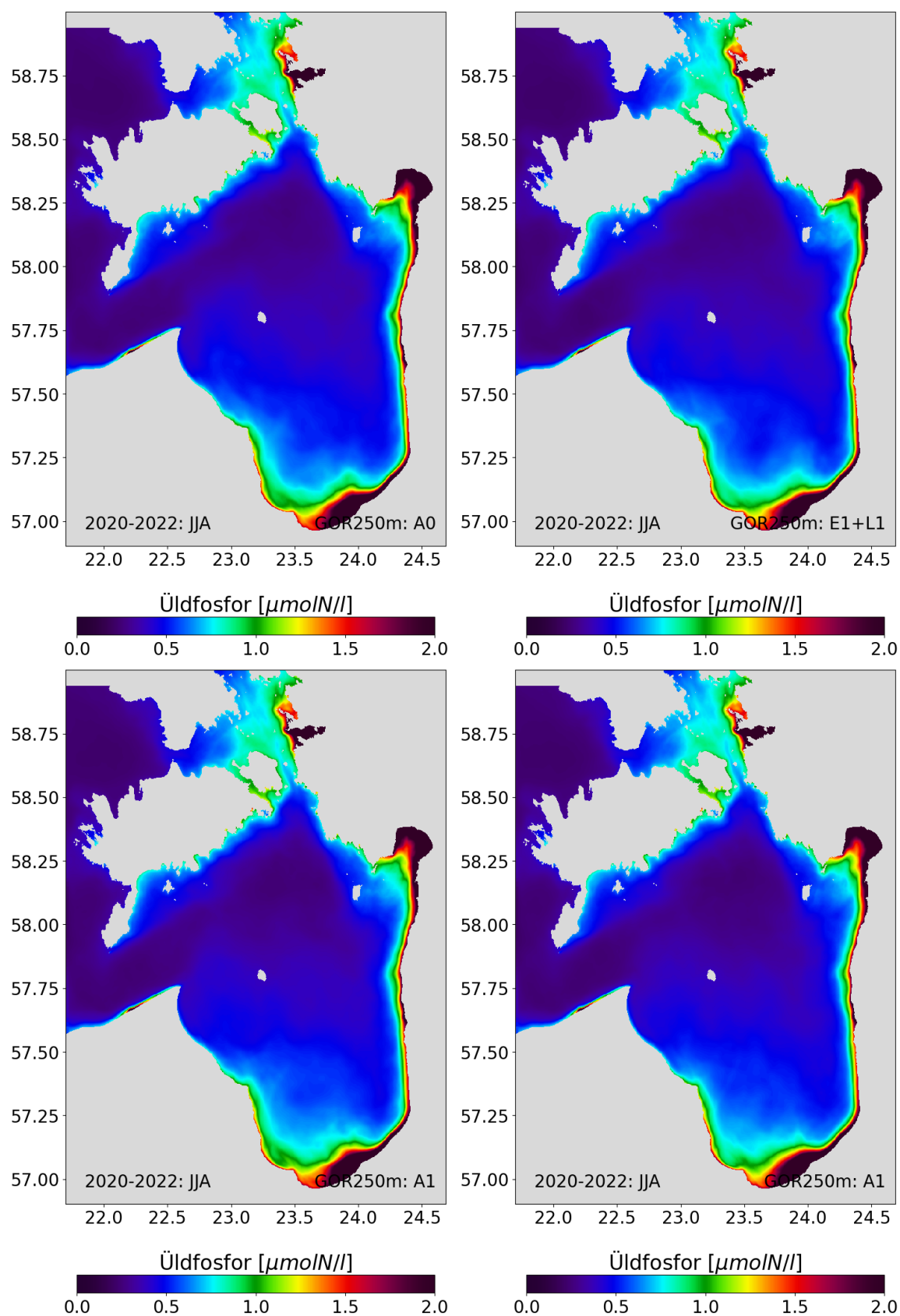
Mõjutatud pindala graafikud (joonis 3.4.11) küll viitavad, et suurimad muutused klorofüllis leiavad küll aset siis, kui rajatakse kolm tuuleparki, kuid mõju hüppelist kasvu tuuleparkide lisandudes aset ei leia.

Simulatsioon annab signaali, mille kohaselt tuuleparkide sees ja tuulepargi aladest edelas ja läänes hapnik juulist septembrini väheneb (joonis 3.4.10). Parkidest lõunas ja mandri suunas hapniku kontsentratsioonid pigem tõusevad. Hapniku vähenemine on kriitilisem sügavamatel aladel. Nendes piirkondades on hüpoksia esinemine ka olemasolevas olukorras tõenäosem kui madalamates piirkondades. Hapniku vähenemine leiab selgelt aset suurimal alal, kui rajatakse kõik kolm tuuleparki. Erinevalt klorofüllist, suureneb kolme tuulepargi kasutamisel pindala, kus hapnik väheneb märkimisväärselt, hüppeliselt. Näiteks suureneb kolmanda pargi lisandudes ala, kus hapnik väheneb vähemalt 0,3 ml/l, mitmekordselt (joonis 3.4.12). Tõenäoliselt tuleb kolmanda pargi lisandudes hüppeline kasv mitme pargi mõju kumulatiivsusest.

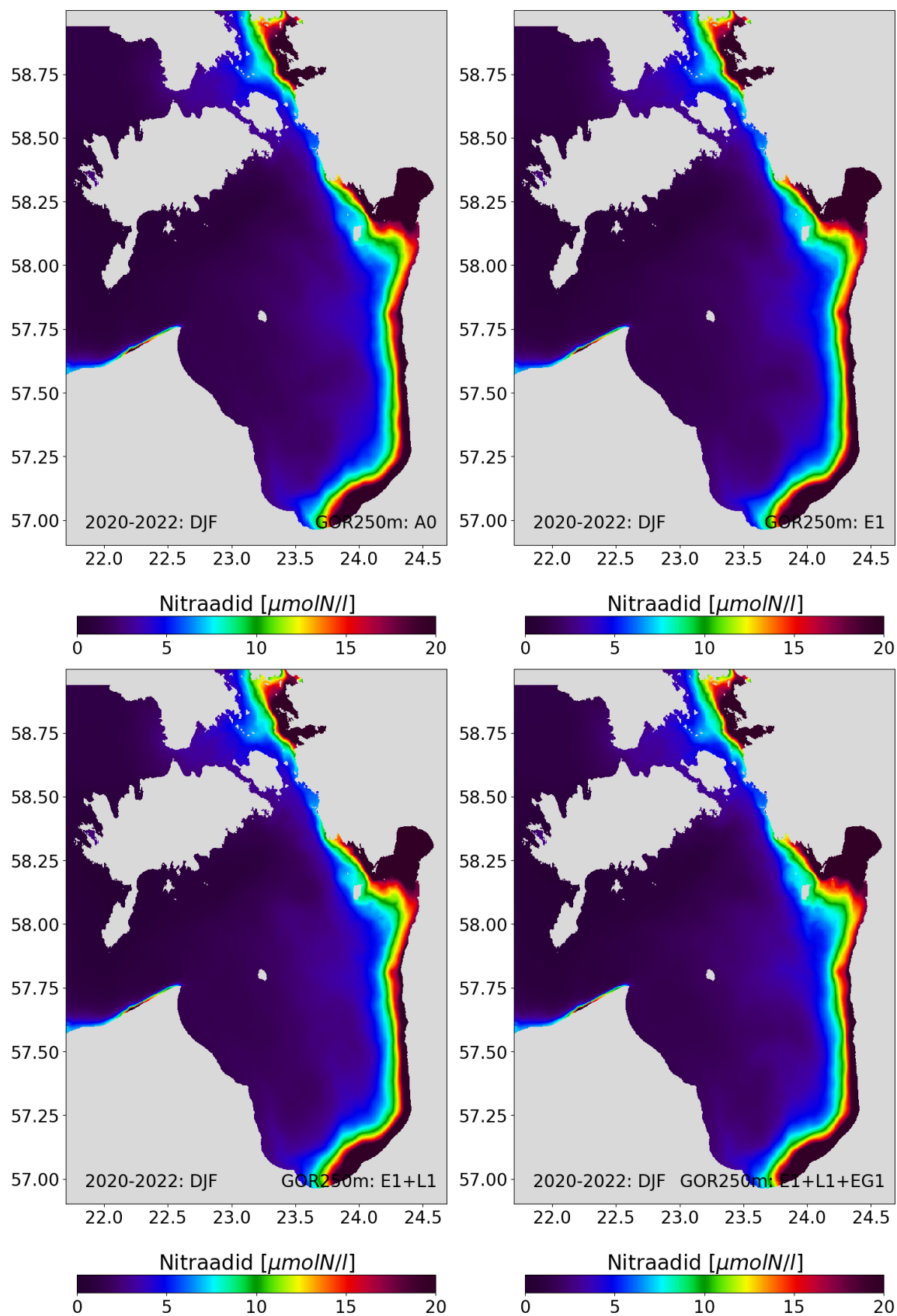
Kokkuvõttes, sarnaselt füüsikaliste parameetritega tuulepargid biogeokeemiliste parameetrite (toitained, üldained, klorofüll, hapnikusisaldus) basseini mastaapi jaotuseid Liivi lahes ei muuda. Lokaalne mõju tuuleparkide läheduses on aga tuvastatav. Mõnevõrra suureneb tuulepargialadel pinnakihi klorofüllis sisaldus hilistalvel ja varakevadel ning suvel. Muutused on seotud tuulepargi mõjudega füüsikalistele protsessidele (hoovused ja vertikaalne segunemine). Mõju hüppelist kasvu klorofüllis sisaldusele tuuleparkide lisandudes me ei tuvastanud. Tuuleparkide aladel ning tuulepargi aladest edelas ja läänes põhjalähedane hapnik juulist septembrini väheneb. Hapniku vähenemisega ( $> 0,3$  ml/l) mõjutatud piirkonna pindala suureneb hüppeliselt, kui kõik kolm parki on kasutuses.



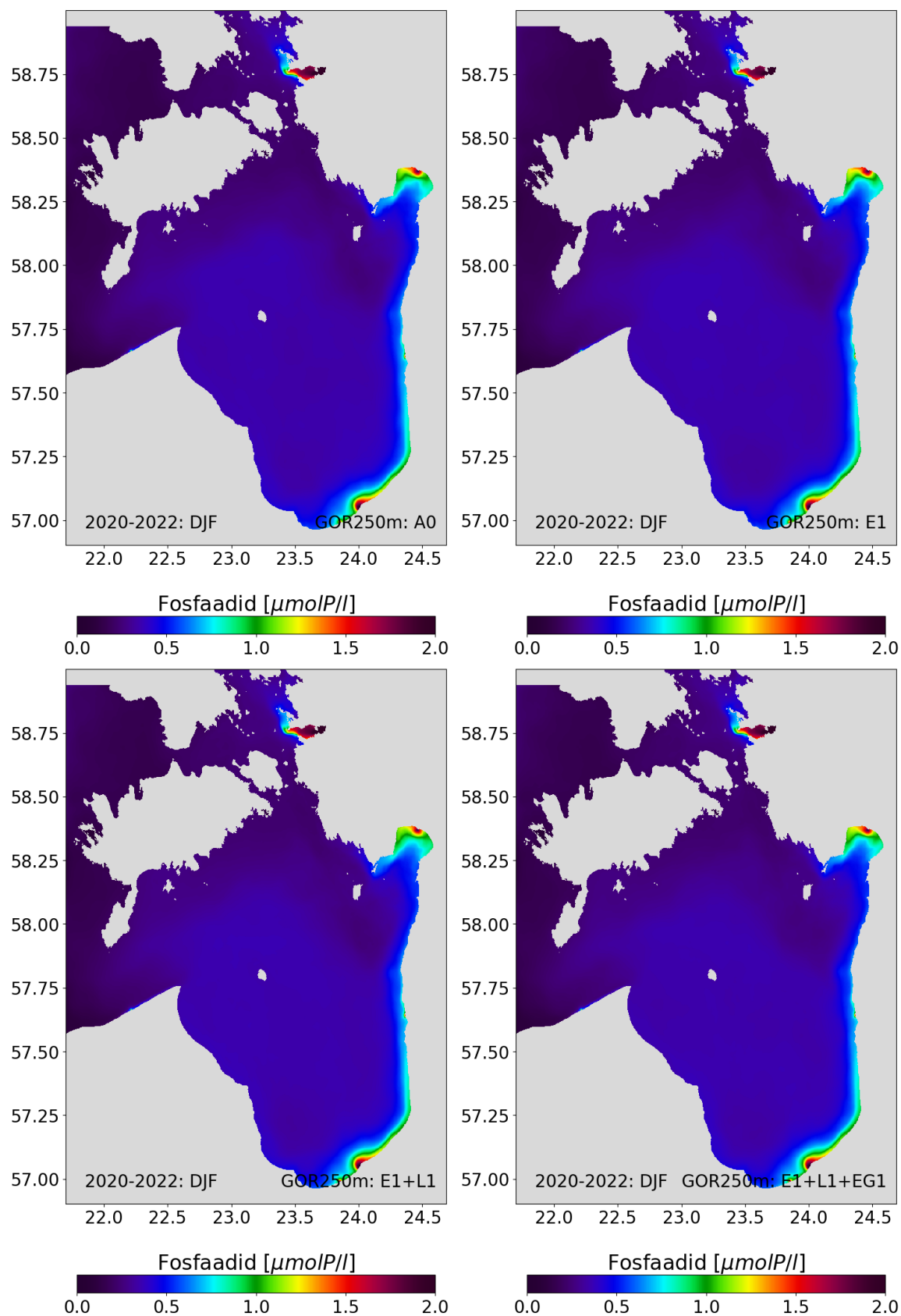
Joonis 3.4.1: Suvine keskmise üldlammastiku sisaldus pinnakihis nelja stsenaariumi korral.



Joonis 3.4.2: Suvine keskmine üldfosfori sisaldus pinnakihis nelja stsenaariumi korral.

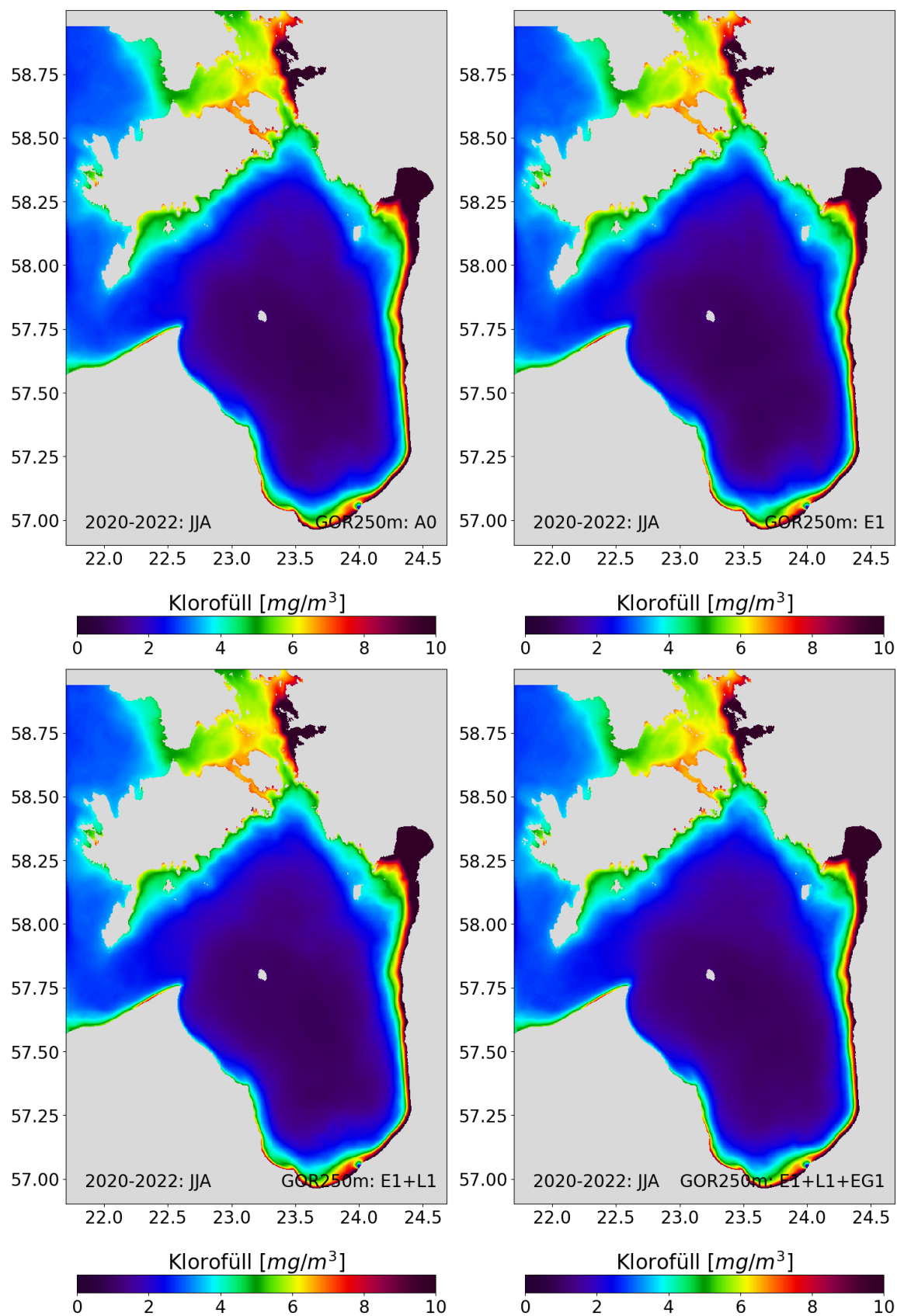


Joonis 3.4.3: Talvine keskmine nitraatide kontsentratsioon pinnakihis nelja stsenaariumi korral.

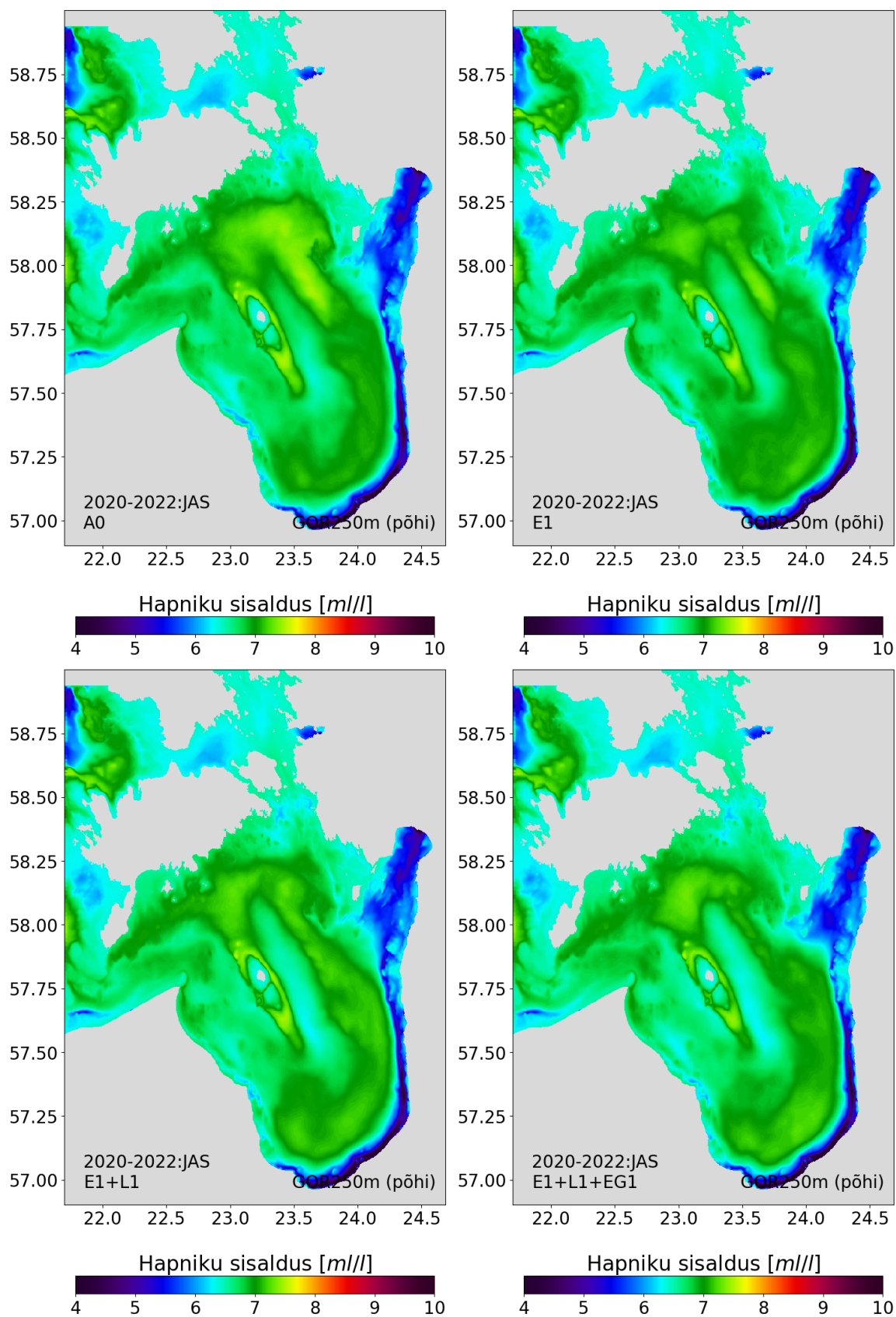


Joonis 3.4.4: Talvine keskmine fosfaatide kontsentratsioon pinnakihis nelja stsenaariumi korral.

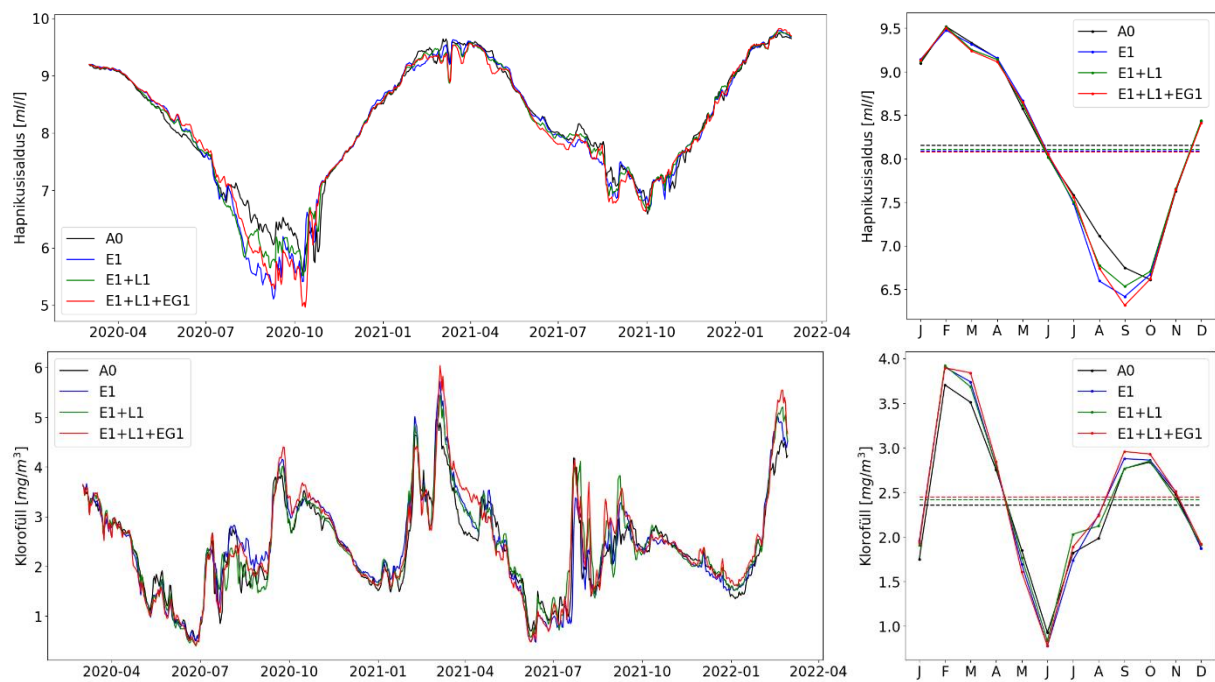




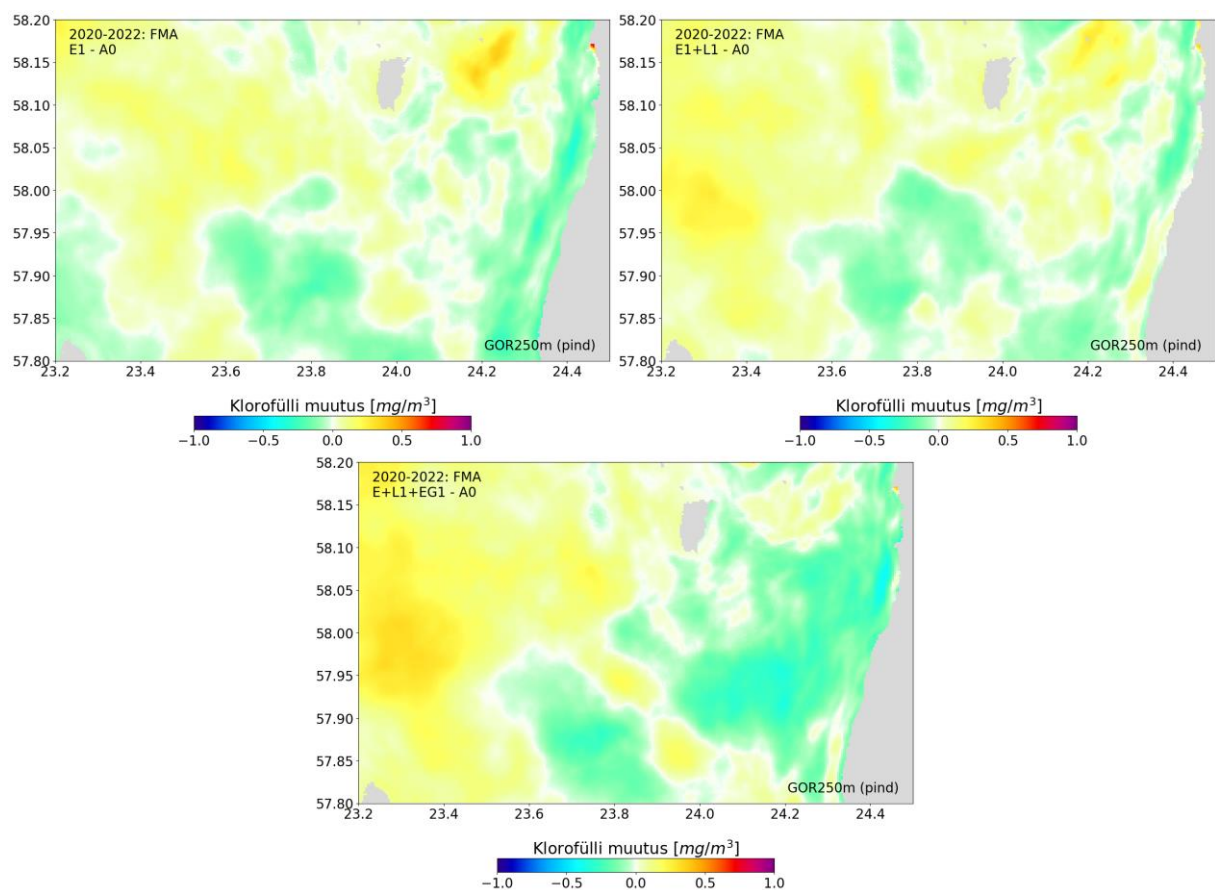
Joonis 3.4.5: Suvine keskmise klorofüllü sisaldus pinnakihis nelja stsenaariumi korral.



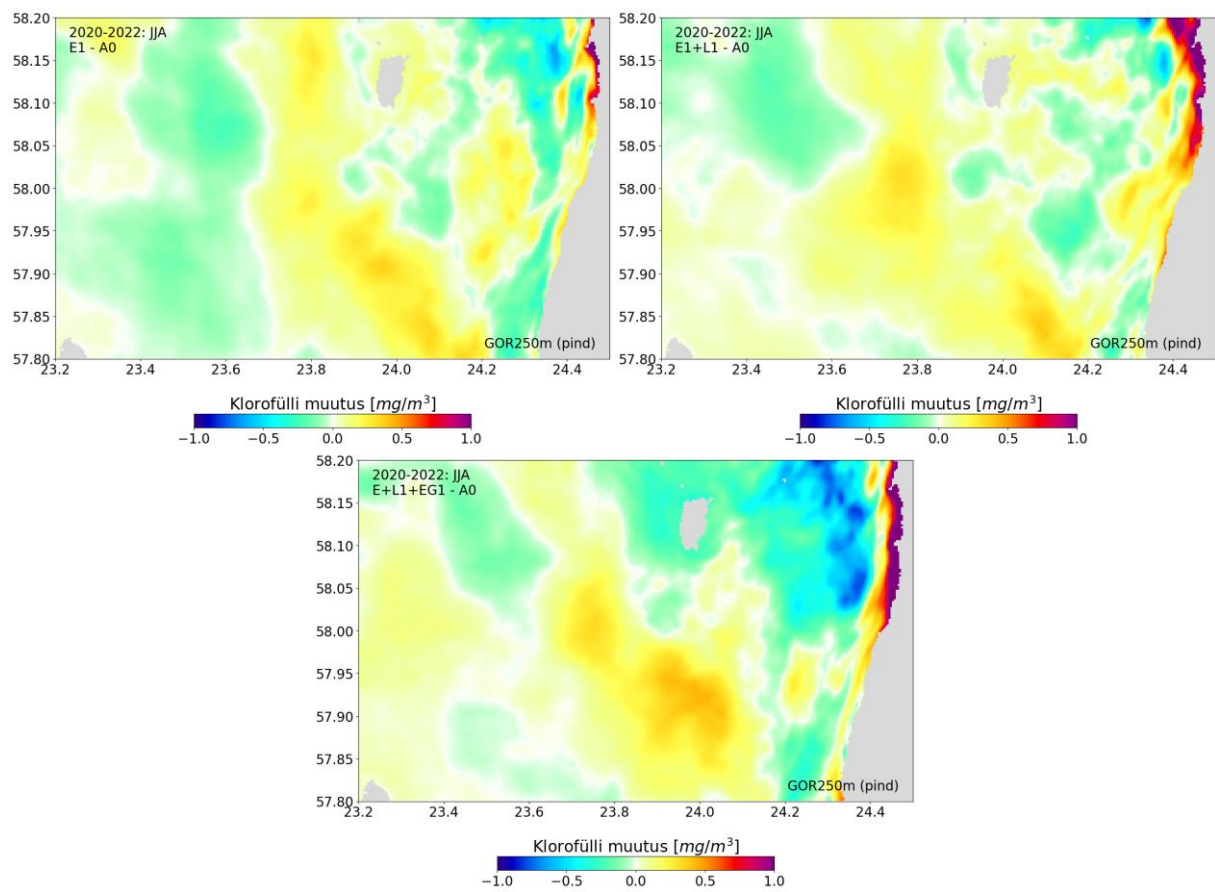
Joonis 3.4.6: Keskmine põhjakihi hapniku jaotus juulist septembrini nelja stsenaariumi korral.



Joonis: 3.4.7: Põhjakihi hapniku ja klorofüllü ajaline käik koos sesoonse käiguga alal 1.

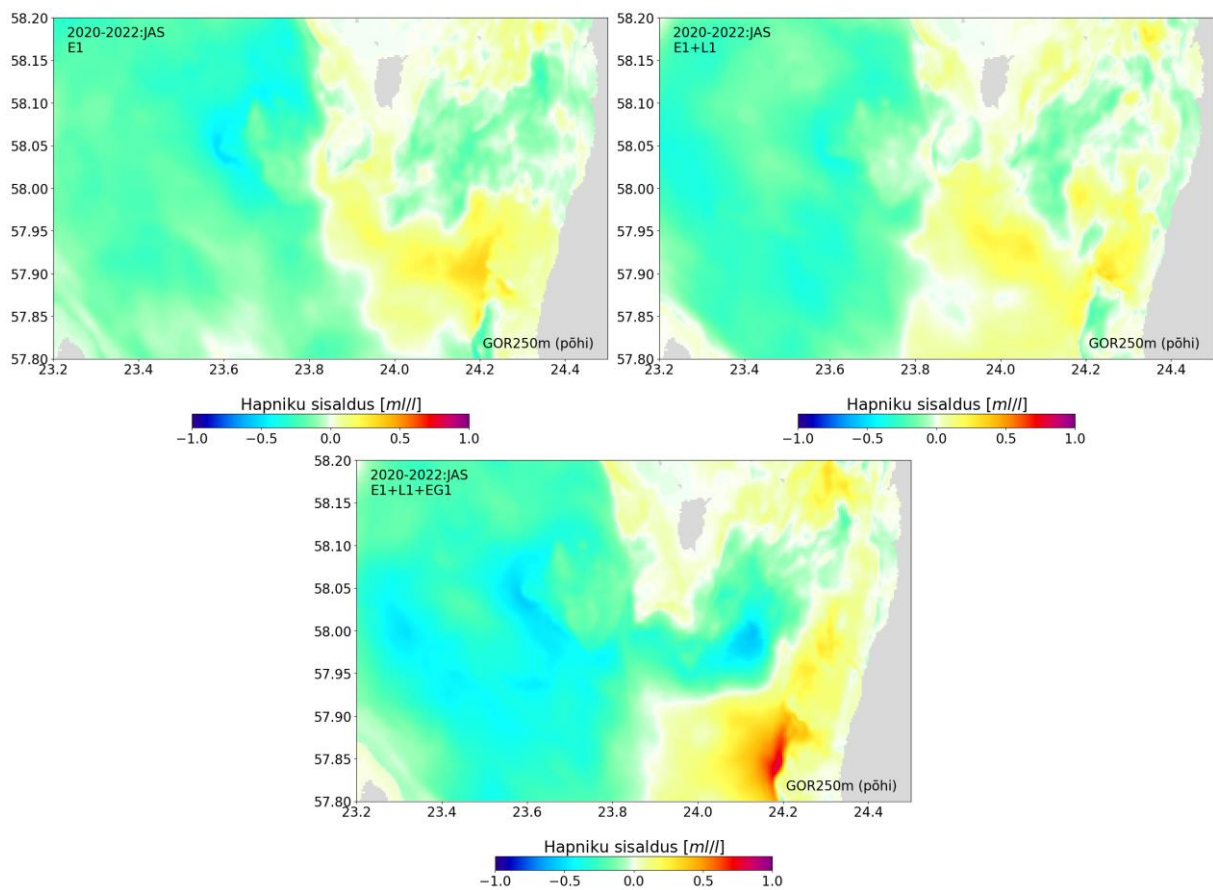


Joonis 3.4.8: Pinnakihi klorofüllü erinevus varakevadel (veebruarest aprillini) kolme stsenaariumi korral.

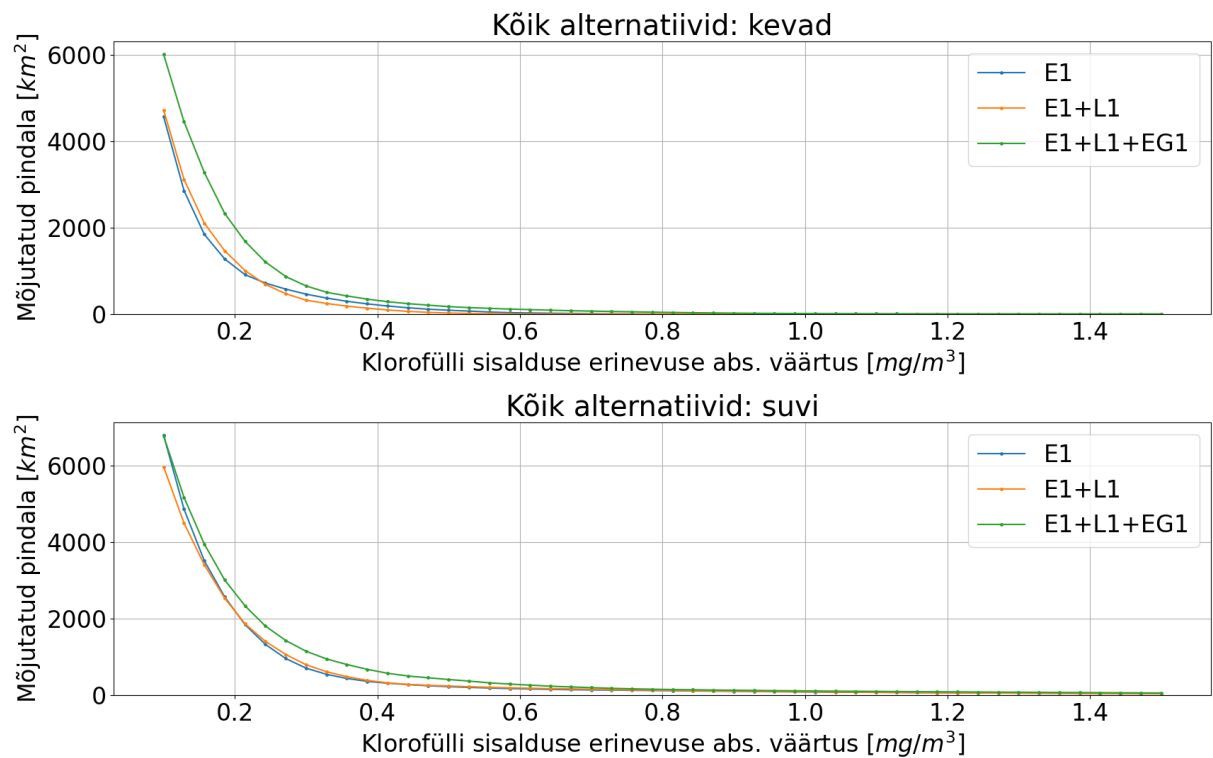


Joonis 3.4.9: Pinnakihi klorofüllü erinevus suvel kolme stsenaariumi korral.



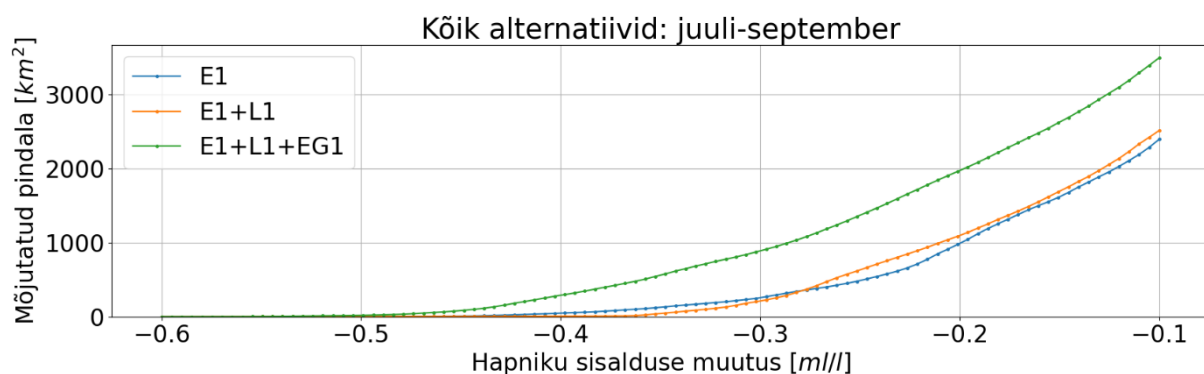


Joonis 3.4.10: Põhjalähedase hapniku erinevus juulist septembrini kolme stsenaariumi korral.



Joonis 3.4.11: Mõjutatud pindalade suurus sõltuvalt klorofüllü sisalduse muutuse suurusest kevadel (veebruar-aprill, ülemine paneel) ja suvel (JJA, alumine paneel).





Joonis 3.4.12: Põhjalähedase hapniku vähenemisega seotud pindalade suurus.

### 3.5. Heljumi levik

Seoses süvendus- ja kaadamistöödega tekib veesambasse heljum, mis muudab ajutiselt vee läbipaistvust. Heljum levib hoovustega algallikast eemale ja settib. Alal 1 planeeritakse praeguse seisuga 80 tuulikut, mille puhul on eeldatud, et maksimaalselt liigutatakse 10 000 m<sup>3</sup> setteid. Alal 2 on arvestatud 50 tuulikuga ja ala 3 tuulepargi konfiguratsioonis on 67 tuulikut. Seega kokku liigutatakse arvestuslikult maksimaalselt kokku suurusjärgus 2 000 000 m<sup>3</sup> materjali. See on summaarselt väga suur süvendusmaht, kuid tänaseks ei ole selge kas tööd aladel ajaliselt kattuvad. Ala 1 süvendatavast settest moodustab peeneteraline materjal, mis settib aeglaselt ja levib seetõttu kaugemale, ca veerandi. Ala 1 süvendatava materjali kaadamisel kaalutakse kahte alternatiivi: materjal kaadatakse tuulikute kõrvale, materjal viiakse kahele kaadamisalale (Tallinna Tehnikaülikool, 2024). Ala 3 osas eeldame, et kaadamine toimub samuti tuulikute kõrval.

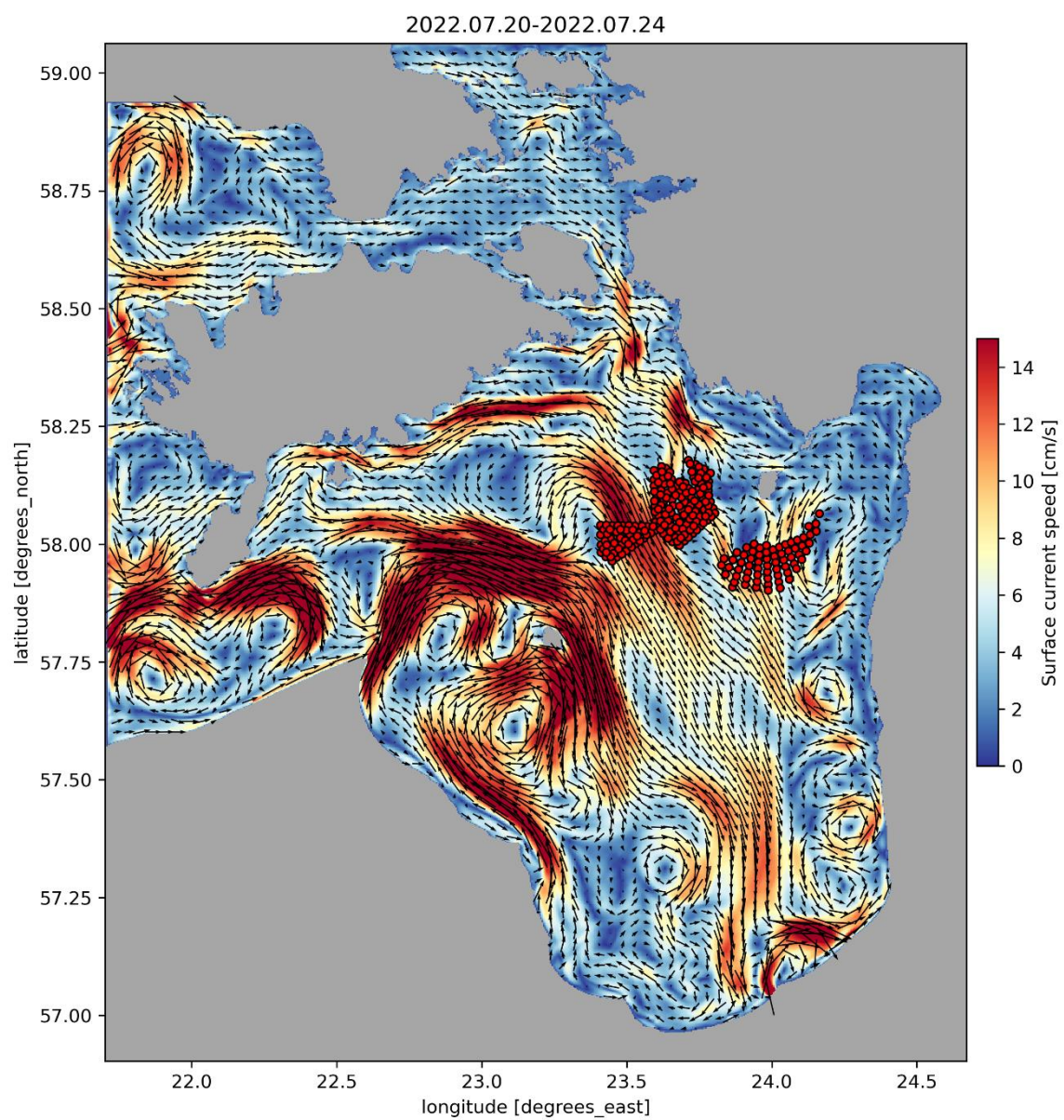
Alale 1 teostatud modelleerimine (Tallinna Tehnikaülikool, 2024) näitas, et enamus heljumist vajub pinnakihi alla 12 h ning põhjalähedases kihis on peale ööpäeva näha vaid väikest osa settest, st. enamus kaadatud materjalist peale ööpäeva enam veesambas ei ole. Hajumine ja leviku ulatus on alumise kihi jaotustes suurem. Modelleeritud heljumi jaotused näitasid, et heljumi kõrged kontsentratsioonid alale 3 reeglina ei levi. Soodsatel tingimustel võib heljum siiski alale 3 levida ja ilmselt ka alalt 3 aladele 1 ja 2. Sellised sündmused ei ole sagedased. Ei ole teada, kas heljumit tekitavaid töid tehakse aladel 1-3 koos. Lähtudes eeldusest, et töid tehakse korraga võib püstitada hüpoteesi, et kahel alal tekkiv heljum akumulereub ruumis. Hüpoteesi teostumise uurimiseks vaatame piirkonna tsirkulatsioonimustreid. Vaatleme

perioode kui mõne päeva jooksul on suhteliselt stabiilsed tuuleolud. Nii on võimalik eristada prevalleerivaid tsirkulatsioonimustreid erinevatel atmosfääri ja stratifikatsiooni tingimustel (Liblik et al., 2022). Vaatame kolme perioodi: 20-24. juuli 2022, 29. august – 4. september 2022 ja 10-15 oktoober 2022. Esimesel perioodil domineerisid nõrgad ja mõõdukad läänekaarte tuuled, teisel perioodil tugevad põhjakaarte tuuled ja kolmandal perioodil tugevad edelakaarte tuuled.

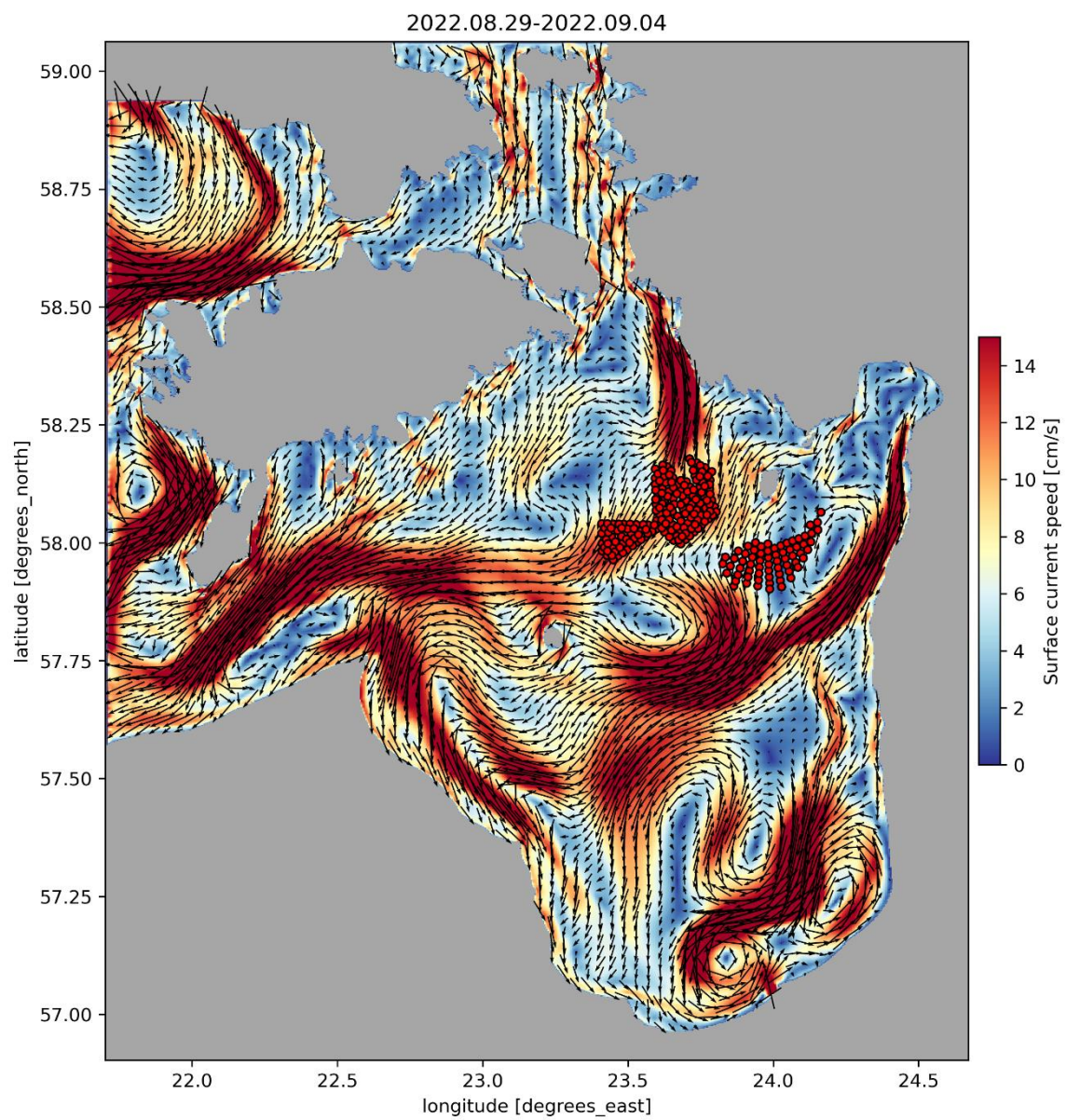
Joonistel 3.5.1- 3.5.3 on esitatud nende perioodide keskmised pinnahoovuste kaardid. Püstitatud hüpoteesi teostumiseks peaks mõlemalt tuuliku alalt heljum kokku kanduma. Joonistel on näha mitmeid mesomastaapseid keeriseid. Vee ja aine nn. kokku kuhjumist, st. konvergentsi soodustavad antitsükloonaalsed keerised; seevastu tsükloonaalses keerise keskmes toimub divergents. Ranniku lähedal toimub konvergentis ka daunvellingu protsessi käigus. Antitsükloonaalseid keeriseid võib joonisel 3.5.1 näha nt. Ruhnust lõunas ja läänes, ja Irbe väinas. Läbi tuulepargi alade toimub valdavalt kagusuunaline transport. Ei ole alust arvata, et sellise hoovuste mustri puhul heljum kahelt tuuliku alalt olulisel määral kokku saaks ja akumulatuuriks.

Põhjakaarte tuultega tekkiv pinnahoovuste muster näitab tuulepargi aladelt transporti lõunasse või läände (joonis 3.5.2). On võimalus, et mõlemat tuulepargi alla läbinud veemass saab kokku Ruhnust põhjas, kuid vahemaad on nii pikad, et heljum on selleks ajaks juba settinud. Võib arvata, et arvestatav konvergentis toimub põhjakaarte tuultega Liivi lahe läänerannikul, tuulepargi arendusaladest kaugel.

Tugevate edelatuultega tekib konvergentsi tsoon Liivi lahe idarannikule ja sellega kaasneb seal tugev hoovus. Samuti on konvergentsi tsoon Pärnu lahes, mis on näha rannikulähedases veetaseme tõusus. Tuuleparke läbiv pinnahoovus on suunatud Pärnu lahe suunas. Aladelt 1 ja 2 lähtuv vesi liigub Kihnust põhja poolt, alalt 3 pigem lõuna poolt. Heljumi settimise tõttu on ebatõenäoline, et arvestatavat kahelt alalt päris heljumi akumulaurumist Pärnu lahes aset leiab. Lisaks maskeerib sellise tuule puhul töödest tekitatud heljumi lainetuse tekitatud loodusliku resuspensiooni käigus veesambasse sattuv heljum. Võib järeldada, et kahelt alalt pärit heljum ruumis samaaegselt veesambas arvestataval määral ei akumulauru. Samas on selge, et Liivi lahes tervikuna leiab mitme tuulepargi rajamisel (võrreldes ühe pargi rajamisega) aset heljumi teke ja veesamba läbipaistvuse vähenemine suuremal alal ja ka pikemal perioodil, kui töid ei teostata samaaegselt.

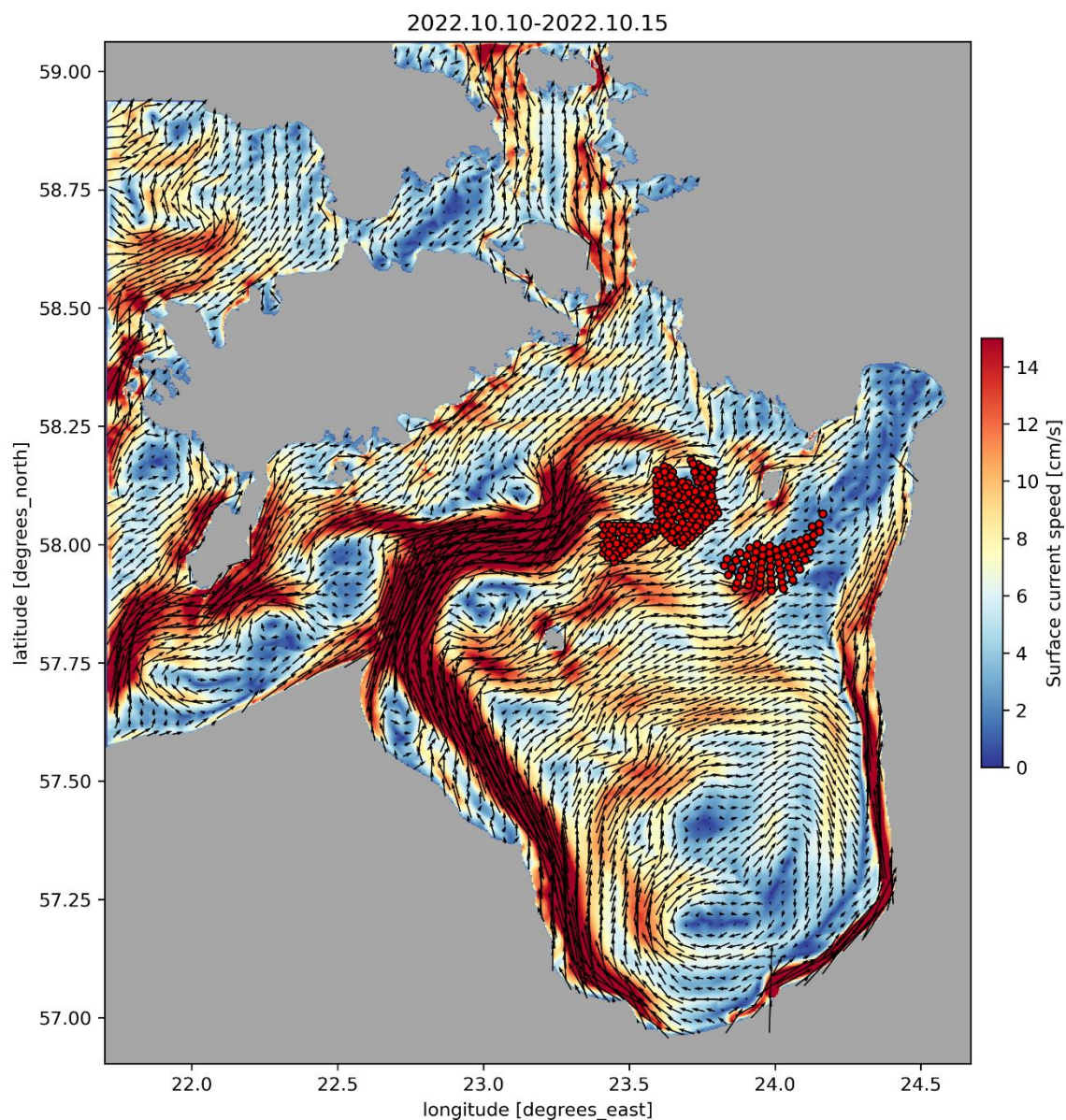


Joonis 3.5.1. Pinnakihi keskmised hoovused 20.07-24.07.2022.



Joonis 3.5.2. Pinnakihi keskmised hoovused 29.08-04.09.2022.





Joonis 3.5.3. Pinnakihi keskmised hoovused 10.10-15.10.2022.

Alal 1 leiti modelleerimise (Tallinna Tehnikaülikool, 2024) tulemusena, et kui materjali kaadamine toimub tuulikute kõrvale, siis suurim settimiskoormus tuulikute vahetus läheduses ning tuulepargi muudes osades (vundamentide vahel) on see suurusjärgus 5-7 mm. Tuulepargist eemal kahaneb settekihi paksus kiiresti alla 2 mm. Võttes arvesse looduslikku settimiskoormust võib eeldada, et tuulepargi ala 1 sees on kaadamise põhjustatud settimine vähemalt sama suur, kui loodusliku resuspensiooniga veesambasse toodud heljumi settimine. Tuulepargi alast väljas (kaadamise vahetust mõjust eemal) jääb settimise mõju loodusliku resuspensiooni põhjustatule alla. Eeldades, et ala 2 ja ala 3 hüdrodünaamilised olud ja setete lõimis on sarnased alale 1, võib eeldada, et ala 2 ja ala 3 sees on settimine vähemalt sama suur kui looduslik settimine ning sellest väljas tagasihoidlikum, kui looduslikult. Alal 1 ja alal 2 tekkiv heljum



võib kumulatiivselt ala, kus settimine ületab looduslikku fooni, vähesel määral suurendada. Ala 3 on tõenäoliselt aladest 1 ja 2 piisavalt kaugel, et arvestatavat settimise kumulatiivsust esineks. Mingil määral küll soodsate tingimuste kokku langemisel heljum ühelt arendusalalt teisele levib, kuid mahud on marginaalsed. Vastavalt keskmistele hoovusmuustritele on stratifitseeritud perioodil (kevad, suvi) tõenäosem heljumi liikumine aladelt 1 ja 2 alale 3 ning mittestratifitseeritud perioodil (sügis, talv) vastupidi. Ei ole alust arvata, et pinnase viimisel kahele kaadamisalale (joonis 1.1.) kumulatiivse settimise osas juba kirjeldatud hinnangute osas midagi oluliselt muudab.

Kokkuvõttes, isegi kui tööd toimuvad samaaegselt, siis kahelt alalt pärit heljum ruumis samaaegselt veesambas arvestataval määral ei akumuleeru. Liivi lahes tervikuna leiab kahe tuulepargi rajamisel (võrreldes ühe pargi rajamisega) aset heljumi teke ja veesamba läbipaistvuse vähenemine suuremal alal. Samuti leiab looduslikku fooni ületav settimine aset suuremal alal, kui tuuleparke on rohkem kui üks. Vähesel määral võib akumuleeruda aladel 1 ja 2 tekkiva heljumi settimine. Alal 3 tekkiva heljumi kumulatiivne settimine aladelt 1 ja 2 pärit materjaliga on ebaoluline.

## 4. Kasutatud kirjandus

- Aigars, J., Poikane, R., Dalsgaard, T., Eglite, E. and Jansons, M.: Biogeochemistry of N, P and SI in the Gulf of Riga surface sediments: Implications of seasonally changing factors, *Cont. Shelf Res.*, 105, 112–120, doi:10.1016/J.CSR.2015.06.008, 2015.
- Alari, V. and Raudsepp, U.: n, *J. Coast. Res.*, 279, 143–148, doi:10.2112/JCOASTRES-D-10-00054.1, 2012.
- Alari, V., Raudsepp, U. and Kõuts, T.: Wind wave measurements and modelling in Küdema Bay, Estonian Archipelago Sea, *J. Mar. Syst.*, 74, S30–S40, doi:10.1016/J.JMARSYS.2007.11.014, 2008.
- Bruggeman, J. and Bolding, K.: A general framework for aquatic biogeochemical models, *Environ. Model. Softw.*, 61, 249–265, doi:10.1016/J.ENVSOFT.2014.04.002, 2014.
- Canuto, V. M., Howard, A., Cheng, Y. and Dubovikov, M. S.: Ocean turbulence. Part I: One-point closure model-momentum and heat vertical diffusivities, *J. Phys. Oceanogr.*, 31(6), 1413–1426, doi:10.1175/1520-0485(2001)031<1413:OTPIOP>2.0.CO;2, 2001.
- Christiansen, N., Carpenter, J. R., Daewel, U., Suzuki, N. and Schrum, C.: The large-scale impact of anthropogenic mixing by offshore wind turbine foundations in the shallow North Sea, *Front. Mar. Sci.*, 10, doi:10.3389/fmars.2023.1178330, 2023.
- HELCOM: Eutrophication. Thematic assessment 2016-2021. Third HELCOM holistic assessment of the Baltic Sea, *Balt. Sea Environ. Proc.*, 192, 2023.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D. and Thépaut, J.-N.: ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)., , doi:10.24381/cds.adbb2d47, n.d.
- Hofmeister, R., Burchard, H. and Beckers, J. M.: Non-uniform adaptive vertical grids for 3D numerical ocean models, *Ocean Model.*, 33(1–2), 70–86, doi:10.1016/J.OCEMOD.2009.12.003, 2010.
- Janssen, F., Schrum, C. and Backhaus, J. O.: A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea, *Dtsch. Hydrogr. Zeitschrift*, 51(S9), 5–245, doi:10.1007/BF02933676, 1999.
- Klingbeil, K., Lemarié, F., Debreu, L. and Burchard, H.: The numerics of hydrostatic structured-grid coastal ocean models: State of the art and future perspectives, *Ocean Model.*, 125, 80–105, doi:10.1016/J.OCEMOD.2018.01.007, 2018.
- Liblik, T., Väli, G., Salm, K., Laanemets, J., Lilover, M. J. and Lips, U.: Quasi-steady circulation regimes in the Baltic Sea, *Ocean Sci.*, 18(3), 857–879, doi:10.5194/OS-18-857-2022, 2022.
- Liblik, T., Stoicescu, S.-T., Buschmann, F., Lilover, M.-J. and Lips, U.: High-resolution characterization of the development and decay of seasonal hypoxia in the Gulf of Riga, Baltic Sea, *Front. Mar. Sci.*, 10, 438, doi:10.3389/FMARS.2023.1119515, 2023.

Lilover, M.-J., Lips, U., Laanearu, J. and Liljebladh, B.: Flow regime in the Irbe Strait, *Aquat. Sci.*, 60(3), 253, doi:10.1007/s000270050040, 1998.

Lips, U., Zhurbas, V., Skudra, M. and Väli, G.: 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, doi:10.1016/J.CSR.2015.12.018, 2016.

McCombs, M. P., Mulligan, R. P. and Boegman, L.: Offshore wind farm impacts on surface waves and circulation in Eastern Lake Ontario, *Coast. Eng.*, 93, 32–39, doi:10.1016/J.COASTALENG.2014.08.001, 2014.

Otsmann, M., Suursaar, Ü. and Kullas, T.: The oscillatory nature of the flows in the system of straits and small semienclosed basins of the Baltic Sea, *Cont. Shelf Res.*, 21(15), 1577–1603, doi:10.1016/S0278-4343(01)00002-4, 2001.

Savchuk, O. P.: Nutrient biogeochemical cycles in the Gulf of Riga: Scaling up field studies with a mathematical model, *J. Mar. Syst.*, 32(4), doi:10.1016/S0924-7963(02)00039-8, 2002.

Smagorinsky, J.: General Circulation Experiments with the Primitive Equations, *Mon. Weather Rev.*, 91(3), 99, doi:10.1175/1520-0493(1963)091, 1963.

Stoicescu, S. T., Laanemets, J., Liblik, T., Skudra, M., Samlas, O., Lips, I. and Lips, U.: Causes of the extensive hypoxia in the Gulf of Riga in 2018, *Biogeosciences*, 19(11), 2903–2920, doi:10.5194/BG-19-2903-2022, 2022.

Tallinna Tehnikaülikool: Vee kvaliteedi; veesamba füüsikaliste (sh. hüdrodünaamika) ja biogeokeemiliste parameetrite ning reostuslevi uuring Saare-Liivi meretuulepargi KMH raames., 2024.

Talpsepp, L.: Coherent current oscillations and water exchange in the straits of the Gulf of Riga, *Oceanologia*, 47(2), 115–127, 2005.

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

TTÜ Meresüsteemide Instituut: Hiiumaa avamere tuulepargi mõju lainetuse režiimi muutusele Hiiumaa lääne- ja põhjarannikul., 2008.

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