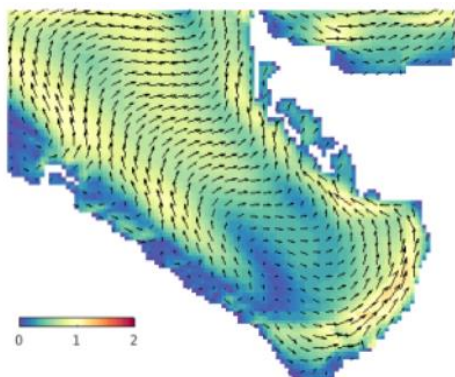




Tallinna Tehnikaülikool
Meresüsteemide Instituut



Kopli lahe põhja- ja pinnahoovuste aastaringse dünaamika ja seda mõjutavate looduslike ja antropogeensete tegurite uuring



Projekti aruanne

Ilja Maljutenko

Victor Alari

Kaimo Vahter

Tallinn 2023

Sisukord

Kokkuvõtte	4
1 Sissejuhatus.....	5
1.1 Kopli laht	5
1.2 Mere süvalasu dünaamika	6
2 Mudeli kirjeldus	6
2.1 NEMO hüdrodünaamika mudel ja Kopli lahe seadistus	6
2.1.1 NEMO Kopli lahe seadistus	7
2.2 Markeraine mudelid	8
2.2.1 Marker aine lagunemise mudel	10
2.2.2 Settemudel	10
2.3 Sissevoolude mudel	11
3 Triivhoovuste vaatlused ja mudeli valideerimine	12
4 Kopli lahe hüdrodünaamika	17
5 Sademevee merelasu modelleerimine.....	23
5.1 Sademevee merelasu mõju hoovustele lahes	24
5.2 Sademevee merelasu mõju toitainete sisaldusele rannalähedases vees.....	26
5.3 Sademevee merelasu mõju Stroomi supluskoha vee kvaliteedile	31
5.4 Sademevee merelasu mõju setete liikumisele lahes.....	32
Viited	33
Lisa 1	34

Kokkuvõtte

Uuringu eesmärk on Kopli lahe hüdrodünaamikast igakülgse ülevaate saamine, mis võimaldaks optimeerida kavandatava sademevee merelasu paiknemist ja süvalasu puhul selle suudme võimalikud asukohad nii, et merre juhitud sademevesi mõjutaks minimaalselt Kopli lahe ökosüsteemi ja ei halvendaks Stroomi supluskohta vee kvaliteeti.

Uuringu käigus tuleb viia läbi Kopli lahe hoovuste mõõdistused ja sademevee merelasu modelleerimine lähtudes neljast KMH programmis väljapakutud alternatiivsest merelasu asukohast ja tehnilisest lahendusest.

Uuringu osaks olevates hinnangutes ja prognoosides tuleks erinevate alternatiivsete tehniliste lahenduste korral käsitleda muuhulgas ka järgmisi aspekte:

milline võiks olla sademevee merelasu mõju hoovustele lahes;

milline võiks olla sademevee merelasu mõju toitainete sisaldusele rannalähedases vees;

milline võiks olla sademevee merelasu mõju Stroomi supluskohta vee kvaliteedile suvel ja talvel;

milline võiks olla sademevee merelasu mõju setete liikumisele lahes.

Töös leiti oluline seos Kopli ranna lõuna osa hoovuse suundade ja tuule kiiruse ja suuna vahel.

Kõige rohkem levib reostus Stroomi randa lääne ja põhja kaarte tuultega. Ida ja lõuna tuulte korral liigub vesi Kakumäe poolsaare suunas ega ning reostus ei ohusta Stroomi randa.

Erinevate merelaskude stsenaariumite võrdlustes leiti, et:

Alternatiivi 1 korral on tugevate hoovihmade korral Stroomi ranna reostus kõige tõenäolisem.

Alternatiivi 2 korral on lokaalne reostus Rocca al Mare piirkonnas kõige suurem ning heitvee hajumine kõige rohkem takistatud.

Alternatiivi 3 korral on reostus lokaalne ning ei ohusta Stroomi ranna supluspiirkonda niivõrd oluliselt kui kahe esimese alternatiivi korral.

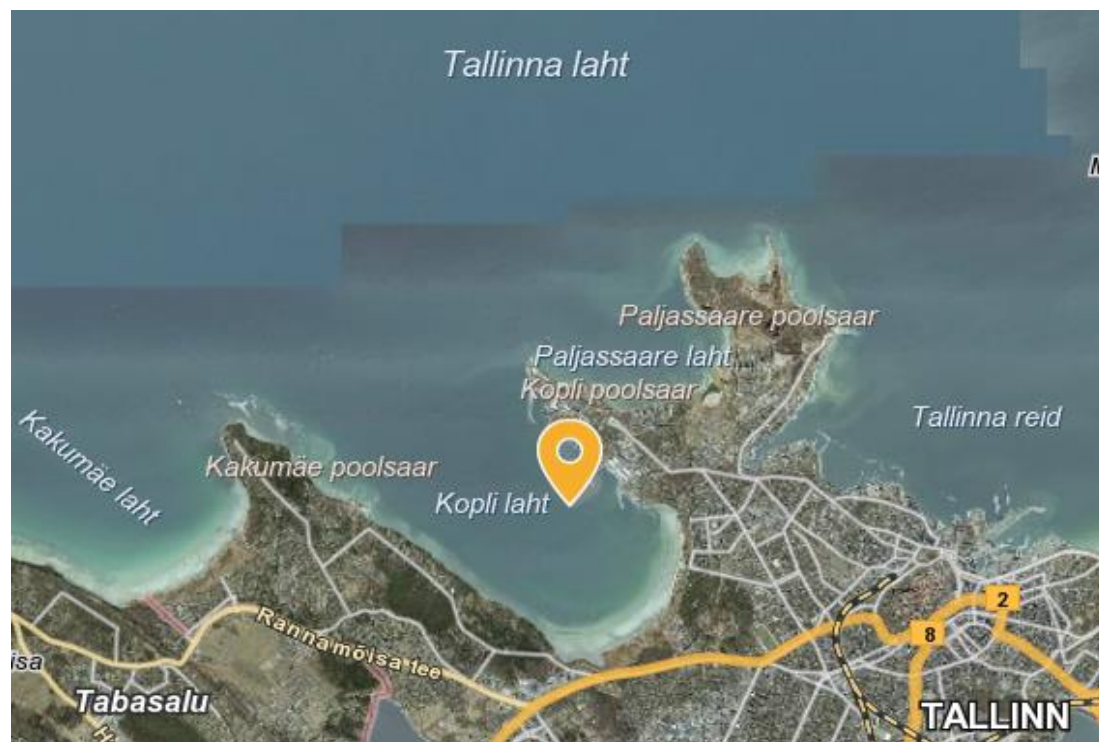
Alternatiivi 4 korral kus sademete heitvee lasu on kaldast viidud 20 m sügavusele on merelasu poolt tekitatud reostus kõige väiksem.

1 Sissejuhatus

1.1 Kopli laht

Kopli laht, osa Tallinna lahest, asetseb Kakumäe ja Kopli poolsaarte vahel, hõlmates umbes 13 km² suurust ala (Joonis 1.1). Piki loode-kagu suunalist lahe peatelge on laht ligikaudu 5 km pikk ja 2.5 km lai. Lahe keskosas ulatuvad sügavused 23 meetrini ning lahe suudmes 30 meetrini. Oma keskmise sügavusega 10.5 m mahutab Kopli laht keskmiselt 0.587 km³ vett. Kirderannikul laiub tööstus- ja sadamate piirkond, mida jagavad ettevõtted nagu BLRT Grupp, Vene-Balti, Piirivalve-, Bekkeri ja Meeruse sadamad. Idarannikul avaneb liivane supelrand Pelgurand (tuntud ka kui Stroomi rand); edelas asuvad Rocca al Mare ja läänes Kakumäe väikesadam.

Kopli lahe keskosas on rikkalikult põhjaseteid, loodes mitmekülgse elukeskkonna mereorganismidele. Edela- ja läänerannikul kujundab maastikku Kambriumi liivakivist pank, rikastades rannaveekeskonda mitmekesiste rändrahnudega. Rannäärsetes piirkondades leidub liivaseid alasid, kus aeg-ajalt ilmneb viirsavi paljand. Lõuna kaldal on rannajoon kaetud roostikuga, mis on koduks paljudele veeilindudele. Seega esindab Kopli laht morfoloogiliselt keerukat merelahte, mis pakub hulgaliselt võimalusi erinevatele ökosüsteemidele.



Joonis 1.1. Tallinna lahe kaart ja Kopli lahe asukoht (Maaameti kaardirakenduse kuvatõmmis)

1.2 Mere süvalasu dünaamika

Mere lasust merekeskkonda paisatava heitvee edasine käik sõltub mitte ainult väljavoolu kiirusest ja suunast, vaid ka väljavoolava vee tihedusest. Seetõttu on oluline teada nii väljavoolava vee füüsikalisi omadusi kui ka merekeskkonnas valitsevaid tingimusi mere lasu asukohas. Kui mere suunas juhitud vesi on ümbritsevast mereveest kergem, seguneb kergem veemass koos selles lahustunud ainete hulga kuni sügavuseni, kus saavutatakse ujuvuse neutraalne olek, ning veesamba vertikaalne gradient stabiliseerub. Kui mere suunas suunatakse vett, mis on tiheduselt suurem (raskem) kui merevesi, siis see veemass kapseldub süvaveekihtidesse ja võimaluse korral voolab vastavalt põhjareljeefile sügavamatesse veekihtidesse, kuni kohtub sarnase tihedusega veekihtiga. Sel juhul sõltub vette lastud veemassi liikumine pinnakihi ning edasi rannikualadele pinnakihi segunemise protsessidest, nagu tuul, lained ja konvektsioon, või süvamere kergetest kihtidest (apvelling).

2 Mudeli kirjeldus

2.1 NEMO hüdrodünaamika mudel ja Kopli lahe seadistus

Töös on rakendatud hüdrodünaamika mudelit NEMO (Nucleus for European Modeling of the Ocean) versiooni 4.2 (Madec et al., 2019). Mudeli erinevaid seadistusi on edukalt rakendatud Läänemere operatiivseks prognoosiks (Kärna et al., 2021; Elken et al., 2021) ning ka erinevates protsess-uuringutes (LNG metoc uuring).

NEMO hüdrodünaamika mudel on paljude okeanograafiliste rakenduste oluline nurgakivi, mis pakub laiahaardelist raamistikku mere dünaamiliste protsesside modelleerimiseks. Erinevatest komponentidest koosnev mudelsüsteem on arendatud koostöös paljude Euroopa teadusrühmadega, hõlmates kõrgetasemelisi kompetentse nii matemaatika, merefüüsika kui ka IT spetsialistidelt. NEMO mudeliga saab kvantifitseerida rannikuprotsesside mõistmiseks vajalikke hoovuseid ja ainelevikut kasutades põhilisi mere dünaamika võrrandeid, mida lahendatakse kõrgemat järku numbriliste skeemidega. Mudel on omakorda komplekt erinevatest moodulitest, mis lahendavad jääolusid, mere ja atmosfääri rajatingimusi, ainelevi ja dünaamikat. Kõik komponendid on omavahel ühendatud terviklikuks mudelsüsteemiks, mis tagab terviklahenduse uurimaks erinevaid rannikumere aspekte erinevates tingimustes. NEMO rakendab kaasaegseid teadusarvutustehnoloogiaid ja on oma skaleeritavuse tõttu võimas tööriist rannikumere protsesside uurimisel, pakkudes erinevaid lahendusi merekeskkonna uuringutes ja operatiivokeanograafia rakendustes.

2.1.1 NEMO Kopli lahe seadistus

Käesolevas uuringus arendatud NEMO mudeli Kopli lahe seadistus (NEMO-KOPLI50) hõlmab Kopli lahe ja selle ümberkaudset rannikumere ala 24.5764 °E kuni 24.7015 °E ja 59.4267 °N kuni 59.4802 °N; 50 meetri horisontaalse lahtusega. Vertikaalis on veesammas jagatud muutuv sammuga 34 kihiks, ($dz=0.5$ m sügavuste vahemikus 0-15 m; $dz=1.7$ m, 15 m - põhi). Mudel kasutab ajasammu 20 sekundit. Mudeli topograafia on interpoleeritud mudeli võrgule EMODNet andmebaasist ning sellele järgnevalt on rannajoont täpsustatud kasutades aero- ja satelliitfotosid.

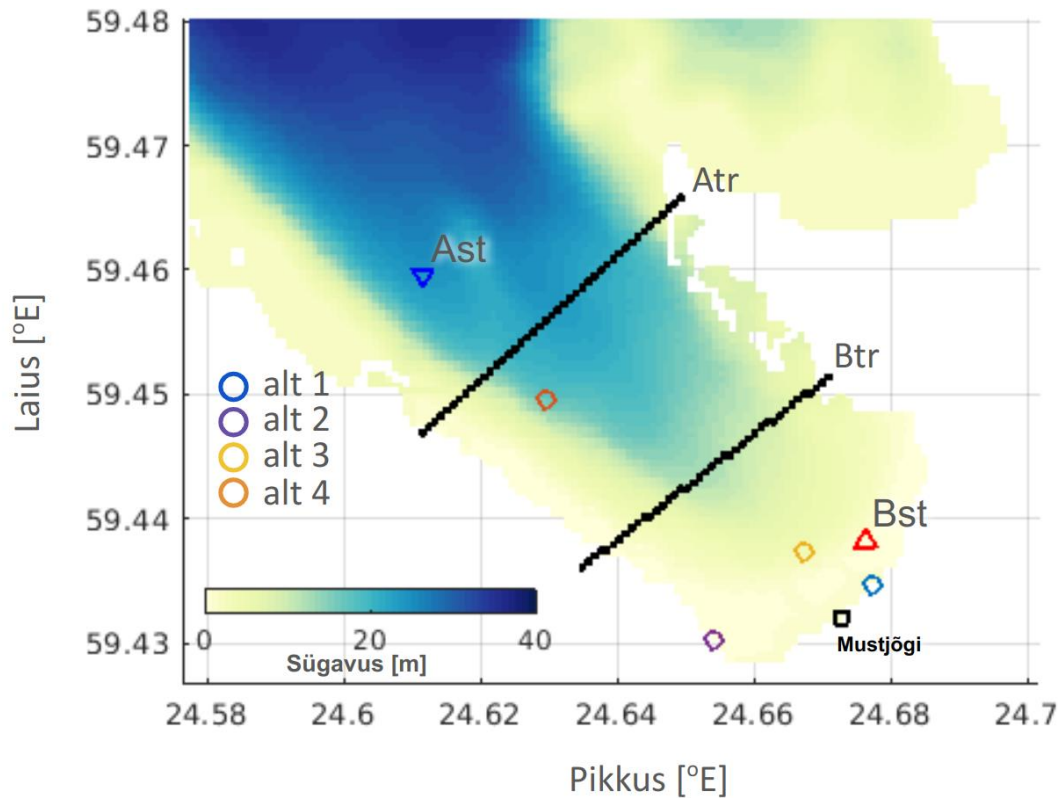
Kopli lahe uurimisel on kasutatud järgmisi lähendusi hüdrodünaamilistele protsessidele. Atmosfäärsete soojusvoogude ja tuulepinge parametrizeerimiseks on rakendatud NCAR-tüüpi lähendusi (Large & Yeager, 2004). Horisontaalne difusioon on lahendatud Laplace'i operaatoriga, mille difusioonikoefitsient on parametrizeeritud Smagorinsky koefitsiendiga 3.5. Põhjahõõre on parametrizeeritud logaritmilise piirkirki meetodiga, kus põhjakareduse parameetrik on konstantselt määratud 0.001. NEMO 4.2 kasutab merevee tiheduse arvutamiseks TEOS-10 olekuvõrrandit, mis sõltub temperatuurist, soolsusest ja rõhust. Vertikaalne turbulentsus on lahendatud kasutades Canuto stabiilsuse funktsioonidega k-omega turbulentsuse mudelit (Umlauf & Burchard, 2003). Mudel on ühendatud jäämudeliga SI3 (Aksenov jt, 2019), milles on parametrizeeritud nii termodünaamilised kui ka jää protsessid.

Rajatingimusteks kasutab Kopli lahe mudel varasemalt arvatud suuremastaabilisi meteoroloogia ja mere mudelite andmeid. Meteoroloogilised rajatingimused pärinevad ECMWF (Euroopa Keskpika Ilmaennustuse Keskus) IFS (Integreeritud Ilmaprognoos süsteem) prognoosmudeli andmebaasist (Haiden et al. 2018). Mudeli arvutusvõrgule on tunnise sammuga interpoleeritud õhurõhk, õhuniiskus, tuule kiirus, temperatuur, sademed, pika- ja lühilaineline kiirgusväli. Avatud radadele on seatud tunnised andmerek NEMO-EST05 veetasemest, soolsuse ja temperatuuri profiilides. Rakendatud on 5-võrgusammuse käsna-kihiga (Sponge layer) ääretingimuste silumist, mis tagab suurema stabiilsuse oludes, kus võivad tekkida vastuolud mudeli lahendi ja ääretingimuste vahel. Soolsuse ja temperatuuri algtingimused on ka arvutusvõrgule interpoleeritud NEMO-EST05 prognoosmudeli andmetest, millele on järgnenud 3 päevane mudeli soojendus periood, et veetasemed ja tihedus väljad kohaneksid välismõjudega.

Referents periood hoovuste uuringuks on 2022 - aprill kuni 2023 - oktoober, mis lubab kirjeldada Kopli lahe hüdrodünaamikat erinevatel aastaegadel. Ning eksperimendid erinevate vihmavee kollektorite merelaskudega on teostatud 2023 aasta suve ja sügisele perioodil 1 juuli - 31 oktoober. Selle perioodi jooksul toimus mitmeid märkimisväärsed ilmastikunähtusi, millest eriti silmapaistvaks võib lugeda tugevaid torme.

Augustil liikus üks neist tormidest üle Eesti, tuues kaasa mitmeid tugevaid tuulepuhanguid erinevates piirkondades. Samuti registreeriti oktoobris tugevate lääne tuulte korral Soome lahes rekordiliselt suur oluline laine kõrgus. Harku (Tallinn) meteoroloogiajaamas mõõdeti suve jooksul sademeid, mis ületasid tavapärasest keskmist 20%. Eriti tugevad hoogsajud tabasid Tallinna 26. juulil, kui ööpäeva jooksul kogunes sademeid 48 mm, mis moodustas 58% juuli keskmisest sajunormist. Sellest kogusest langes ühe tunni jooksul 25 mm vihma, põhjustades mitmel pool linnas üleujutusi. Tugevate ja püsivate sademete periood

jätкус septembri (13. ja 23.) ja oktoobri algusesse. Vaadeldav periood on piisavalt esinduslik ilmestamaks nii tugevaid torme kui ka ägedaid hoovihma sündmusi (KAUR web, 2023).



Joonis 2.1 Kopli lahe mudeli topograafia ning erinevate merelaskude (alt 1-4) asukohad. Koht väljavõttes Kopli lahe avaosas (Ast) ja Stroomi ranniku lähedalt (Bst).

2.2 Markeraine mudelid

Markerainete kirjeldamiseks Kopli lahe ja sellega piirnevas rannikumeres on NEMO mudeliga ühildatud FABM liidessüsteem, mis võimaldab rakendada erinevaid dünaamilisi veekvaliteedi mudeleid ning ühendada need NEMO poolt lahendatavate füüsikaliste protsessidega (adveksioon, difusioon). Käesoleva uuringu tarbeks on kasutatud laialt kasutatud heljumi mudelit, millesse on arvestatud settimise ja resuspensiooniga (Molen 2009, Gräwe 2009).

Töös on allikatele lisatud Mustjõe ja merelaskudele kolme tüüpi markeraine ühikkoormuseid, mis käituvad erinevalt vastavalt järgmistele omadustele.

- püsiv markeraine - allub hoovuste transpordile, seguneb vastavalt füüsikaliste protsessidele sügavamtesse veemassidesse, kuid ei lagune. Ainus kadu sellisele markerainele on transport vaadeldavalt merealalt välja.

Kuna aine hulk ei vähene keemiliste/bioloogiliste ja füüsikaliste protsesside poolt, vaid aine jaotatakse ruumis ümber, siis on see hea indikaator maksimaalsele mõjule. Kemikaalidest kirjeldab selline marker aine püsivate vees segunenud reostusainete levikut (nt raskemetallid, CDOM ehk lahustunud orgaaniline aine, integraalne mõju).

- lagunev markeraine - sarnaselt püsivale markerainele allub füüsikalisele segunemisele ja transpordile, kuid sellele on määratud BHT7 lagunemise kiirus.

Iseloomustab bioaktiivsete ainete levikut, mis alluvad merevees lagunemisele. Lagunemisega markerainet saab interpreteerida ka kui veeslahustunud toitainet, mida tarbitakse veeorganismide poolt.

- settiv markeraine - lisaks segunemisele ja hoovuste transpordile rakendub markerainele ka konstantne settimise kiirus. Jõudes põhjalähedasse kihti settib ja akumuliseerub see markeraine settekihti. Tugevamate hoovuste korral resuspenseerub aine tagasi veesambasse, kus hajub vastavalt hoovustele ja horisontaalsele difusioonile ruumis ümber.

Selline markeraine sobib settledünaamika uuringuteks, kus on vaja hinnata sette resuspensiooni ja akumulatsiooni piirkondasid. Markerainet võib seostada ka raskemetallide fraktsiooniga, mis seostuvad (*partitioning*) settiva heljumiga ning reostavad meresetteid.

Markeraine võrrandi üldkuju on järgmine:

$$DCDt = dCdt + \text{Adveksioon} + \text{Difusioon} = \text{Protsessid}$$

Püsiva markeraine korral ei ole ainel kadusid ega allikaid muid kui need, mis on etteantud sisendkoormustena või kontsentratsioonidena vaatud radadel.

Töös on rajatingimustele rakendatud null-kontsentratsioonid, mis lubab uurida üksnes vaadeldavas merealas vette paisatud reostuse levikut. Radadelt välja voolates lahkub aine uuritavast merepiirkonnast lõplikult.

Koormustena on kasutatud ühik kontsentratsioone. Lineaarse lähendusena saab modelleeritud ühik-kontsentratsioonilist markerainet ülekanda teiste konstantsete koormus kontsentratsioonide väärtuste jaoks.

2.2.1 Markeraine lagunemise mudel

Lagunemine on kirjeldatud esimest järku differentiaalse võrrandiga

$$DC/Dt = -r \cdot C$$

kus r on eksponentsiaalse lagunemise kiirus.

BHT7 kontsentratsiooni korral, kus on eeldatud et orgaaniline aine laguneb keskkonnas 7 päeva jooksul on r väärtus -0.627 1/päev . Sellise kiirusega lagunemisel väheneb BHT7 kontsentratsioon 2 suurusjärku 7 päevaga.

2.2.2 Settemudel

Setete kirjeldamiseks Kopli lahes on kasutatud sette-heljum mudelit. Veekvaliteedi ja mereökosüsteemide perspektiivis on tähtis teada nii heljumi hulka veesambas kui ka setete ümberpaiknemist ruumis. Mudelis on kirjeldatud heljumit kasutades heljumi hulka settekihis ja heljumi kontsentratsioone veesambas.

Kui resuspensiooni tagajärjel sattub heljum veesambasse, siis paigutub see hoovustega ruumis ümber. Veesamba ja põhjakihi vahel toimub samaaegselt settimine ja kriitilise nihkepinge ületamise korral resuspensioon.

Settemudeli üldvõrrand:

$$DC/Dt = - \text{Settimine}$$

Settimine on parametrizeeritud konstantse laskumis kiirusega, mida kasutatakse ka settimiseks settekihti vastavalt keskmisele terasuurusele: $\text{Settimine} = w_s \cdot dC/dz$.

Veesamba ja settekihi piirkihil toimub heljumi olemasolu korral settimine ja kui vee liikumise nihkepinge (τ_{bot}) ületab kriitilise nihkepinge, siis resuspensioon (Res). Settimine sõltub settimiskiirusest ja heljumi kontsentratsioonist veesambas Resuspensiooniks on kasutatud esimest järku mudelt, mille 1-järku kiirus sõltub põhjahõõrdest ja sette hulgast:

$$\text{Res} = \min(M_0, M_1 \cdot C_{\text{sed}}) \cdot (\tau_{\text{bot}}/\tau_{\text{cri}} - 1)^{1.5},$$

kus empiirilised kiirus konstandid on $M_1=3e-5 \text{ (1/s)}$ ning $M_0=0.5e-2 \text{ (g/m}^2 \text{ /s)}$

Mittelineaarsed adveksiooni liikmete lahenduste juures on kasutatud kõrgemat järku numbrilisi skeeme, mis pärsivad numbrilist segunemist, kuid tagavad aineväljade positiivsust ja stabiilsust. Heljumi adveksioon on lahendatud rakendades positiivset 4.-järku voogparandatud skeemi (FCT) ning diffusiivsus koefitsient Laplace'i liikme jaoks on parametrizeeritud Smagorinsky võrrandiga kasutades Smagorinsky koefitsienti 3.5.

Töös on kasutatud heljumi fraktsiooni, mis iseloomustavad raskemat mittelahustunud heljumi vertikaalse settimiskiirusega 10 m/päev ja kriitilise nihkepingega 0.025 N/m².

2.3 Sissevoolude mudel

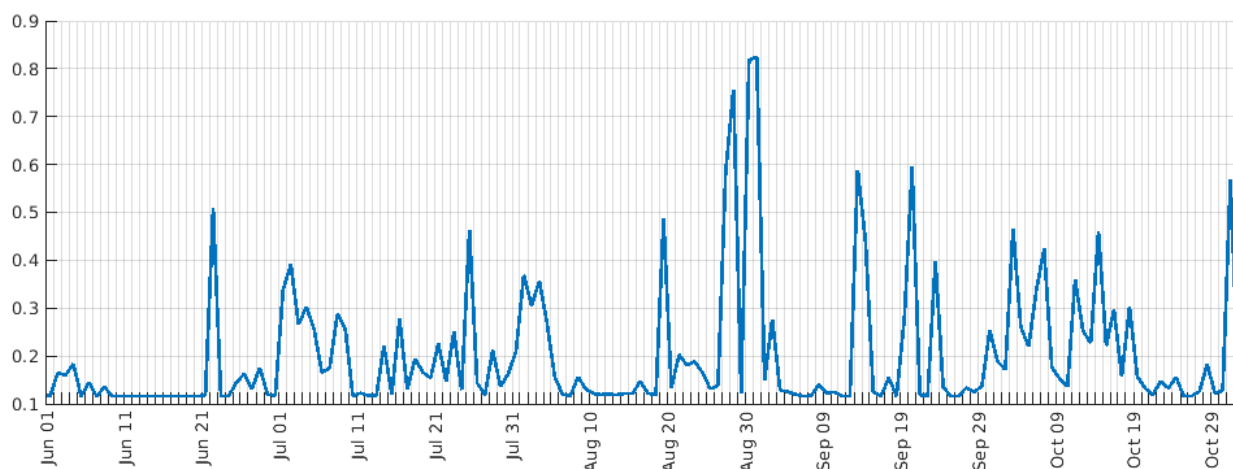
Peamiseks sissevoolu allikaks Kopli lahte on Mustjõgi millele on modelleeritud vihmavee äravoolu aegread, võttes aluseks sademed meteoroloogia mudelist (ECMWF) ning äravoolu vaatlusi varasematest uuringutest.

Mustjõe päevased vooluhulgad (Q , ühikutes m³/s) on saadud normeerides Mustjõe vooluhulki sademete vaesel (10 000 m³/päev = $q_1 \cdot 24 \cdot 3600$) ja sademete rohkel perioodil (30 000 m³/päev = $q_2 \cdot 24 \cdot 3600$) päevaste sademetega Tallinna piirkonnas (P). Mustjõe ja merelasu minimaalne vooluhulk (10 000 m³/päev,) iseloomustab päevi, mil sademeid ei esinenud.

$$Q = P_{norm} = q_1 + 0.5 \cdot (q_1 + q_2) \cdot P / (2 \cdot P_{std})$$

P_{std} on sademete aegrea standard hälve.

Vihmavee kollektorite merelaskude täpseid vooluhulkasid ja äravoolu torude dimensioone ei ole veel praeguses planeeringuetapis teada, seega käesolevas töös on valgalade võrdluse tulemusena rakendatud planeeritavatele merelaskude samu vooluhulkasid mis Mustjõe. Kavandatava merelasu valgala on 8.6 km², mis on mõnevõrra väiksem kui Mustjõel (13.2 km²), kuid sademete osakaal, mis suunatakse äravoolu on suurem kui Mustjõel. Väiksemalt (kavandatav) alalt suurenenud äravool indikeerib hästi ka kliimamuutustest tingitud suurenenud sademeid.



Joonis 2.2 Sademete äravoolu aegread, mida on kasutatud merelaskude ja Mustjõe sisendina Kopli lahte. Ühik m³/s

3 Triivhoovuste vaatlused ja mudeli valideerimine

Uuringu raames viidi läbi 2 pinnahoovuste eksperimenti, et valideerida mudeli poolt ennustatud hoovuste jaotusi ja kiiruseid. Eesmärk oli määrata hoovuste ruumilisest ja ajalisest muutlikkusest tingitud triiv-trajektoore ning võrrelda trajektoore mudeli vastavate hoovuse jaotuste aegridadega.

Triivpoid konstrueeriti käepärastest PVC torudest ja veekindlast tihend massist. Alumiiniumist karkassile kinnitatud pvc kile purjede eesmärk oli ankurdada triivtorud ülemise veekihi külge, vähendades sellega tuule mõju. Vajalikud akud, GPS ja sidesüsteemid lubasid salvestada poide asukoha koordinaate reaalsajas. Võrdluseks veesati ekspeditsioonidel koos torudega vette ka väiksema LainePoiss triivpoi, mis erinesid oma tuule ja vee takistuse omaduste poolest.



Joonis 3.1 Triivpoid, koos veealuste purjedega Lennusadama kail (15. juuli 2023).

Ekspeditsioon 1: 15 juuli 2023

- 3 triivpoid

Kommentaariid:

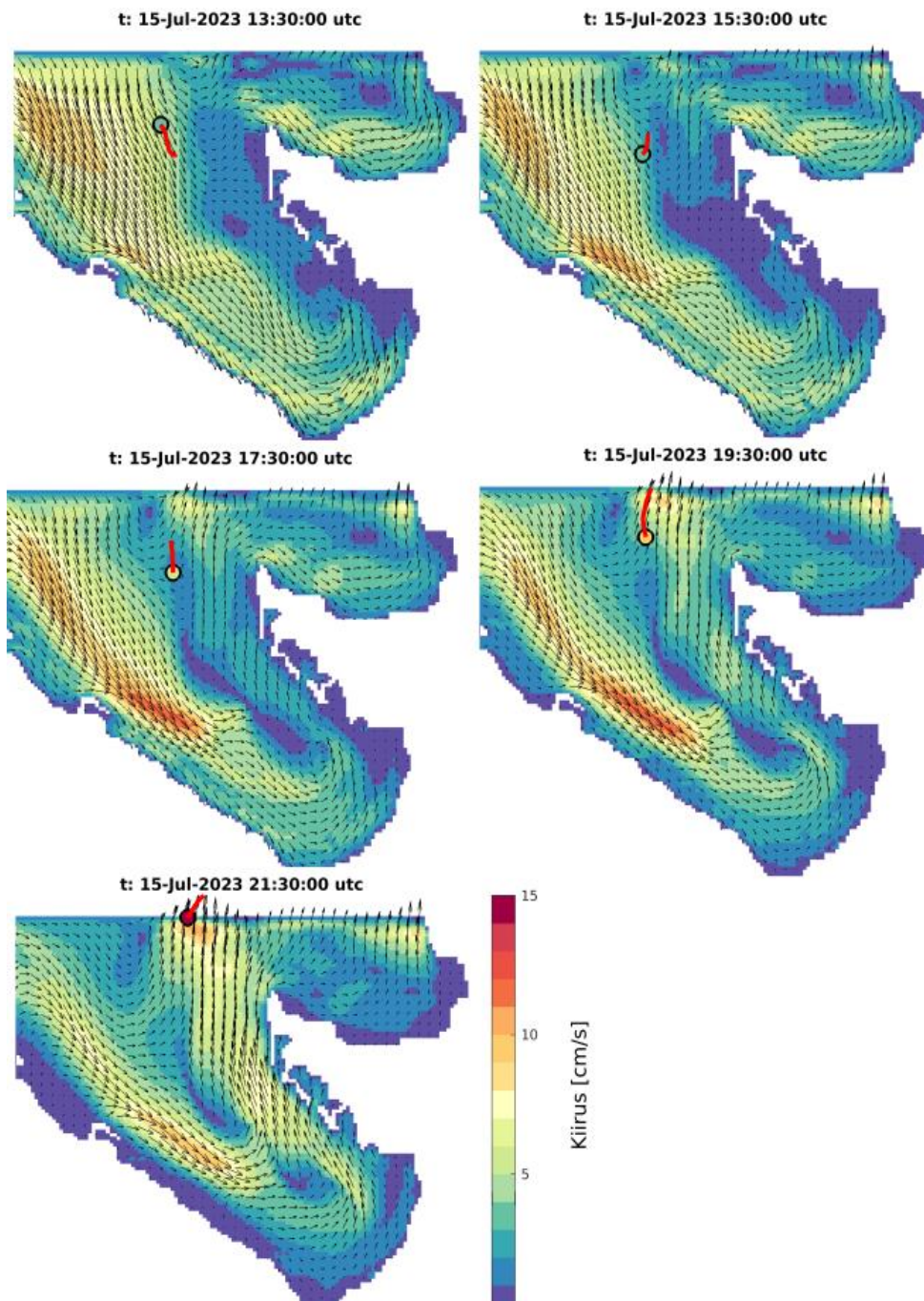
Kõik triivpoid veesati Kopli lahe avaosas ühes ja samas asukohas (Joonis 3.2). Kuid 15. juuli õhtuks olid kõik poid triivitud Kopli lahest välja ja jätkasid oma teekonda ida suunas. 16. juuli pealelõunaks olid kõik drifterid, üksteisest umbes paarisaja meetri kaugusel, jõudnud Tallinna reidile. Sealt tuli need kiiresti eemaldada kuna tihe laevaliiklus võis ohustada vabalt triivivaid seadmeid.

Ekspeditsioon 2: 29 november 2023

- 3 triivpoid ja veealune LainePoiss triivpoi

Kommentaariid:

Ekspeditsiooni käigus veestati poid ennelõunal Stroomi ranna lähedasse merepiirkonda. Peale kolme tunnist katset triivpoid eemaldati, sest hakkas pimenema.



Joonis 3.2. Triivpoide 2-tunni triivtrajektoorid Kopli lahes erinevatel ajavahemikel 15 juulil. Ringi asukoht näitab algus kohta ning ringi sisuvärv 2-tunni keskmist triivikiirust värvusskaalal. Mudeli hoovusväljad on näidatud taustal vektoritena ja kiirustena värvusskaalal.

Juulikuu triivpoide eksperimendis testiti veealuste purjedega täiustatud poide võimekust jälgida hoovuste liikumisi ning analüüsiti torudrifterite parendatud omadusi. Kõik triivpoid paigutati Kopli lahe kirderanniku lähedale, mis ekspeditsioonile eelnenud nõrga põhjatuule tingimustes võinuks triivida lahte sisse.

Joonisel 3.2 on toodud mudeli pinnakihi (0.5 m sügavusest) hoovusväli kahe tunnise sammuga alates triiv-torude merre heitmisest.

Mudeli tulemustest on näha, et 15. juuli hoovusvälja iseloomustab mastaapne lahte sissevoolu tsoon lahe lääne osas, mis ulatub üle terve lahe suudme. See aheneb 6 tunni jooksul kitsaks sissevoolu vööndiks läänerannikul, mis õhtu lähenedes nõrgeneb. Samal ajal, kui sissevool läänerannikul nõrgeneb, tugevneb idakaldal väljavool.

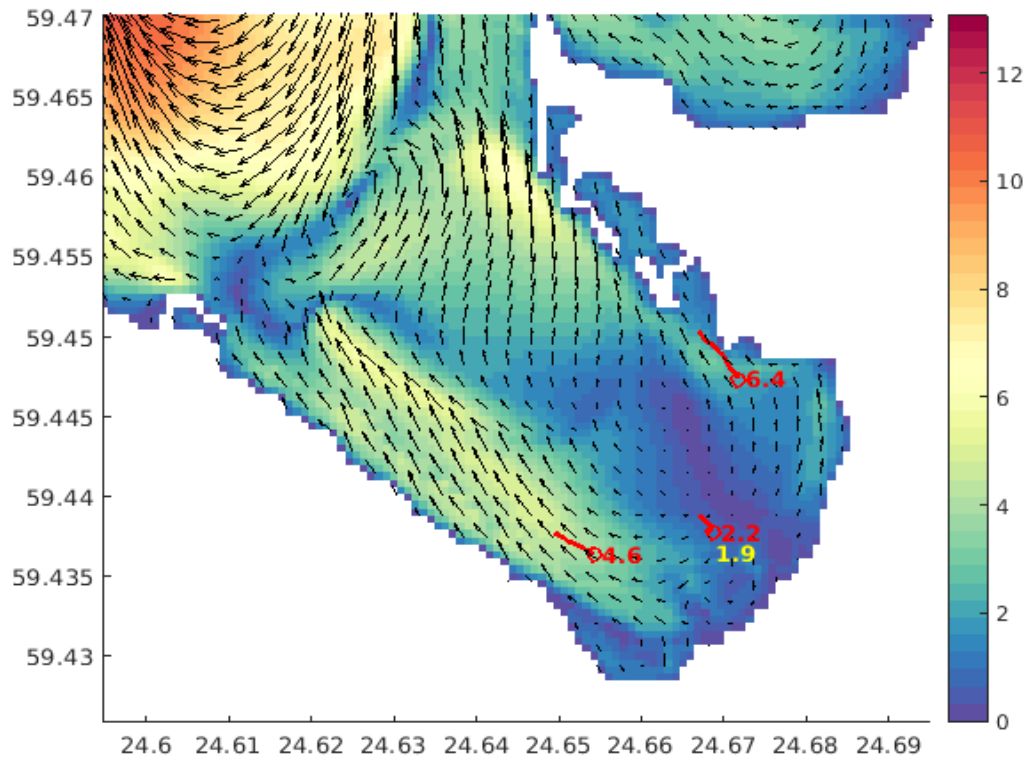
Triiv-toru liigub esimese paari tunni jooksul lahte sisse kiirusega 5-6 cm/s. Alates kella 15 UTC muudab triiv-toru suunda ning triivib põhjasuunas lahest välja. Ajavahemikus 17-20 UTC kiireneb triivpoi liikumine lahest välja koos tugevneva väljavoolu tsooniga, mis on nähtav ka mudeli tulemustest. Mudel kirjeldas hästi hoovuste ajalis-ruumilisi muutuseid, mida oli näha ka triiv-torude trajektooride muutustes. Mudeli alahinnatud väljavoolu ulatust ja ajastus võib olla tingitud avatud radadelt hilinevad veetaseme muutustest.

Teise vaatlusperioodi eel viidi läbi mudel arendus, mis võimaldas prognoosida järgmise päeva olusid, kasutades NEMO-EST05 meremudeli rajatõingimusi ja ECMWF keskuse meteoroloogiamudeli prognoose. Joonisel 3.3 kajastunud tulemuste põhjal otsustati analüüsida lahe lõunaosa hoovuste jaotust, kus mõlemal kaldapool (lõuna ja põhja) toimus veevool lahest välja ning stroomi ranna lähedal ilmsid madalad hoovuse kiirused. Kolm triiv-toru ja üks LainePoiss veesati umbes kaheks tunniks merre kolmes erinevas piirkonnas, eesmärgiga kaardistada hoovuste ruumilist jaotust: kirdeosas (Joonis 3.3 A), Stroomi ranna lähedal (B) ja Rocca al Mare lähedal (C), kust algas lahest väljavoolav hoovustesüsteem.

Modelleeritud hoovused vastasid üldjoontes hästi drifteritelt saadud koordinaatidele ning samuti keskmiste triivkiirustega. C triiv-toru puhul, mille keskmine kiirus oli kahe tunni jooksul 4.6 cm/s, oli nii suund kui ka hoovuse kiirus mudeliga kõige paremini kooskõlas. B triiv-toru triivis kahe tunni jooksul peamiselt hoovuste mõjul vaid mõnesaja meetri kaugusele. Samal ajal liikus LainePoissi poi, mis oli ankurdatud sügavamale, algsest asukohast veelgi vähem ja kaldus rohkem edelasse.

Lahe põhjaosas triivitud triiv-toru (A) liikus paralleelselt kaldaga keskmise kiirusega 6.4 cm/s. Hoovuste kiirus oli sel perioodil küllaltki muutlik, varieerudes vahemikus 4-8 cm/s. Mudel näitab, et hoovus kulgeb piki kallast välja lahest, kuid kiirused jäävad vahemikku 2-4 cm/s.

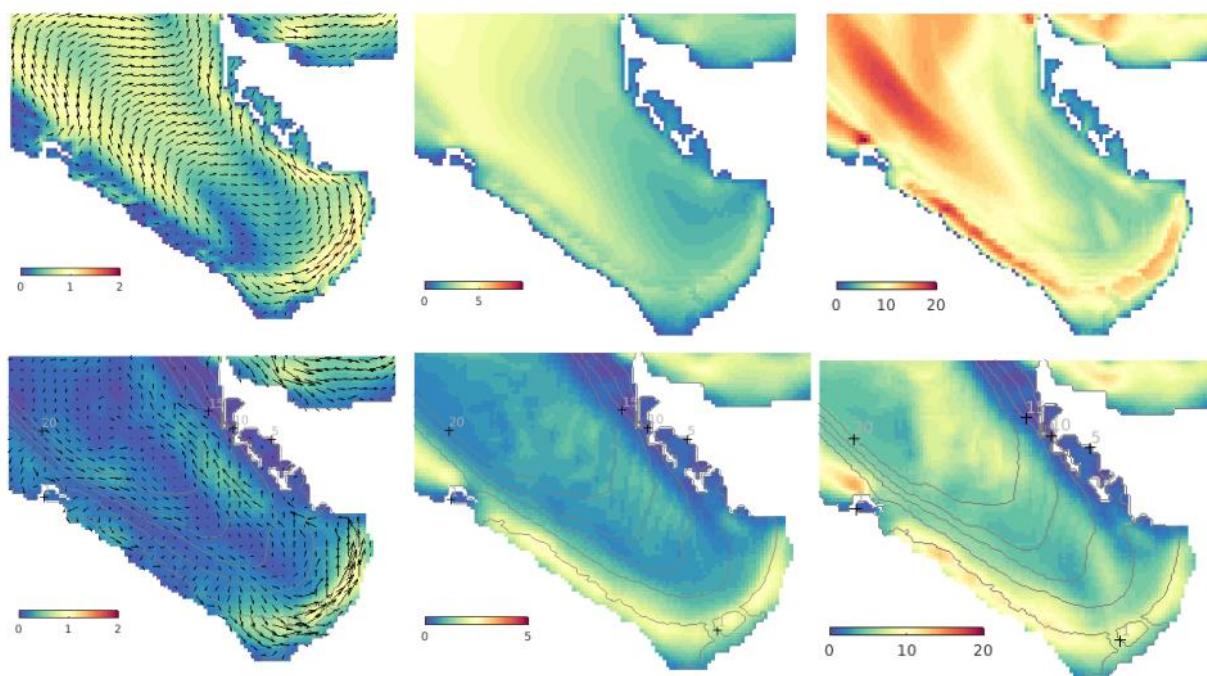
B triiv-toru ja LainePoisi võrdlus näitas, et triiv-torud on oma väljaulatuva antenniosa tõttu mõnevõrra tundlikumad tuule mõjutustele, mistõttu on A-drifter tõenäoliselt rohkem mõjutatud ka kohalikest tuuleoludest.



Joonis 3.3 Kopli Lahe pinnakihi hoovused (ühik cm/s) 29. novembril 11UTC. Triivpoide trajektoorid tähistatud punaste joontega. Keskmised triiv kiirused on toodud joonisel punaselt triivpoide jaoks ja kollane LainePoiss triivpoi korral.

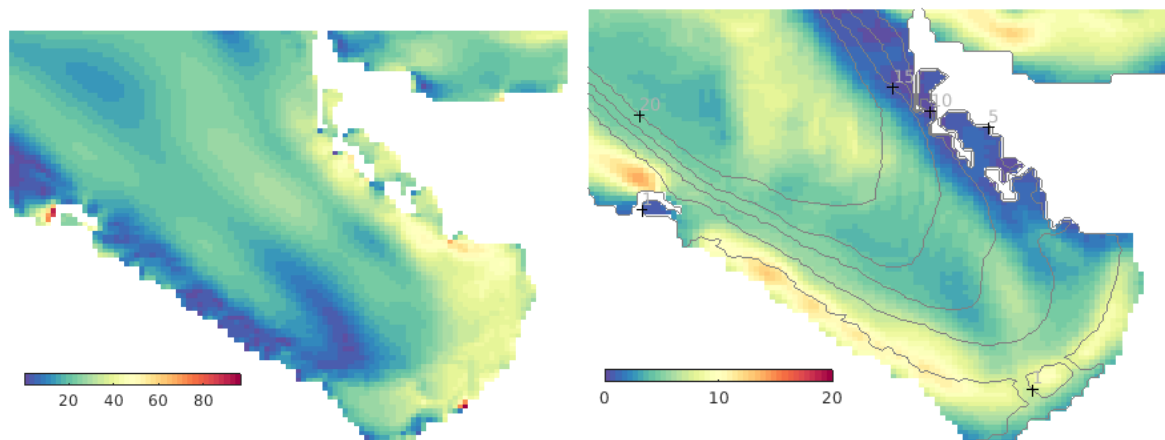
4 Kopli lahe hüdrodünaamika

Üle aasta pikkusest simulatsioonist ilmnevad Kopli lahe pinnakihi mitmed hoovussüsteemid, mida iseloomustab keskmiste hoovuste jaotused (Joonis 4.1). Tinglikult võiks eristada kahte peamist väljavoolu suunda: üks algab lõunaosast ja kulgeb mööda ida ja kirde kallast paralleelselt rannikuga kuni suudmeni; teine väljavool ulatub piki Kakumäe poolsaare kallast, pöörates järk-järgult ida suunas ning liitudes esimese hoovussüsteemiga. Keskmises põhjakihi hoovuste jaotuses nähtub, et väljavoolu kompenseerib sissevool lahe keskteljel, veidi edelas Kakumäe poolisel nõlval. Järk-järgult sügavamale liikudes algavad sellest pinnakihi alusest sissevoolust Pelguranna äärne hoovussüsteem ja Kakumäe kaldalähedane väljavool. Keskmise hoovuse kiirus on kõige suurem Kakumäe ja Stroomi ranna vööndis võrreldes kirde- ja idakalda lähedaste piirkondadega. Selles piirkonnas esinevad ka kõrgeimad maksimumkiirused (<20 cm/s).

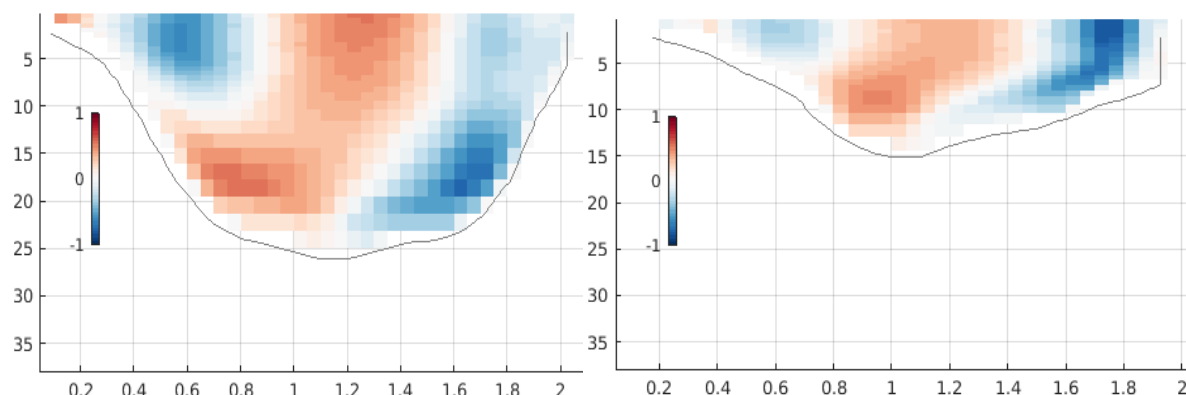


Joonis 4.1 Keskmised pinnakihi hoovuse suunad ja vektoriaalsed kiirused (vasak); keskmine hoovuse kiirus (keskel); maksimaalne hoovuse kiirus (paremal). Ülemises reas pinnakiht, alumises reas põhjalähedane kiht. Ühikud cm/s.

Üsna madal hoovuste püsivusindeks (vektoriaalse hoovuse kiiruse suhe kogu keskmisesse kiirusesse, (Andrejev et al., 2004; valem 5) näitab, et statistiliselt keskmine hoovustesüsteem peegeldab vaid osaliselt Kopli lahe hoovusi, ja seda piiratud ulatuses. Püsivamad hoovused ilmnevad peamiselt idakalda läheduses, kus püsivusindeks võib ulatuda kuni 50 protsendini. Lahe keskosas ja läänekaldal on püsivusindeks piirkonniti umbes 30%. Lahe läänerrannikul on püsivusindeks madal (<10%), kuid siiski esineb seal tugevamate hoovuste vööndeid, mis viitab sellele, et hoovuste suuna muutlikkus on selles piirkonnas suur.



Joonis 4.2 Hoovuste püsivus indeks [%] pinnakihis (vasakul) ja põhjakihis (paremal).



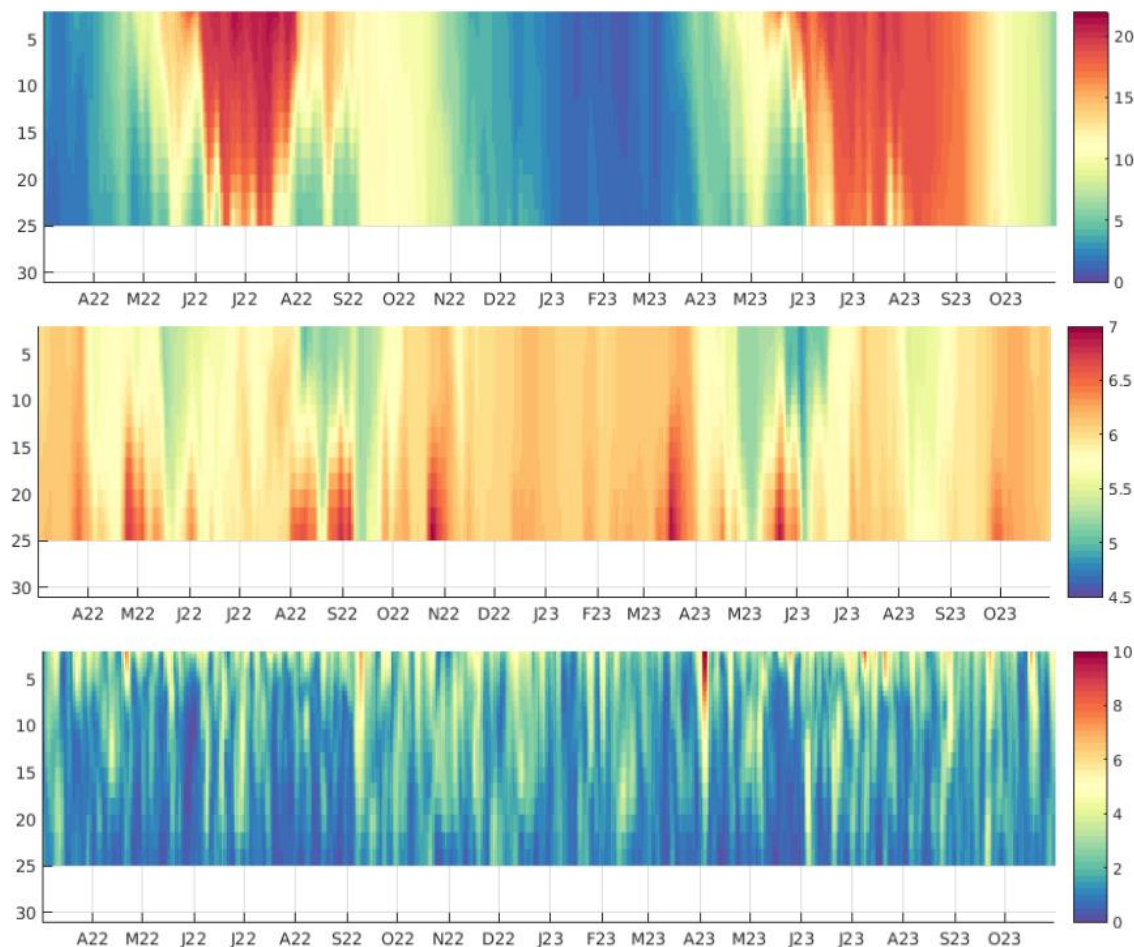
Joonis 4.3 Keskmised hoovuse suunad ja kiirused lõikel Atr (vasak) ja Btr (parem). Positiivsed väärtused näitavad keskmist lahte sissevoolu (kagu suunas) ja negatiivsed väärtused väljavoolu (loode suunas). Ühik cm/s.

Keskmistatud lahe peatelje suunalised hoovused lõigetel Atr ja Btr (asukohad näidatud Joonisel 2.1) on toodud joonisel 4.3 kujutamaks hoovuste keskmist vertikaalset struktuuri. Kui ülemises 10 m veekihi on hoovused peamiselt ühesuunalised, siis sügavamates lahe osades esineb ka vertikaalselt kahesuunalisi hoovussüsteeme.

Keskmine hoovuste struktuur lõigetel Atr ja Btr näitab, et ülemises 10 m veekihi on hoovused suunatud keskmiselt lahest välja kallastel ning lahe keskosas lahte sisse. Sügavamates kihtides on keskmine hoovus jaotunud kahesuunaliseks - lahe lääne nõlval voolab vesi keskmiselt lahte sisse ja ida pool lahest välja.

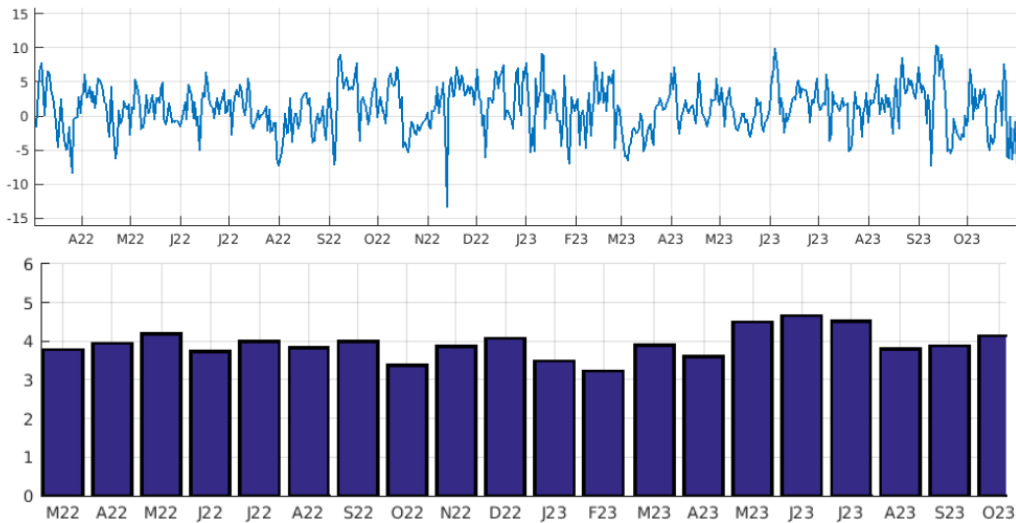
Lahe sügavamast osast virtuaalses jaamas Ast, mille asukoht näidatud Joonisel 2.1, on toodud temperatuuri, soolsuse ja hoovuse kiiruse ajaline-vertikaalne jaotus (Joonis 4.4). Valdavalt on vesi Kopli lahes läbi segunenud ning pinnakihi temperatuurid ulatuvad põhjakihtideni välja, samas ilmnevad episoodilised juhud, kus esineb parameetrite tugev vertikaalne kihistumine. Soolsuse ja temperatuuri vertikaalsete jaotuste ajaline dünaamika näitab, et kihistumine sõltub suvekuudel peamiselt soolsuse

muutlikusest. Episoodilised soolase ja jahedama vee sissevoolud sügavamatesse kihtidesse tekitavad episoodilisi tugeva stratifikatsiooniga olusid ka perioodidel kus domineerib konvektiivne segunemine. Talvel on veesammas ühtlaselt läbi segunenud ning sissevooludest tingitud stratifikatsiooni tugevenemine on väiksem kui suvel. Hoovuste tugevused on ajas väga muutlikud ning olulist sesoonsust muutlikkust ei nähtu. Suurimad kiirused paiknevad pinnakihi lähedal ning ei ulatu harilikult sügavamale kui 5 m. Tugevamate hoovuste sündmused on samaaegsed stratifikatsiooni vähenemisega.



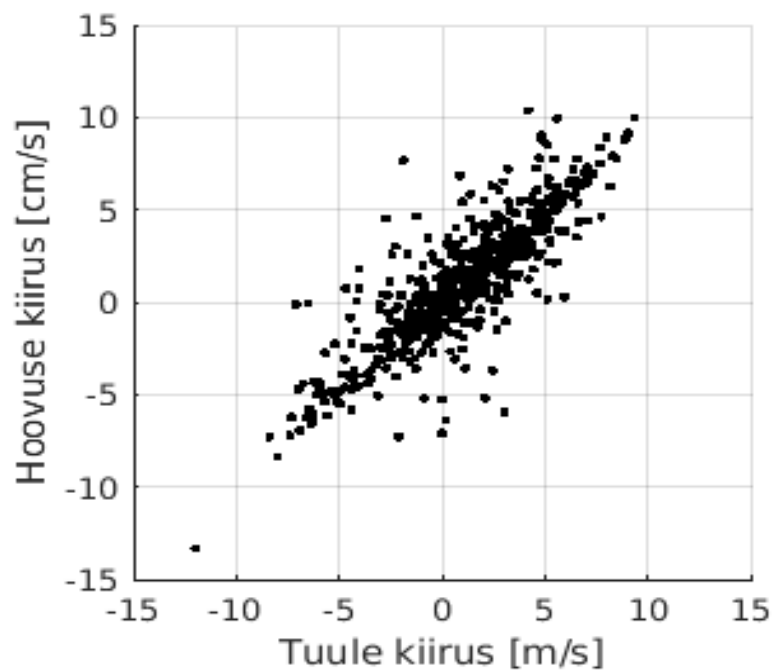
Joonis 4.4 Vertikaalsete profiilide aegread jaamas Ast (asukoht joonisel 2.1) temperatuuri (ülal), soolsuse (keskel) ja hoovuse kiirustele (all).

Hoovused Stroomi rannaga piirnevas hoovus süsteemis (asukoht Bst esitatud Joonisel 2.1) on peamiselt kahesuunalised (Joonis 4.5). Nii nagu ka lahe avaosas ei nähtu olulist sesoonsuse signaale hoovuse kiirustes. Kuu keskmised hoovuse kiirused on püsivalt 4 cm/s ümber. Hoovuste muutlikkus on ebaregulaarne - esineb erineva pikkusega perioode, kus hoovused voolavad samas suunas. Külmal ajal on hoovused muutlikumad kui suvel.

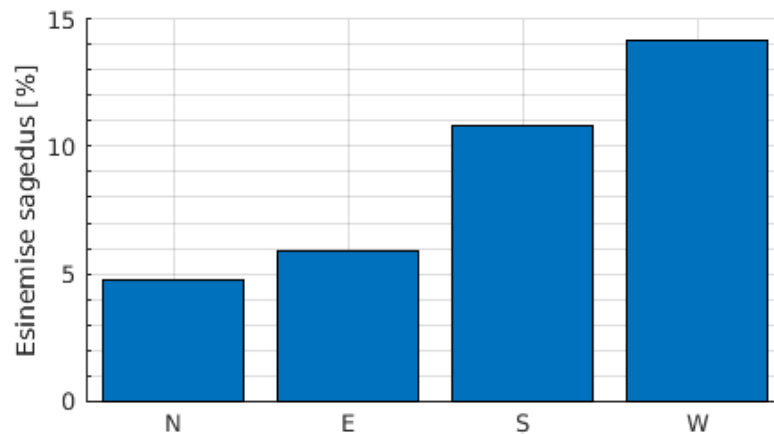


Joonis 4.5 Hoovuste päeva-keskmised kiirused (ülal) ja kuu keskmine kiirus (all) Stroomei rannaga piirneval merealal. Positiivsed väärtused tähistavad vee liikumist piki rannajoont põhja suunas, negatiivsed väärtused lõunasuunas. Ühik cm/s.

Joonisel 4.6 on toodud Stroomei ranna lähedaste hoovuste sõltuvus pikki rannikut puhuva tuule komponendiga. Andmeridade vaheline determinatsioonikordaja ($r^2 = 0.70$) näitab, et 70% hoovuste muutlikusest Stroomei ranna juures saab kirjeldada kasutades tuule suunda ja kiirust. Veetasemete ja hoovuse kiiruse vaheline korrelatsioon on madal ($r^2 < 0.1$), kuid veetaseme muutuste ja hoovuse kiiruse vaheline korrelatsioon on suurem ($r^2 = 0.16$).

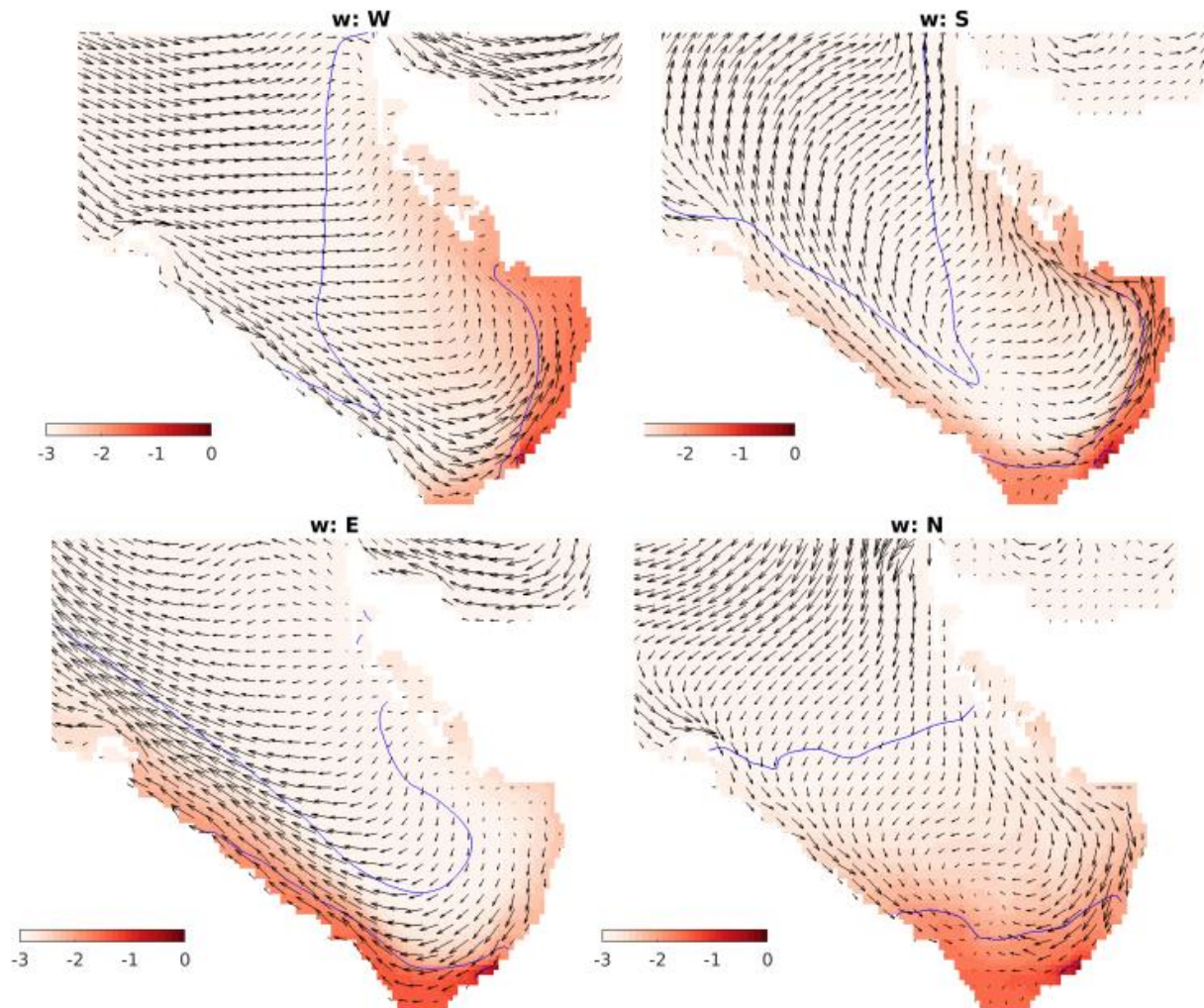


Joonis 4.6 Rannajoone sihiliste hoovuse- ja tuule kiiruse komponentide sõltuvus.



Joonis 4.7 Tuule suunajaotused üle 5 m/s tuule kiiruste jaoks Pakri lahes uuringu perioodil.

Erinevate tuulte löikes kandub Kopli lahes sademete heitvesi pikki kaldaid kas päri või- vastupäeva (joonis 4.7). Lääne tuulte korral esineb Kakumäe poolsaare ranna alal pinnakihis tugev sissevool, mis kannab Mustojast lähtuva heitvee lahe ida kallastpidi loode suunas. Lõuna tuulte korral toimub lahest välja vool nii lääne kui ida kaldal ja reostuse levik sõltub oluliselt allika asukohast. Rocca al Mare ranna alalt jookseb piir, kus reostus kantakse kas Stroomi rannasuunas või piki Kakumäe poolsaart lahest välja. Ida tuulte korral kandub heitvesi lääne suunaliste hoovuste mõjul Kakumäe ranna alale, kus see pikki kallast välja voolab. Põhja tuulte korral on hoovused konvergentssed ja suhteliselt aeglased. Reostus koguneb lahe lõuna ossa ning hajumine mööda kaldaid on väiksem.



Joonis 4.7 Keskmine hoovuste ja püsiva markeraine ühik-kontsentratsiooni logaritmiline jaotus erinevatest ilmakaartest puhuvate tuulte korral (tuule suund päises). Sinised kontuurid märgivad ühte suurusjärku.

5 Sademevee merelasu modelleerimine

Selleks, et hinnata rajatavate merelasude erinevate alternatiivide mõju Kopli lahe veekvaliteedile, seati mudel üles erinevateks simulatsioonideks, kus muutusid merelasu koordinaadid. Joonisel 2.1 on toodud merelasude asukohad erinevate alternatiivide (alt 1-4) korral.

Erinevad alternatiivide kirjeldused ja merelasu asukohtade koordinaadid (XY vastab L-EST97 ja BL WGS84 koordinaat süsteemile) on järgmised:

alternatiiv 0 - Referents mudel simulatsioon, kus on arvestatud ainult Mustjõe sissevooluga.

alternatiiv 1 - lisanduvalt valgalalt kogutud sademevesi juhitakse Kopli lahte vastavalt eelplaneeringus välja pakutud asukohale (Lisa 1) ~~Mustjõe suudmeni ja sealt koos Mustjõe sademeveega merre;~~

XY: 6588747.31, 538437.33

BL: 59.43482, 24.677318

alternatiiv 2 - lisanduvalt valgalalt kogutud sademevesi juhitakse torustikuga Stroomi rannast eemale Rocca al Mare suunas ja siis merre;

XY: 6588226.19, 537103.94

BL: 59.430262, 24.653734

alternatiiv 3 - sademevee merre juhtimiseks rajatakse pumbajaam ja merelask (merepõhja paigutatav toru) pikkusega ca 500 m, et vältida Stroomi supelranna veekvaliteedi halvendamist;

XY: 6589165.38, 537873.73

BL: 59.438624, 24.667461

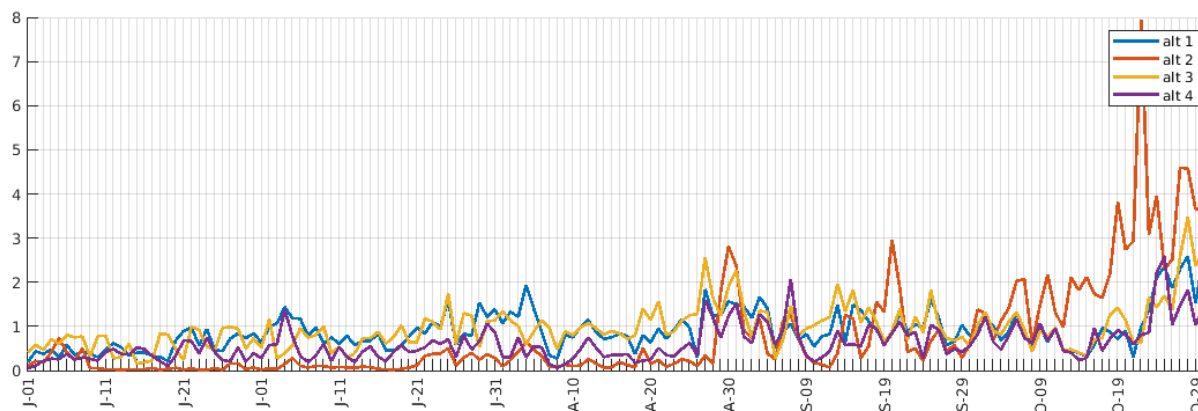
alternatiiv 4 - sademevee merre juhtimiseks rajatakse pumbajaam ja süvalasu abil juhitakse sademevesi Kopli lahe sügavamasse ossa ca 20 m isobaadi lähiste. ~~lahest täielikult välja.~~

XY: 6590467.81, 535660.56

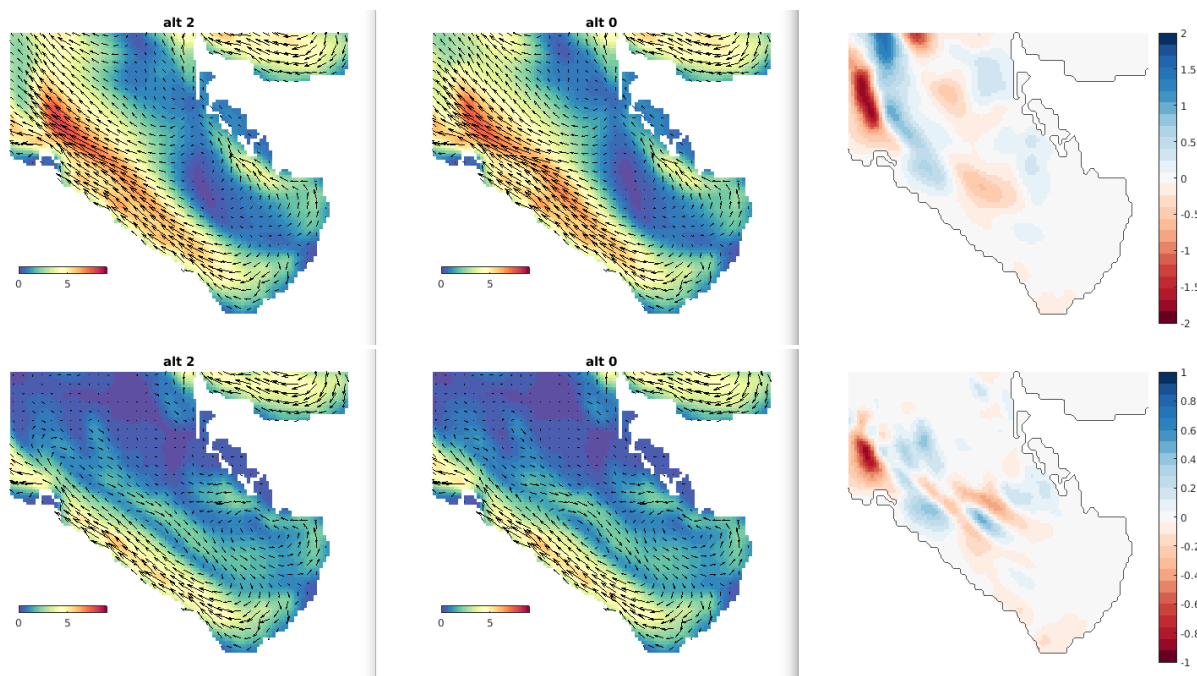
BL: 59.450506, 24.628675

5.1 Sademevee merelasu mõju hoovustele lahes

Mere vee laskude mõju lahe hoovustele terviklikult kasvab ajas, kuna mida aeg edasi seda rohkem muudab erinevate tihedus omadustega heitvesi lahe üldist tihedusjaotust (Joonis 5.1). Heitvee otsene ja lokaalne mõju ei ole suur, kuid ajas akumulatsioon heitvesi Kopli lahes põhjustab pikemas ajamastaabis tiheduse erinevusi (muutused soolsuse ja temperatuuri jaotustes), mis avaldab mõju hoovuste ruumilisele jaotusele (Joonis 5.2). Lisaks tihedusele mõjutab täiendav vooluhulk lahe lokaalset veetaset. Sellised hälbepidajad võivad muuta aktiivse sheissingu perioodil sheissi laine liikumist, mis omakorda toob kaasa muutusi hoovustes. Üldjuhul erinevused hoovuste suundades heitvee lasust kaugemates piirkondades on väikesed. Hoovuste üldist struktuuri ja tugevust heitvee lasud ei mõjuta. Lokaalsed hoovuse kiiruse muutused jäävad <200 m piiridesse ja päeva keskmisi hoovuse kiiruseid mõjutab see ligikaudu 1 cm/s ulatuses.



Joonis 5.1 Pinnakihi hoovuste ruutkeskmine erinevus (cm/s) võrreldes olukorraga, kus heitvett lahte ei lasta.

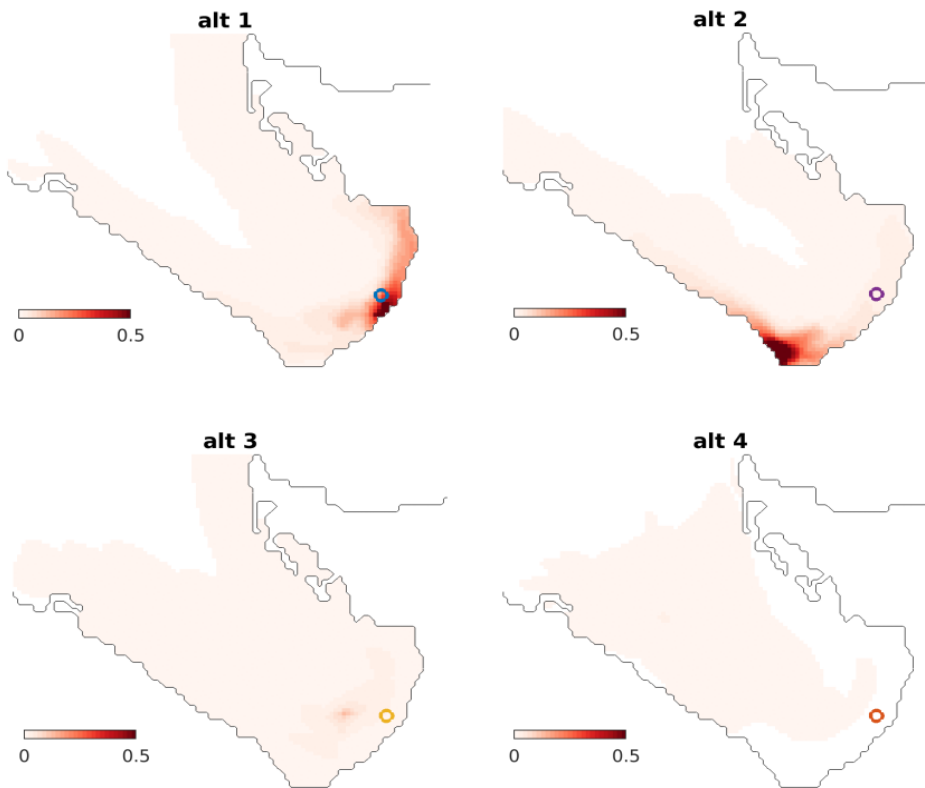


Joonis 5.2 Päevakeskmised hoovuste jaotused 2. alternatiivi (vasakul) ja 0. alternatiivi (keskel) jaoks 31. oktoobril. Paremalt on kahe alternatiivi erinevus (2-0). Ühik cm/s.

5.2 Sademevee merelasu mõju toitainete sisaldusele rannalähedases vees

Erinevate alternatiivide ruumilisi jaotusi on uuritud eesmärgiga analüüsida, kuidas erinevad stsenaariumid mõjutavad erinevaid Kopli lahe piirkondi. Reostuse ruumilise jaotuse uurimisel on näidatud markerainet, mis on pärit üksnes alternatiiviga planeeritavast mere lasust, mistõttu näitavad jaotused olemasolevale lisanduvat kontsentratsiooni suurenemist.

Üle kogu perioodi ajas maksimaalsete kontsentratsioonide jaotused näitavad, et esimese ja teise alternatiivi kohal tekivad suublate ümbrusesse tugeva kontsentratsiooniga alad, kuna reostus ei saa vertikaalselt hajuda ning ka reostuse hajumine lahe avaossa on nõrk. Oluliselt paremini levib reostus piki rannikut, mis võib soodsatel juhtudel jõuda Stroomi randa isegi teise alternatiivi korral (Joonis 5.6). Kõige efektiivsem reostuse hajutamise viis on alternatiiv 4, kus reostuse mõju on peaaegu olematu. Alternatiiv 3 puhul on maksimaalsed kontsentratsioonid Stroomi ranna piirkonnas keskmiselt väiksemad kui esimese kahe alternatiivi korral.



Joonis 5.4 Maksimum väärtuste jaotused erinevate alternatiivide jaoks.

Joonisel 5.5 on toodud keskmised ühik-kontsentratsioonide jaotused vastavalt erinevate tuulesuundade korral, mille puhul ületas tuule kiirus 5 m/s. Kõiki keskmise reostuse jaotusi (Joonis 5.5 ülemine rida) iseloomustab reostuse eksponentsiaalne vähenemine kaugenedes reostusallikast. Esimese alternatiivi korral esineb tugev reostus peamiselt merelasu ümbruses, ja selle mõju on selgelt näha, kuidas reostus levib piki Stroomi ranna ranniku ala põhja suunas. Teise alternatiivi puhul on reostus hajunud halvemini ning piirkond kus kontsentratsioon on vähenenud poole võrra katab suuremat piirkonda Rocca al Mare ranna alas. Heitvee levik jaotub suhteliselt võrdselt mõlemale poole. 3. ja 4. alternatiivi korral on merelasu asukohad kaldast eemale ning suunatud sügavaimasse kihti, seetõttu on pinnakihti jõudev reostus nende korral oluliselt väiksem. Alternatiivi 4 puhul, kus merelasu on viidud Kopli lahe avaossa, jääb Stroomi ranna veekvaliteet otseselt merelasu poolt mõjutamata, küll aga võib 3. alternatiivi puhul esineda lokaalne reostus, mis soodsate tingimustega võib kanduda ka Stroomi randa.

Erinevate alternatiivide korral on tehtud järgmised tähelepanekud.

1. alternatiivse merelasu korral on

- keskmine merelasust tingitud reostus levinud suhteliselt võrdselt mõlemale poole piki lahe kallast.
- põhjatuulte korral on kontsentratsioonid suurimad väljalaskekoha vahetus läheduses, lõuna- ja edelakaares.
- idatuulte korral valgub suurem osa reostusest mööda kallast lõunasse ja läände
- lõunatuulte korral kontsentreerub reostus valdavalt kaldapiirkonda väljalaskekohast põhja suunas.

- läänetuulte korral on reostuse kontsentratsioonid sarnased lõunatuultega, kuid ruumiline ulatus veidi väiksem.

Alternatiiv 2. merrelasu korral on

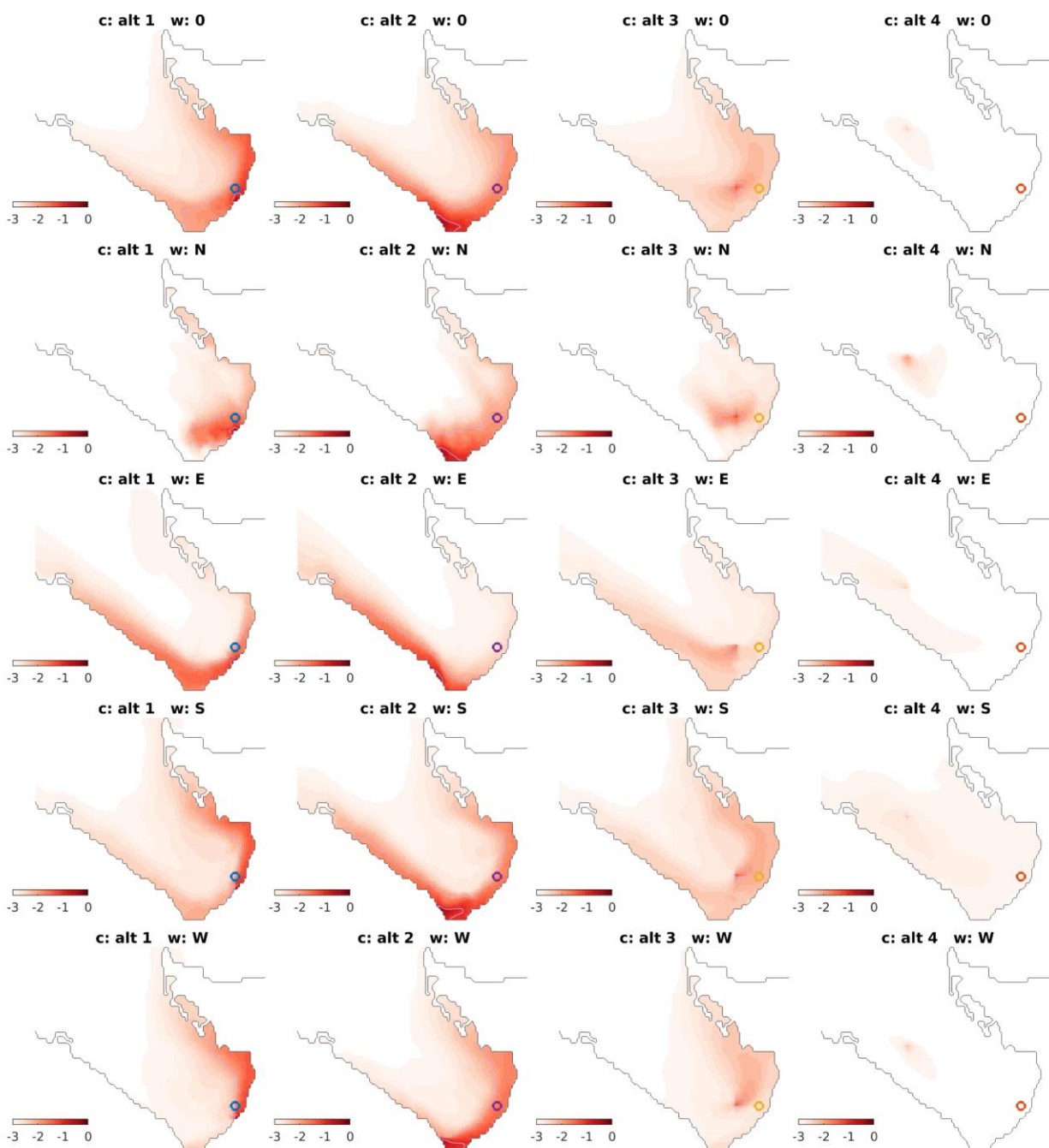
- keskmine merelasust tingitud reostuse levik on jaotunud suhteliselt võrdselt kahele poole piki kallast, kuid võrreldes 1. alternatiiviga on kontsentratsioonid lõunapoolses kaldapiirkonnas suuremad, põhja pool veidi väiksemad.
- põhjatuulte korral kontsentreerub reostus lahe lõunasoppi.
- idatuulte korral liigub reostus väljalaskekohast läände ning suurimad väärtused jäävad lahe edela/läänekalda äärde.
- lõunatuulte korral jaotuvad kõrgemad kontsentratsioonid suhteliselt võrdselt kaldaäärsetele aladele üle terve lahe.
- läänetuulte korral lükatakse reostus lahe ida/kagu kaldaäärsesse piirkonda.

3. alternatiivi merrelasu korral on reostuse kontsentratsioonid märgatavalt madalamad võrreldes kahe esimese alternatiiviga.

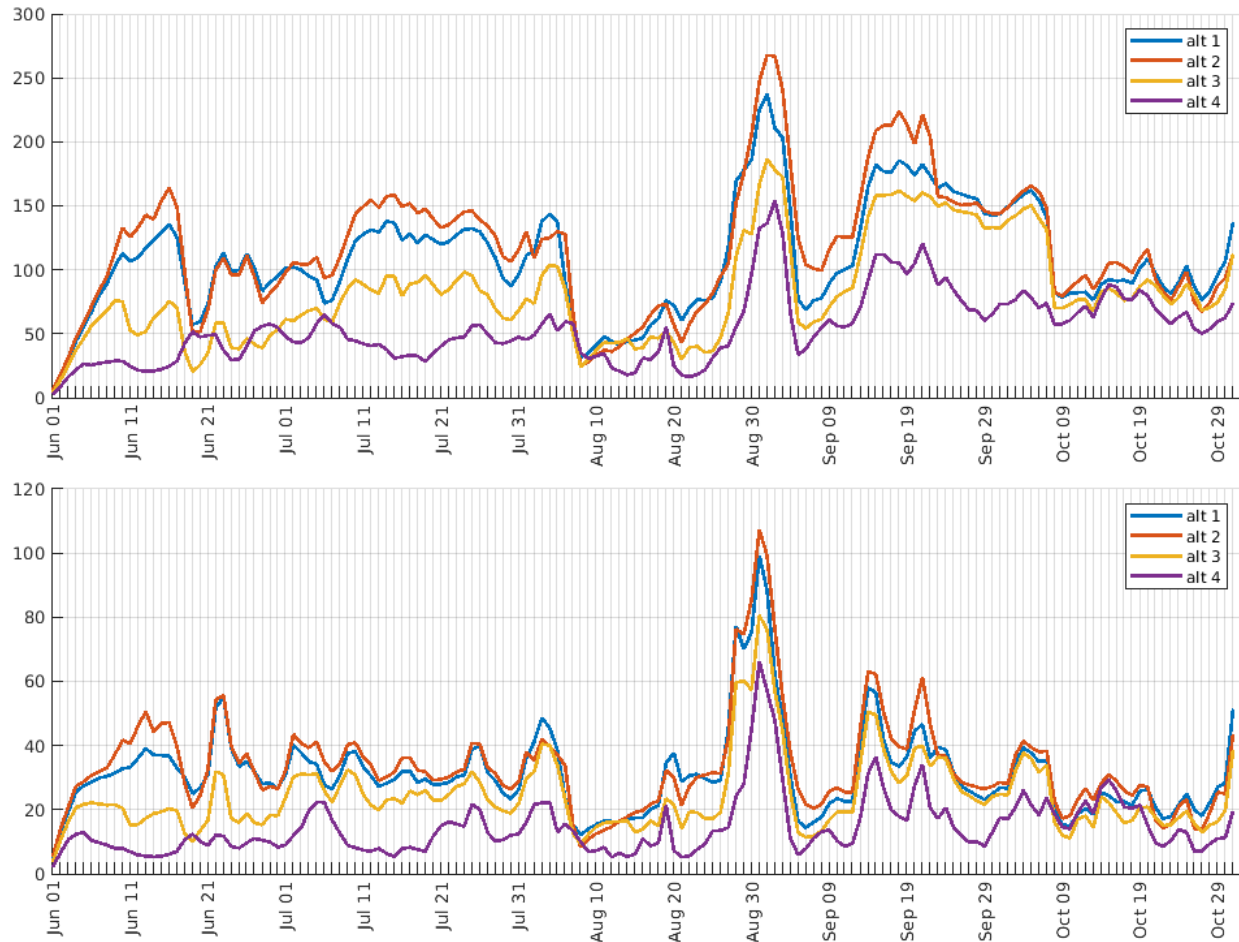
- keskmine merelasust tingitud reostuse levik kontsentreerub väga lokaalselt vahetult väljalaskekohas ning on suhteliselt võrdselt ja madala kontsentratsioonina jaotunud üle terve lahe.
- põhjatuulte korral jääb väike kõrgema kontsentratsiooniga ala väljalaskekoha ümber suhteliselt lokaalseks.
- idatuulte korral koondub reostus madalas kontsentratsioonis piki edela/läänekallast.
- lõunatuulte korral jaotub reostus lahes suhteliselt võrdselt, kuigi kaldapiirkondade kontsentratsioonid on veidi kõrgemad.
- läänetuulte korral liigub reostus põhja suunas ja jääb kaldalähedasse piirkonda, olles üsna lokaalse levikuga.

4. alternatiivi merrelasu korral on reostus hajunud kõige paremini, ning kontsentratsioonid pinnakihi üle kahe suurusjärgu väiksemad kui heitvees:

- keskmine levik väga lokaalne ning jääb merrelaskekoha lähedusse;
- põhjatuulte korral on reostuse levik samuti lokaalne ja jääb väljalaskepiirkonda kandudes sellest veidi kagusse ja itta;
- idatuulte korral kandub reostus lahe läänekaldale;
- lõuna tuulte korral on reostuse levik antud alternatiivi juures suurim, ulatudes ühtlaselt ning väikeses kontsentratsioonis üle terve lahe;
- lääne tuulte korral jääb reostus väljalaskekoha ümber piiratuks, lokaalseks.



Joonis 5.5 Keskmised logaritmilised ühik-kontsentratsioonide jaotused erinevate alternatiivide jaoks (c:), mis on keskmistatud üle erinevate tuule suundade (w:). Esimeses reas on keskmine jaotus üle kogu perioodi 1.6 -31.10.

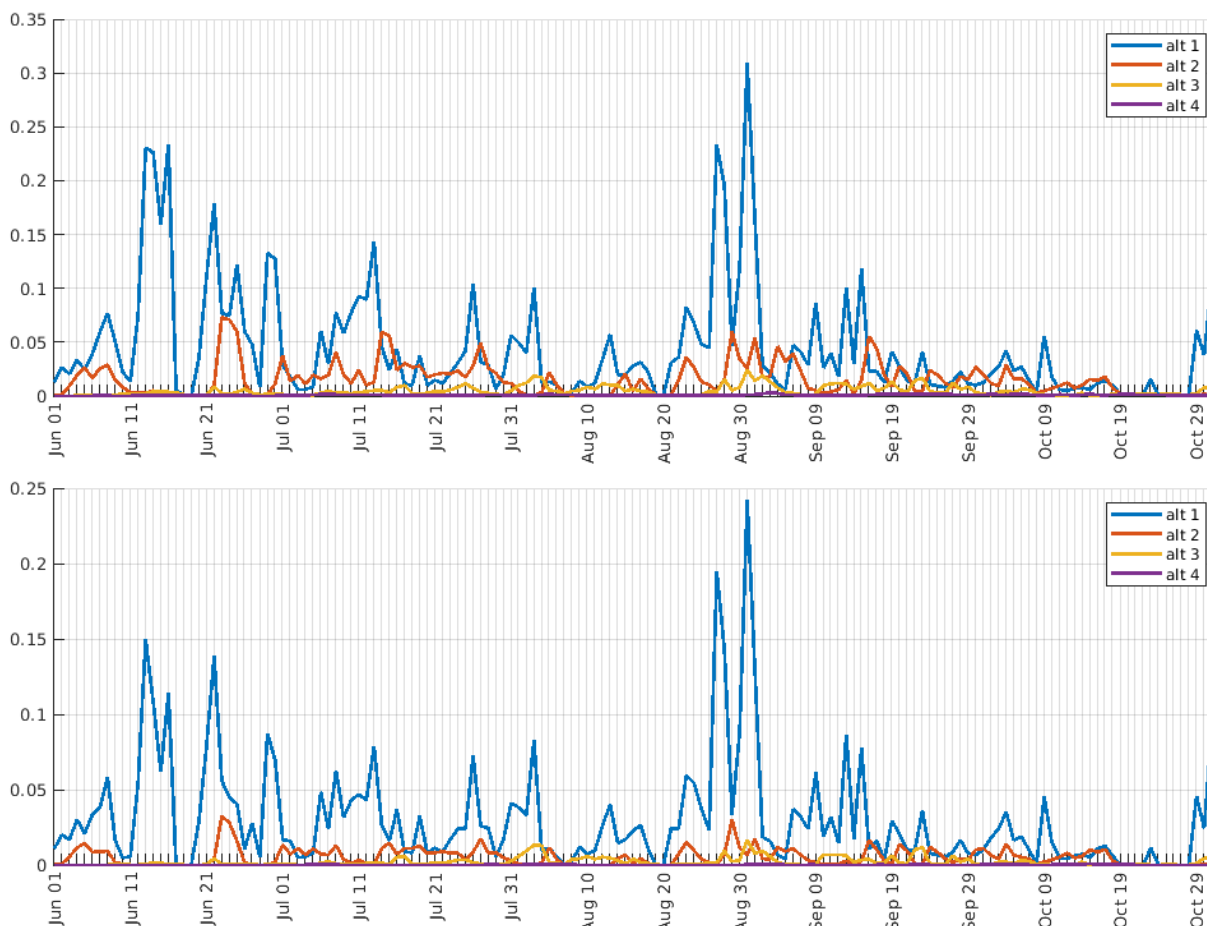


Joonis 5.6 Markeraine integraalsed aegread Kopli lahes.

Integraalne markeraine sisaldus Kopli lahe akvatooriumis (Joonis 5.6) annab meile teavet selle kohta, kui suur on markeraine kogus üldiselt Kopli lahes ning kui kiiresti reostus hajub Kopli lahest terviklikult. Mõlemat tüüpi markerainete, nii lagunevate kui ka püsivate, puhul on selge, et alternatiiv 2 on peamise reostuse allikas, mis püsib pikaajaliselt lahes. Alternatiivi 4 korral hajub sademete heitvesi lahest kõige kiiremini.

Augusti lõpus esines periood, kus markeraine kogus lahes kasvas kiiresti, peamiselt tingituna tugevatest hoovihmade sadudest, mis ägenesid sel ajal.

5.3 Sademevee merelasu mõju Stroomi supluskohta vee kvaliteedile



Joonis 5.7 Passiivse (ülal) ja laguneva (all) markeraine ühik- kontsentratsiooni aegrida Stroomi ranna piirkonnas (Bst asukoht joonisel 2.1)

Stroomi ranna vee kvaliteedile avaldab olulist mõju ainult esimene alternatiiv, eriti suuremate sadude korral, mil reostuse kontsentratsioon võib ulatuda veerandini koormuse kontsentratsioonist (Joonis 5.7). Teiste alternatiivsete asukohtade mõju on suurusjärgu väiksem.

Stroomi ranna lähedal (asukoht Bst) on reostuse kontsentratsiooni ja tuule vahel nõrk seos ($r^2 = 0.05$). Tuule tugevnedes hajub reostus kiiremini, mis tähendab, et tugevamate tuulte korral on reostust vähem. Nõrkade tuulte korral on veetasemed reeglina madalamad, mistõttu esineb negatiivne korrelatsioon veetaseme ja reostuse kontsentratsiooni vahel. Statistiliselt olulisi seoseid ei ole tuule ega veetaseme ning summaarse reostuse vahel ($r^2 < 0.1$). Sademete hulga ja reostuse vahel on mõõdukas seos ($r^2 = 0.46$). Sademete muutlikusest selgitab 50% kogu reostuse muutlikkusest.

5.4 Sademevee merelasu mõju setete liikumisele lahes

Heitvee lasud võivad sette resuspensiooni tekitada suurte vihmasadude korral. Mudelisse süstitud vooluhulgad olulisi hoovuse kiiruse suurenemisi ja sestap ka resuspensiooni suurenemist endaga kaasa ei toonud. Sette ja akumulatsiooni alad on laias laastus samad, mis ilma merelasuta tingimustes.

Kui heitvee lasuga kaasneb settiva heljumi koormus, siis on mõju lokaalne (umbes 400-600 m). Süvakihis võib heljum suurema tõenäosusega kuhjuda kui kaldaäärse merelasu korral. Kalda äärsed merelasud on aktiivses resuspensiooni piirkonnas, sestap kandub heljum vastavalt markeraine leviku mustritele ning paikneb ühtlaselt mööda rannajoont ümber.

Kui heitvee lasu ümber (<50 m) toimub resuspensiooni, siis liiguvad setted hoovuste suunas. Joonisel 4.1 on toodud keskmised hoovuse kiirused põhjakihis, mis kirjeldab kuhu suunas liiguvad alternatiivide 3 ja 4 korral põhjast üles paisatud setted. Joonisel 4.7 on toodud pinnakihi hoovused erinevate tuule suundade korral, kus tuule kiirus >5 m/s. Nende järgi saab hinnata kuhu suunas veesambasse paisatud setted liiguvad ka tugevamate tormide korral.

Viited

Andrejev, O., Myrberg, K., Alenius, P. and Lundberg, P.A., 2004. Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland—a study based on three-dimensional modelling. *Boreal Environment Research*, 9(1), p.1.

Large, W. G., & Yeager, S. (2004). Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: The data sets and flux climatologies (No. NCAR/TN-460+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D6KK98Q6

Aksenov, Y., Blockley, E., Chevallier, M., Feltham, D., Fichefet, T., Garric, G., Holland, P., Iovino, D., Madec, G., Massonnet, F., Ridley, J., Rousset, C., Salas, D., Schroeder, D., Tietsche, S., Vancoppenolle, M., 2019, “Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI3) – The NEMO sea ice engine”, Scientific Notes of Climate Modelling Center, 31 — ISSN 1288-1619, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), doi:10.5281/zenodo.1471689

KAUR web, 2023, Eesti suvi oli tänavu normist soojem ja sademeid oli pisut vähe, <https://www.ilmateenistus.ee/2023/09/eesti-suvi-oli-tanavu-normist-soojem-ja-sademeid-oli-pisut-vahem/> (link aktiivne: 2023.12.19)

Kärnä, T., Ljungemyr, P., Falahat, S., Ringgaard, I., Axell, L., Korabel, V., Murawski, J., Maljutenko, I., Lindenthal, A., Jandt-Scheelke, S., Verjovkina, S., Lorkowski, I., Lagemaa, P., She, J., Tuomi, L., Nord, A. and Huess, V., 2021. Nemo-Nordic 2.0: operational marine forecast model for the Baltic Sea. *Geoscientific Model Development*, 14(9), pp.5731-5749.

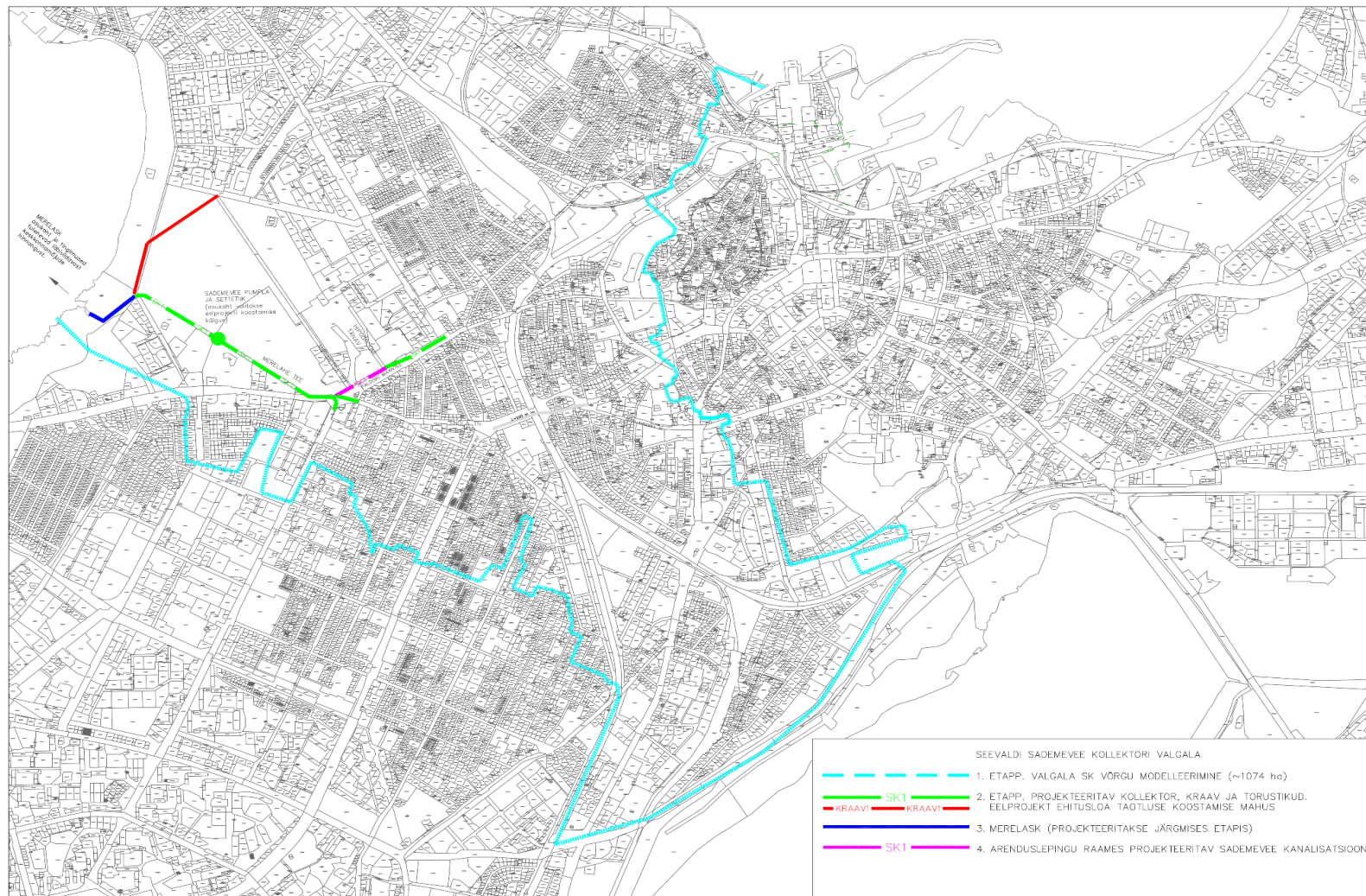
Madec, G., Delecluse, P., Imbard, M. and Levy, C., 1998. OPA 8.1. Ocean general circulation model reference manual. Note du Pôle de modélisation, Laboratoire d'Océanographie DYnamique et de Climatologie, 91 pp.

Umlauf, L., Burchard, H., 2005. Second-order turbulence closure models for geophysical boundary layers. A review of recent work. *Continental Shelf Research*, 25(7-8), pp.795-827. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.08.004>

Haiden, T., Janousek, M., Vitart, F., Bouallègue, Z.B., Ferranti, L., Prates, F. and Richardson, D., 2018. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2018 upgrade. Reading, UK: European Centre for Medium Range Weather Forecasts.

Buizza, R., Balmaseda, M.A., Brown, A., English, S., Forbes, R., Geer, A., Haiden, T., Leutbecher, M., Magnusson, L., Rodwell, M. and Sleigh, M., 2018. The development and evaluation process followed at ECMWF to upgrade the Integrated Forecasting System (IFS). European Centre for Medium Range Weather Forecasts.

Lisa 1



Joonis L1. Kavandatava kollektori valgala ja merelask.