Taltech MERESÜSTEEMIDE INSTITUUT

Akadeemia tee 15a, Tallinn 12 618 tel. 6 204 300 e-mail: msi@msi.ttu.ee

Paldiski Lõunasadama süvendustööde aegse heljumi seire aruanne

Koostajad: Liis Sipelgas ja Laura Siitam

Tallinn 2020

Sisukord

Lühikokkuvõte 3
1. Metoodika 4
1.1 Kontaktmõõtmised 4
1.1.1 Heljumi kontsentratsioon veeproovidest 4
1.1.2 Vee läbipaistvus Secchi ketta järgi 4
1.1.3 Poijaam 4
1.2 Satelliitandmed 5
2. Süvendustööde tehnoloogia ja süvendusmahud 6
3. Süvendusperioodil valitsenud ilmaolud 8
3.1 Õhutemperatuur 8
3.2 Meretase 8
3.3 Tuuleolud 9
4. Heljumi seire 11
4.1 Poijaama andmed 11
4.2 Satelliitandmed 14
4.3 Paikmõõtmised 17
Vahearuanded 23
Kasutatud kirjandus 24

Lühikokkuvõte

Perioodil 19.12.2019 - 12.03.2020 teostati Paldiski Lõunasadamas süvendustöid kogumahuga 685 000 m^3. Ööpäeva keskmised süvendusmahud ajavahemikul 19.12.2019 - 25.02.2020 olid 9800 m^3. Perioodil 25.02.2020 kuni 09.03.2020 süvendustöid ei toimunud. Alates 9. märtsist kuni 12. märtsini oli süvendusmaht keskmiselt 2000 m^3 ööpäevas.

Süvendusaegse heljumi seire raames koguti Pakri lahest veeproove ning töödeldi satelliitpilte, saamaks informatsiooni heljumi kontsentratsioonide ruumilisest jaotusest. Lisaks teostati heljumi kontsentratsioonide reaalajaseiret poijaamas.

2019/2020 aasta talv oli erakordne ja kogu süvendusperioodi iseloomustas keskmisest tugevam tuul ning kõrgem õhutemperatuur. Tugevast tuulest ja jääkatte puudumisest põhjustatud resuspensioon merepõhjast oli kogu süvendusperioodil väga intensiivne, põhjustades looduslikku heljumi kontsentratsiooni tõusu, mis ületas ka eelseire analüüsis määratud loodusliku fooni (10 mg/L). Tugevast resuspensioonist tingitud loosusliku heljumi kontsentratsiooni tõusu nii Pakri lahes kui ka terves Lääne- ning Loode-Eesti rannikumeres kinnitasid ka seireperioodil analüüsitud satelliitpildid.

Süvendusaegse perioodi ööpäeva keskmised heljumi kontsentratsioonid olid vahemikus 6-38,5 mg/L. Kõrgemad kontsentratsioonid esinesid valdavalt suuremate tuulesündmuste korral, kuid esines ka perioode (nt. 22.01- 26.01.20), mil tuuleolud olid rahulikumad, kuid heljumi kontsentratsioonid püsivalt kõrged (ööpäeva keskmine >25 mg/L). Poijaam mõõdistas suurimaid heljumi kontsentratsioonide tõuse edela- ning lõunakaare tuulte korral. Süvenduspiirkond paiknes poijaamast kirdes, sellest tulenevalt ei saanud heljumi kontsentratsioonide tõus olla otseselt süvendustöödest tingitud ning oli vähemalt osaliselt põhjustatud madalas rannikumeres resuspenseeritud setetest, mis liikusid lõuna- ja edelatuultega poijaama piirkonda. Samuti võis poijaama andmeid ning tuule kiiruseid võrreldes täheldada, et heljumi kontsentratsioonid tõusid märgatavalt, kui tuule kiirus oli 10 m/s või rohkem. Kokkuvõtvalt võib öelda, et kõrgemad kontsentratsioonid seireperioodil olid tingitud nii tavapärasest kõrgemast looduslikust heljumist, mida tekitasid tugevad tuulesündmused kui ka süvendusest põhjustatud heljumipilve levimisest poijaamani. Kogu seireperioodi keskmiseks heljumi kontsentratsiooniks poijaamas kujunes 14,6 mg/L.

Lisaks poijaama reaalaja mõõdistustele viidi Pakri lahel läbi ka kontaktmõõtmisi kuupäevadel 16.01.2020, 23.01.2020, 19.02.2020 ja 27.03.2020, mille käigus koguti seirejaamadest veeproove ja mõõdeti vee läbipaistvust. Süvendusperioodil kogutud veeproovidest määratud heljumi kontsentratsioonid jäid vahemikku 4,9-19,8 mg/L ning vee läbipaistvus oli vahemikus 0,5-1,5 m.

Kaks nädalat peale süvendustööde lõppu (27.03.2020) viidi läbi viimane veeproovide kogumine seirejaamades. Veeproovidest määratud heljumi kontsentratsioonid jäid vahemikku 3,2-5 mg/L ja vee läbipaistvus oli 1,9-2,8 m. Tulemuste põhjal võib järeldada, et 2020 a. märtsi lõpuks oli Pakri lahes taastunud heljumi normaalne looduslik foon.

1. Metoodika

1.1 Kontaktmõõtmised

1.1.1 Heljumi kontsentratsioon veeproovidest

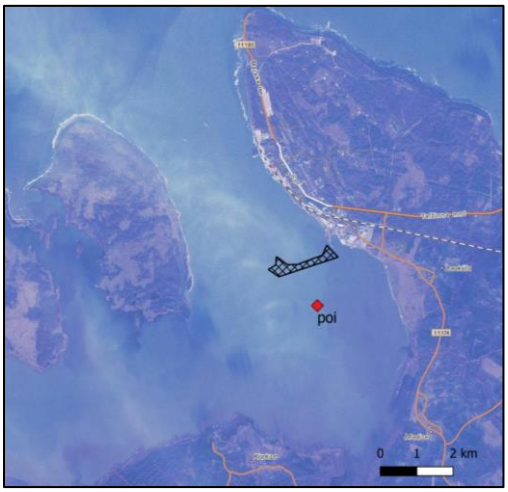
Heljumi kontsentratsioon (mg/L) määramiseks filtreeritakse veeproov läbi eelnevalt kaalutud Millipore'i filtri (poori suurus 0.45 µm). Peale filtreerimist kuivatatakse filter fikseeritud temperatuuril (103 – 105ºC) konstantse kaaluni. Filtri alg- ja lõppkaalu erinevus näitab heljumi kontsentratsiooni veeproovis (Lindell *et al.* 1999). Veeproove koguti paadi või drooniga.

1.1.2 Vee läbipaistvus Secchi ketta järgi

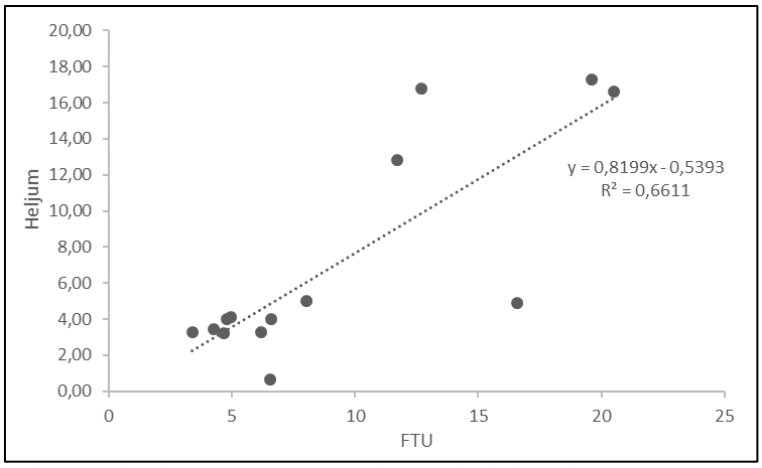
Vee läbipaistvus (m) sõltub veesambas hõljuvate ja vees lahustunud osakeste hulgast. Läbipaistvuse hindamiseks mõõdetakse veesamba kõrgus, mille korral on nähtav Secchi ketas (meetrites).

1.1.3 Poijaam

Rannikust 2 km kaugusele, süvenduspiirkonnast lõunasse (Joonis 1), paigaldati poijaam, mis kogus jooksvalt informatsiooni heljumi kontsentratsiooni kohta. Seirepoi anduriks oli Seapoint Turbidity Meter, mis mõõdistab kiirguse hajumist spektri infrapunases piirkonnas (lainepikkus 880nm). Nimetatud spektripiirkonnas vees olevad osakesed kiirgust ei neela ja seetõttu iseloomustab hajumine täpselt osakeste kontsentratsiooni vees. Seapoint Turbidity Meter on väikeste mõõtmetega, madala energiatarbega ja kõrge tundlikkusega andur, mis on kasutatav ka madalatel temperatuuridel (*Seapoint Turbidity Meter User Manual*). Heljumi seirepoi oli varustatud GSM/GPRS protokollil põhineval kahepoolse sidega, andmeedastuse perioodiks oli 5 minutit. Andmeside toimus reaalajas läbi GSM võrgu, kasutades GPRS protokolli, kui võrk oli olemas. Levi puudumisel, salvestatakse andmed mälukaardile ning edastatakse, kui poi on saanud uuesti ühenduse võrguga. Seirepoi andmed koguti TalTech Meresüsteemide Instituudi (MSI) FTP serverisse ASCII formaadis, kus mõõteandmeid jälgiti MSI spetsialisti poolt. Seapoint Turbidity Meter mõõdab vee hägusust FTU (*Formazine Turbidity Unit*) ühikutes ning veekvaliteedi hindamiseks süvenduspiirkonnas arvutati see ümber heljumi kontsentratsiooniks. Antud töös on hägususe kalibreerimiseks kasutatud regressioonseost, mis on leitud samaaegselt kogutud veeproovidest hinnatud heljumi kontsentratsiooni ja sondiga mõõdetud hägususe vahel (Joonis 2).
Poijaama poolt mõõdetud heljumi kontsentratsioonid visualiseeriti spetsiaalse veebirakenduse vahendusel (https://qgiscloud.com/msi/Pakri_Cloud_seire/).



Joonis 1. Poijaama asukoht, Sentinel 2 satelliitpildil 05.01.20. (viirutatud ala märgistab süvenduspiirkonda)



Joonis 2. CTD sondiga mõõdetud FTU ning veeproovidest saadud heljumi kontsentratsioonide regressioonseos.

1.2 Satelliitandmed

Satelliitkaugseire andmetest kasutati enim Ameerika kosmoseagentuurile (NASA[1]) kuuluv kolmanda generatsiooni sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) andmeid. MODIS andmeid on süvendustöödest põhjustatud heljumi kontsentratsiooni muutuste seireks kasutanud varasemalt Sipelgas jt 2006, Kutser jt 2007, Islam jt 2007. Käesolevas seires kasutati 250m ruumilise lahutusega produkte lainepikkuse vahemikus 620-670 nm. Andmete konverteerimiseks heljumi kontsentratsioonideks on kasutatud empiirilist algoritmi, mis on loodud spetsiaalselt Pakri lahe piirkonna jaoks (Raag et al 2013).
Lisaks on kasutatud multispektraalse satelliitsensori Sentinel-2/MSI andmeid, mille ruumiline lahutus olenevalt spektraalkanalist on 10, 20 ja 60 meetrit ning ajaline lahutus 2-5 päeva. Antud satelliitsensori ruumiline ning spektraalne lahutus võimaldab detailsest analüüsida ka heljumi jaotust väiksemates piirkondades. Heljumi kontsentratsiooni hindamiseks töödeldi satelliitpilte mitmekomponendiliste teist tüüpi vete (*Case-2 waters)* jaoks välja töötatud protsessoritega C2RCC – *Case-2-Regional CoastColour (*Doerffer ja Schiller 2007*)*. Antud protsessori usaldusväärsust Eesti rannikumeres on hinnatud töödes Raag *et al* 2014; Sipelgas *et al* 2018.

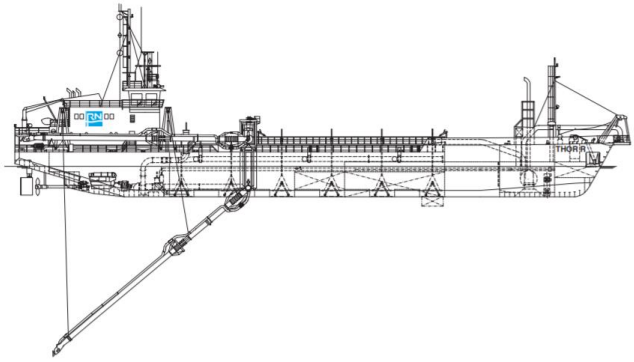
[1] NASA- *National Aeronautics and Space Administration*

2. Süvendustööde tehnoloogia ja süvendusmahud

Perioodil 19.12.2019 - 12.03.2020 teostati Paldiski Lõunasadamas sissesõidukanali ja pöörderingi süvendustöid kogumahuga 685 000 m^3. Ajavahemikul 19.12.2019 - 31.01.2020 teostas töid süvendaja Thor R (Foto 1, Joonis 3), mille keskmine süvendusvõimsus on 9800 m^3 ööpäevas. Thor R on iselossiv pinnasepumpsüvendaja (*hopper dredger*), mis süvendab sügavustel kuni 28,6 meetrit. 28.01.2020 saabus Paldiski Lõunasadamasse puksiir Rimfakse R (Foto 2, Joonis 4) ning alustas traalimistöid 29.01.2020. Esimesel veebruaril saabus sadamasse mehaaniline süvendaja Heimdal R. Mehaaniline Süvenduslaev Heimdal R (Foto 3, Joonis 5) on haardkopaga avameresüvendaja (*grab dredger and stone placing vessel).* Mis on võimeline süvendama kuni 60 m sügavusel. Antud süvendustööde raames tegeles Heimdal R nõlvakindlustustööde ning kivide ja rahnude teisaldamisega. Käideldes kokku ca 15000 m^3 materjale. Orienteeruvad süvenduskogused kuni kuupäevani 25.02.2020 olid ööpäeva lõikes 9800 m^3. Perioodil 25.02.2020 kuni 09.03.2020 süvendustöid ei toimunud. Alates 9. märtsist kuni 12. märtsini oli süvendusmaht keskmiselt 2000 m^3 ööpäevas (kokku ca 8 000 m^3). Kokkuvõtvalt on orienteeruvad ööpäevased süvendusmahud näidatud Joonisel 6.

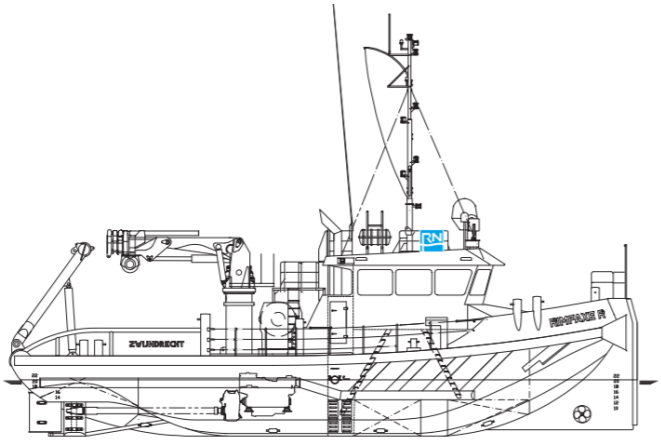
Alates 12.03.2020 viidi objektil läbi traalimine ja mõõdistamine ning süvendustöid ei teostatud. 17.03.2020 lõppesid lepingulised süvendustööd ning komisjon võttis vastu Paldiski Lõunasadama sissesõidukanali ja pöörderingi süvendustööd koos põhja- ja nõlvakindlustuse rajamisega kai nr 7 ees.

Foto 1. Süvendaja Thor R Pakri lahes (Autor: Kaimo Vahter)



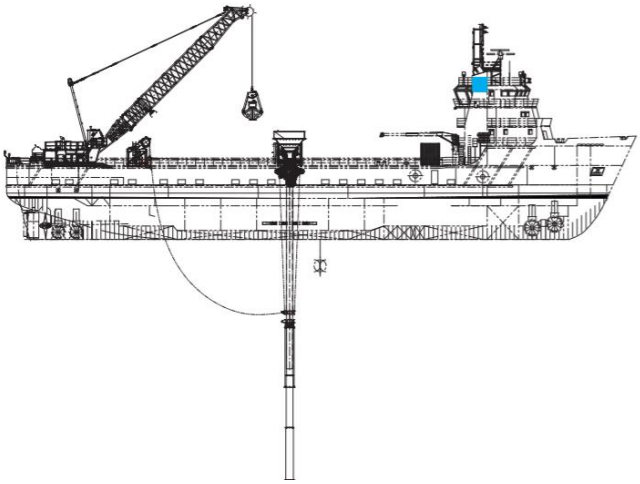
Joonis 3. Süvendaja Thor R (Allikas: rohdenielsen.de/img/973/0/0/Download/thor-r)

Foto 2. Traaler Rimfaxe R Pakri lahes (Autor: Kaimo Vahter)

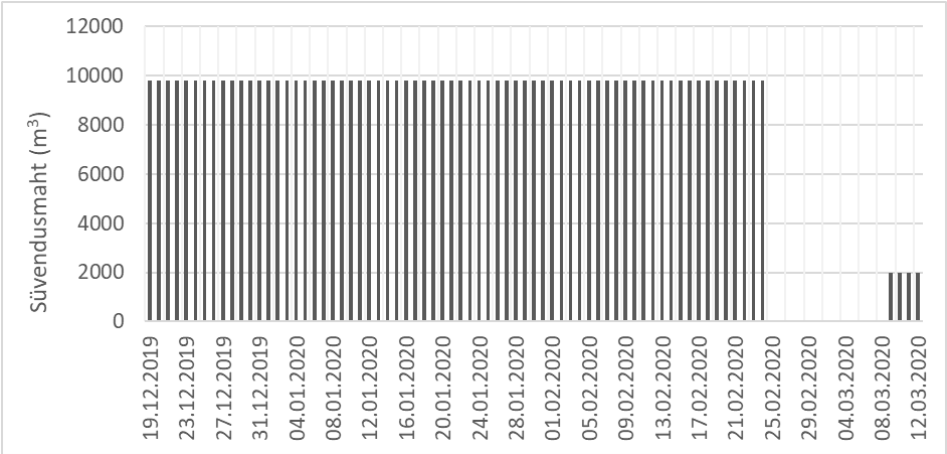


Joonis 4. Traaler Rimfaxe R (Allikas: https://rohde-nielsen.com/img/1026/0/0/Download/rimfaxe-r)

Foto 3. Mehaaniline süvendaja Heimdal R Pakri lahes (Autor Kaimo Vahter)



Joonis 5. Mehaaniline süvendaja Heimdal R (Allikas: https://rohde-nielsen.pt/img/1116/0/0/Download/heimdal-r-web)



Joonis 6. Ööpäeva keskmine süvendusmaht (m3) kogu süvendusperioodi jooksul.

3. Süvendusperioodil valitsenud ilmaolud

3.1 Õhutemperatuur

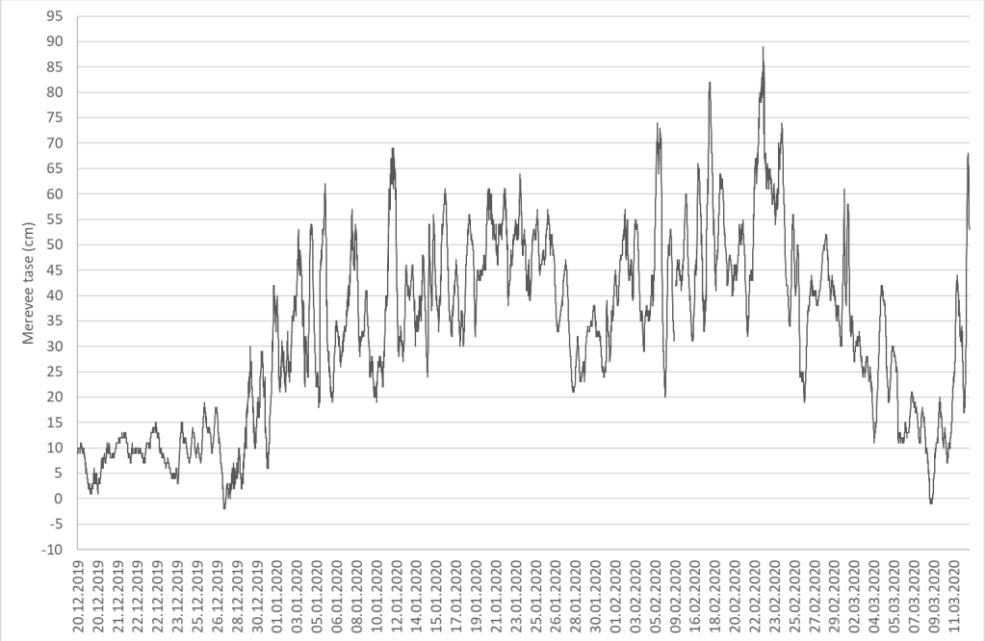
Õhutemperatuur süvendusperioodil oli tavalisest oluliselt kõrgem. Detsembrikuu keskmine õhutemperatuur oli +2,6 °C, mis on 4,6 °C normist kõrgem (Tabel 1). Kliimanormid ehk pikaajalised keskmised arvutatakse konkreetsete vaatlusjaamade teatud pikkusega andmerea põhjal. Eestis on kasutusel periood 1981-2010. Jaanuari kuu keskmine õhutemperatuur oli +3,1 °C, olles 6,6 °C normist kõrgem. Veebruaris oli keskmine õhutemperatuur 1,7 °C, mis on 6,2 °C normist kõrgem ning märtsikuu keskmine õhutemperatuur oli 2,4 °C, mis on 3,5 °C normist kõrgem. Kogu 2019/20 talve keskmine õhutemperatuur oli +2,5 °C (norm -3,3 °C). Alates talvest 1961/62 ei ole varem nii sooja talve esinenud. Võrdluseks 2018/19 aasta talve keskmine õhutemperatuur oli -1,8 °C. Erakordselt soojade õhutemperatuuride tulemusel jäi kogu Eesti rannikumeri praktiliselt jäävabaks (Riigi Ilmateenistus). Jäävaba meri soodustab lainetuse põhjustatud resuspensiooni merepõhjast ning mereveetaseme tõusu rannikupiirkondades.

Tabel 1. Keskmised õhutemperatuurid süvendusperioodil ning paljuaastased keskmsied temperatuurid ehk kliimanorm.

Kuu	*Kuu keskmine temperatuur*	*Paljuaastane keskmine (1981-2010)*
Detsember	+2,6 °C	-2,0 °C
Jaanuar	+3,1 °C	-3,5 °C
Veebruar	+1,7 °C	-4,5 °C
Märts	+2,4 °C	-1,1 °C

3.2 Meretase

Meretase oli süvendusperioodil vahemikus -2 kuni 89 cm. Langedes alla nulli vaid kahel korral (Joonis 7). Kogu süvendusperioodi jooksul tõusis meretase kuuel korral kõrgemale kui 65 cm. Kõikidel juhtudel puhusid lääne- ning lõunakaare tuuled kiirusega üle 14 m/s (Joonis 10).



Joonis 7. Meretaseme ajaline käik süvendusperioodil

3.3 Tuuleolud

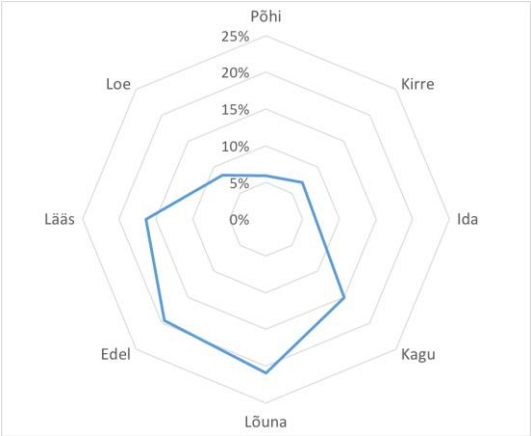
Tuule tugevusel ja suunal on oluline mõju heljumi kontsentratsiooni ruumimisele jaotusele kuna tuul põhjustab madalates rannikumere piirkondades resuspensiooni. Süvendusperioodil 19.12.2019-12.03.2020 esines Pakri lahe piirkonnas enim lõuna-, edela-ning läänekaare tuuli (Joonis. 8). Mõõdukas tuul kiirusega (4-8 m/s) puhus seireperioodi 38. päeval, tuul kiirusega 8-16 m/s puhus 27 päeval ning vaikse tuulega 0-4 m/s perioode esines süvenduse ajal 18 päeval (Joonis 9). Süvendusperioodi jooksul esines 11 tuulesündmust, mil puhangud ulatusid 20 m/s ning maksimaalne registreeritud tuulekiirus oli puhanguti 35 m/s (Joonis 10). Kogu süvendusperioodi keskmiseks tuulekiiruseks kujunes 6,6 m/s.

Detsembris valitsesid Pakri lahel väga muutliku suunaga tuuled (Joonis 11). Tuule kiirused jäid vahemikku 0,4 m/s-12,7 m/s, puhangud ulatusid kiiruseni 17,5 m/s (Joonis 10). Antud perioodi keskmiseks tuulekiiruseks kujunes 4,7 m/s (Tabel 2).

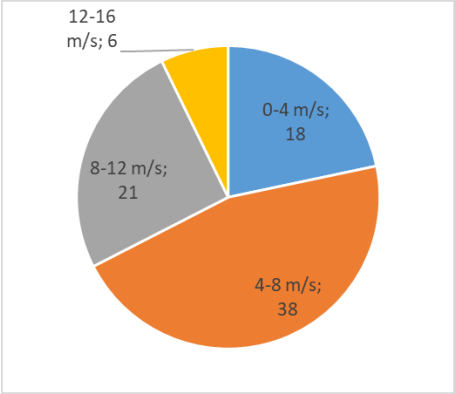
Jaanuarikuus puhus tuul enim lääne- ning lõunakaarest ning suhteliselt suureks võib pidada ka edelatuule osakaalu (Joonis 11). Tuule kiirused jäid vahemikku 0,5 m/s -16m/s puhangud ulatusid kiiruseni 21,5 m/s. Jaanuarikuu keskmiseks tuulekiiruseks kujunes 7,4 m/s, mis on paljuaastasest keskmisest 2,4 m/s võrra suurem (Tabel 2).

Veebruaris jäid tuule kiirused Pakri lahel vahemikku 0,9 - 15,8 m/s , puhanguti kuni 35 m/s. Kogu perioodi keskmiseks tuulekiiruseks kujunes 7,6 m/s, mis on 3,1 m/s normist suurem (Tabel 2). Tuule suund oli kogu kuu vältel väga muutlik, enim esines lõuna- ning edelakaare tuuli (Joonis 11).

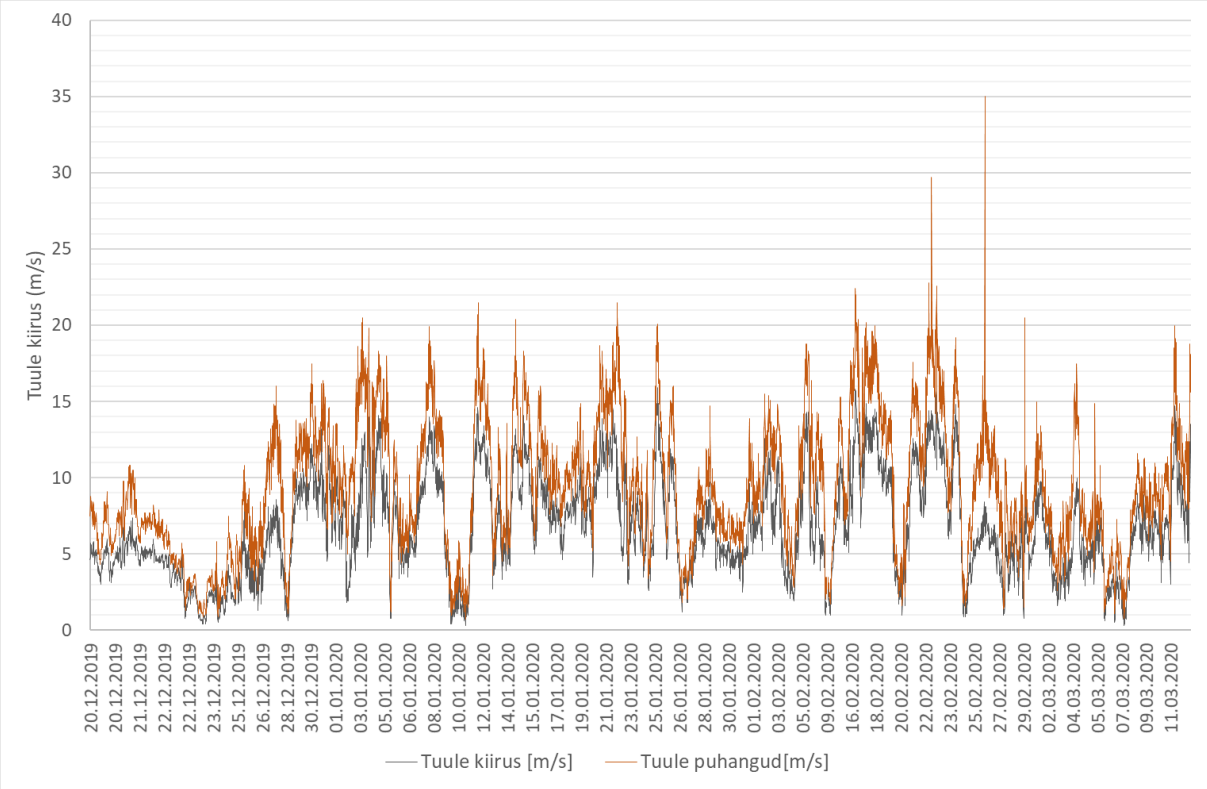
Märtsikuul toimusid süvendustööd ajavahemikul 01.03.2020-12.03.2020, peale seda süvendustööd lõppesid. Antud perioodi keskmiseks tuulekiiruseks kujunes 5,9 m/s. Tuulekiirused olid vahemikus 0,4-14,7 m/s, puhanguti kuni 20 m/s (Tabel 2). Tuulesuund oli märtsikuu süvendusperioodil muutlik, enim esines lõunakaare tuuli (Joonis 11).



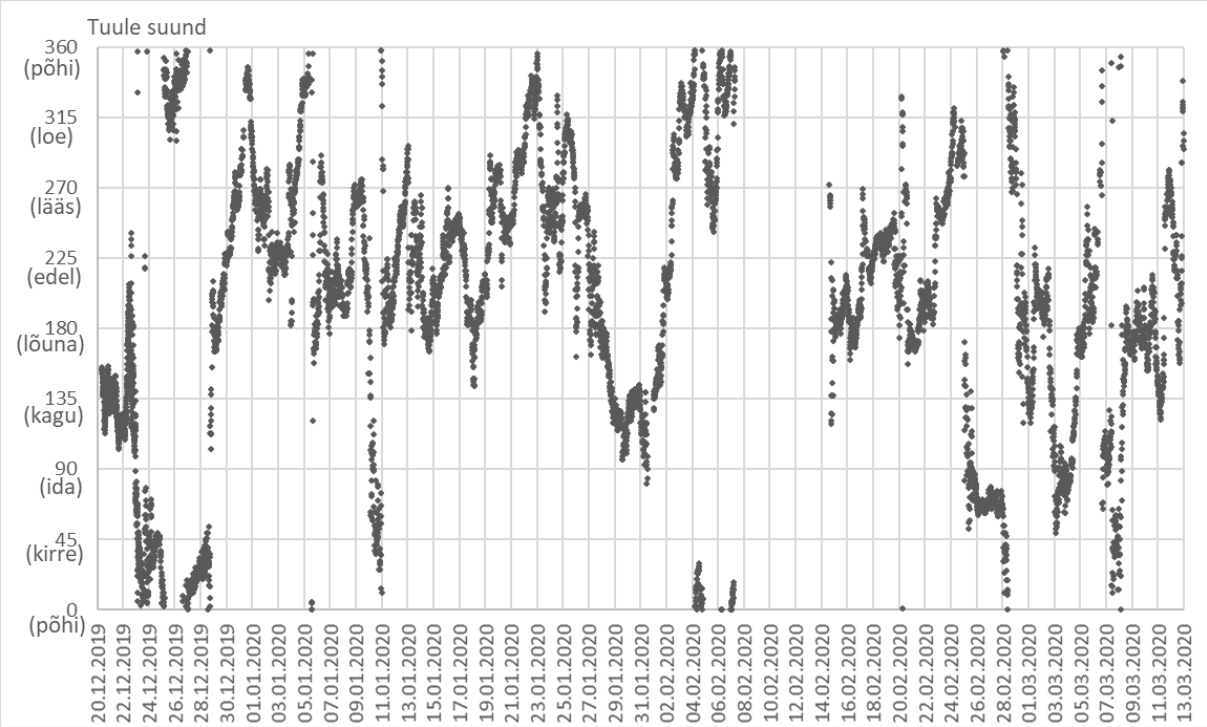
Joonis 8. Tuulesuundade korduvus protsentides süvendusperioodil



Joonis 9. Vastava tuulekiiruse esinemissagedus (päevades) süvendusperioodil



Joonis 10. Keskmine tuulekiirus (m/s) ning tuule puhangud (m/s) süvendusperioodil



Joonis 11. Tuule suuna ajaline käik süvendusperioodil

Tabel 2. Tuulekiiruste ülevaade süvendustööde perioodil ning paljuaastane keskmine tuulekiirus Pakri mõõtejaamas.

Kuu	*Paljuaastane keskmine tuulekiirus (1981-2010)*	*Süvendusperiood*			
		Kuu keskmine tuulekiirus	Minimaalne registreeritud tuul	Maksimaalne registreeritud tuul	Maksimaalne tuul puhanguti
Detsember	5 m/s	4,7 m/s	0,4 m/s	12,7 m/s	17,5 m/s
Jaanuar	5 m/s	7,4 m/s	0,5 m/s	16 m/s	21,5 m/s
Veebruar	4,5 m/s	7,6 m/s	0,9 m/s	15,8 m/s	35 m/s
Märts	4,2 m/s	5,9 m/s	0,4 m/s	14,7 m/s	20 m/s

4. Heljumi seire

4.1 Poijaama andmed

Heljumi kontsentratsiooni reaalajas jälgimiseks paigaldati süvendusala vahetusse lähedusse, ca 2 km kaugusele rannast, seirepoi (Joonis 1), mille eesmärk on registreerida suure ajalise lahutusega vee hägusust (FTU). Heljumi kontsentratsioon arvutati vastavalt regressioonseosele (Joonis 2), mis leiti laboratoorselt määratud heljumi kontsentratsiooni ja proovivõtuga üheaegselt fikseeritud hägususe väärtuste vahel.

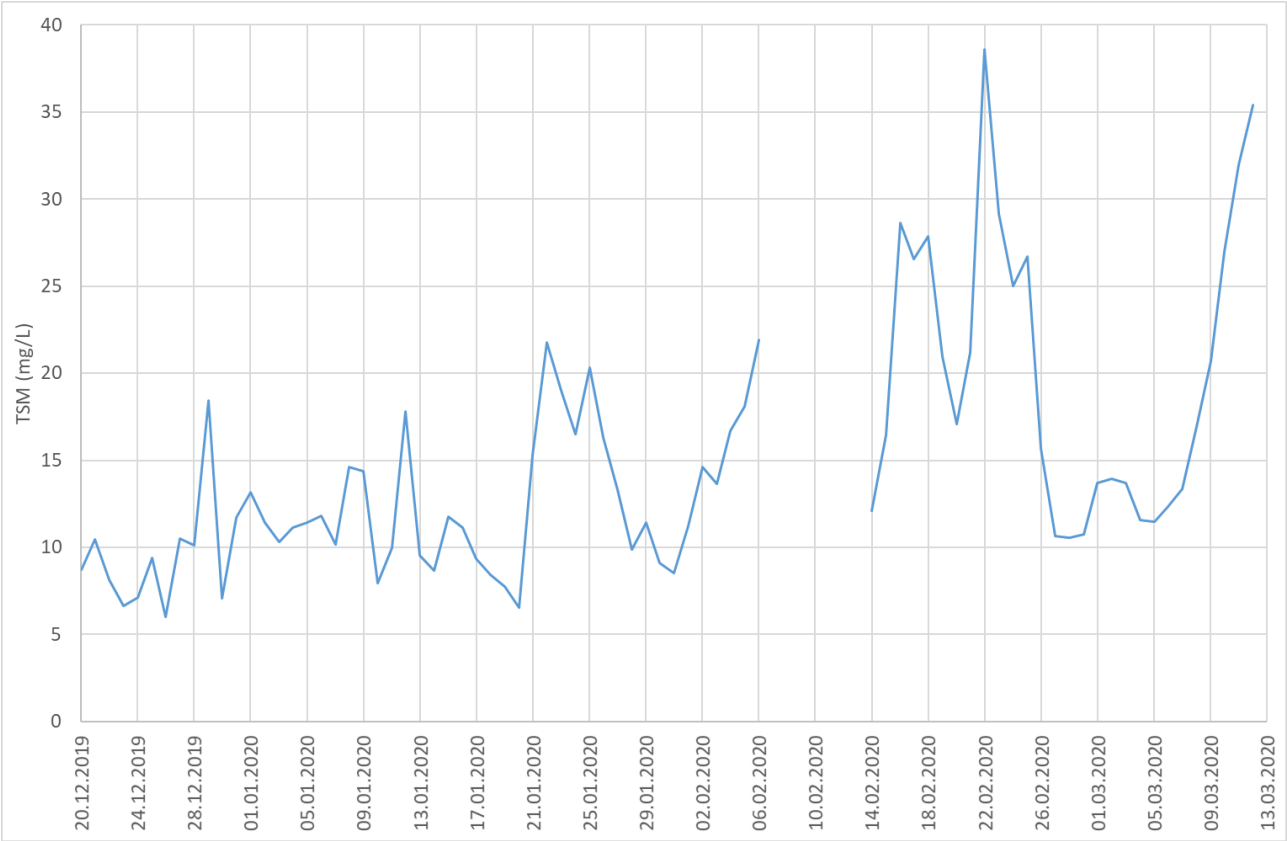
Perioodil 20.12.19 - 31.01.20 jäid ööpäeva keskmised heljumi kontsentratsioonid poijaamas vahemikku 6 - 21,8 mg/L. (Joonis 12) Kõrgemaks kui 15 mg/L tõusid ööpäeva keskmised heljumi kontsentratsioonid kuupäevadel 29.12.19, 12. 01.20 ning vahemikus 22.01 - 26.01.20. Pakri lahe piirkonnas puhus 29.12.20 edelakaare tuul kiirusega 10 m/s. 12.01.20 puhus uuringupiirkonnas lõunakaare tuul 15 m/s (Joonis 13, Joonis 14). Suure tõenäosusega oli

heljumi kontsentratsiooni tõus nendel päevadel seotud resuspensiooniga Pakri lahe lõunaosa madalast rannikupiirkonnast. Ajavahemikus 22.01. - 26.01.20 püsisid ööpäeva keskmised heljumi kontsentratsioonid üle 15 mg/L ning saavutasid ka detsembri- ning jaanuarikuu maksimumi 21,8 mg/L. Perioodi vältel puhus muutliku suunaga tuul, esines nii lõuna- läänekui põhjakaare tuuli (Joonis 14). Samuti olid tuule kiirused varieeruvad vahemikus 3 m/s – 16 m/s (Joonis 13). Muutlikest tuuleoludest sõltumatult püsisid heljumi kontsentratsioonid kogu antud perioodi üle 15 mg/L. Sellised kontsentratsioonid olid tõenäoliselt tingitud nii kõrgest looduslikust heljumist kui ka süvendusest põhjustatud heljumipilve levimisest poijaamani.

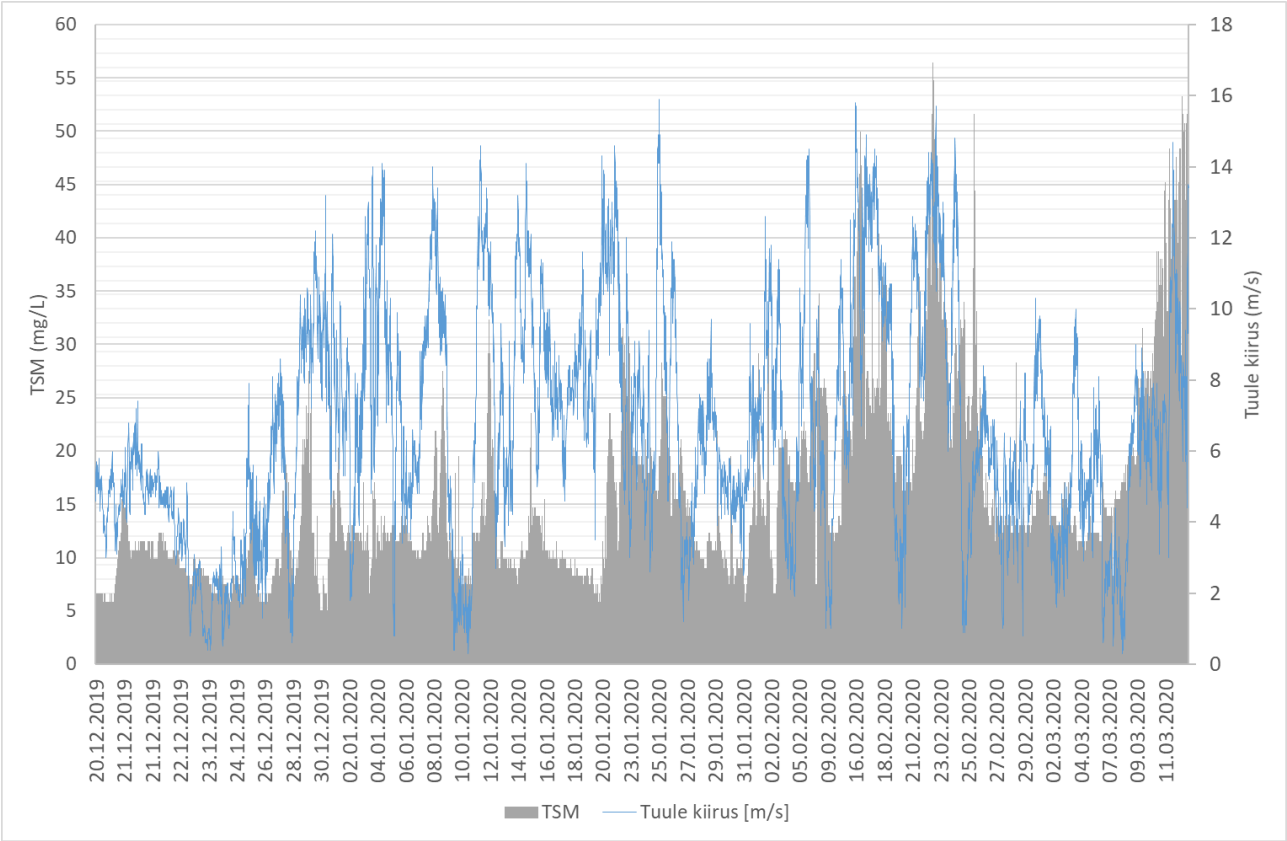
Veebruarikuus registreeris poijaam andmeid perioodidel 01.02. - 06.02.20 ning 14.02. - 29.02.20, vahemikus 07.02. - 13.02.20 poijaam tehnilise rikke tõttu andmeid ei registreerinud. Ööpäeva keskmised heljumi kontsentratsioonid veebruaris olid vahemikus 8,5 - 38,5 mg/L, olles märgatavalt kõrgemad kui jaanuarikuu ööpäeva keskmised kontsentratsioonid (Joonis 12). Seejuures oli ka keskmine tuule kiirus veebruaris kõrgem (7.6 m/s) kui jaanuaris (6.6 m/s) (Tabel 2). Kõrgemale kui 25 mg/L tõusid ööpäeva keskmised kontsentratsioonid perioodidel 16.02. -19.02.20 ning 22.02. - 26.02.20 (Joonis 12). Antud perioodidel puhusid lõuna- ning edelakaare tuuled püsivalt üle 10 m/s, puhanguti kuni 30 m/s. Mitmel päeval tuvastas mõõtepoi väga kõrged heljumi kontsentratsiooni hetkväärtused, mis ületasid 30 mg/L (Joonis 13). Kuupäevadel 17.02.20, 19.02.20 ning perioodil 21.02. - 23.02.20 on ühtlasi mõõdetud ka märgatavalt suuremad edelakaare tuuled (Joonis 14). Kuupäeval 22.02.20 tõusis heljumi kontsentratsioon 56 mg/L, uuringupiirkonnas puhus lõunakaare tuul kiirusega 14 m/s (Joonis 13).

Märtsikuu mõõtmised toimusid ajavahemikus 01.03. - 12.03.20, peale seda süvendustööd lõppesid. Märtsikuu süvendusperioodil poijaamas registreeritud heljumi kontsentratsioon oli väga varieeruv 10-54 mg/L. Vahemikus 01.03.20 kuni 08.03.20 jäid heljumi kontsentratsiooni hetkväärtused alla 15 mg/L. Perioodil 09.03. - 12.03.20 püsisid heljumi kontsentratsioonid väga kõrged ($\geq$ 20 mg/L), saavutades maksimumi (54 mg/L) kuupäeval 11.03.20 (Joonis 13). Antud ajavahemikul esinesid uuringupiirkonnas valdavalt lõuna- ning läänetuuled (Joonis 14) ning tuulekiirus küündis 14 m/s. Ööpäeva keskmised heljumi kontsentratsioonid ajavahemikus 01.03. - 08.03.20 püsisid vahemikus 11-13 mg/L (Joonis 12). Kuupäeval 09.03.20 oli heljumi ööpäeva keskmine kontsentratsioon 20 mg/L, saavutades maksimumi (35 mg/L) 12.03.20 (Joonis 12).

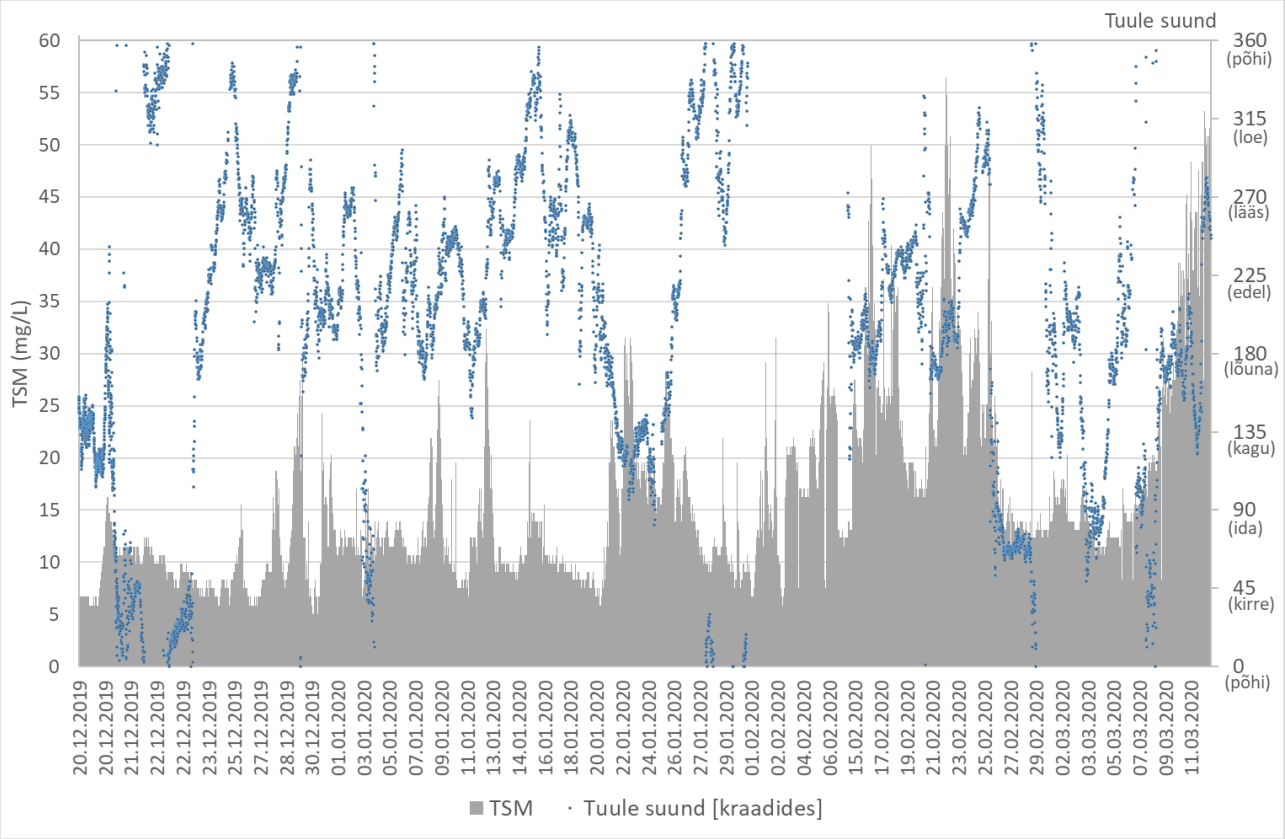
Tulemuste põhjal võib järeldada, et poijaamas fikseeritud heljumi kontsentratsioonidele avaldasid enim mõju edela- ja lõunakaare tuuled, mis tekitasid poijaama lähedal madalamas rannikumeres resuspensiooni. Suuremate tuulesündmuste korral, kui 10 (m/s), tõusid ka heljumi väärtused üle 15 mg/L. (Joonis 13). Tuultest tingitud kõrgemat loodusliku heljumi kontsentratsiooni ning sadama piirkonnast levivat süvendusest põhjustatud heljumi kontsentratsiooni kõrgemaid väärtuseid polnud võimalik eristada. Tugevatest tuultest tingitult resuspensioon madalas rannikumeres oli kõrge kogu seireperioodi vältel. Sellest tulenevalt oli ka loodusliku heljumi foon süvendusperioodil üle 10 mg/L (10 mg/L oli määratud eelseire aruandes Pakri lahe maksimaalse loodusliku foonina). Kogu seireperioodi keskmiseks heljumi kontsentratsiooniks kujunes 14,6 mg/L.



Joonis 12. Ööpäeva keskmine heljumi kontsentratsioon (mg/L) poijaamas, süvendusperioodil



Joonis 13. Poijaamas mõõdetud heljumi kontsentratsiooni ning tuule kiiruse võrdlus süvendusperioodil



Joonis 14. Poijaamas mõõdetud heljumi kontsentratsiooni ning tuule suuna võrdlus süvendusperioodil

4.2 Satelliitandmed

Satelliitpildid annavad hea ülevaate heljumi ruumilisest jaotusest uuringupiirkonnas. Jaanuarikuu süvenduse perioodist oli saadaval 2 pilvevaba satelliitpilti sensorilt MODIS. Viienda jaanuari pildilt (Joonis 15 a)) võib näha, et heljumi kontsentratsioon kogu Pakri lahe ulatuses oli vahemikus 5-10 mg/L. 5 jaanuaril puhus Pakri lahe piirkonnas valdavalt edelatuul kiirusega 6 m/s. (Joonis 13, Joonis 14). Teine saadaolev satelliitpilt pärineb kuupäevast 09.01.20 (Joonis 15 b)). Heljumi kontsentratsioonid kogu lahe ulatuses olid vahemikus 10-14 mg/L. 9 jaanuaril valitsesid Pakri lahe piirkonnas edela- ning lõunakaare tuuled, keskmise kiirusega 10 m/s (Joonis 13, Joonis 14).

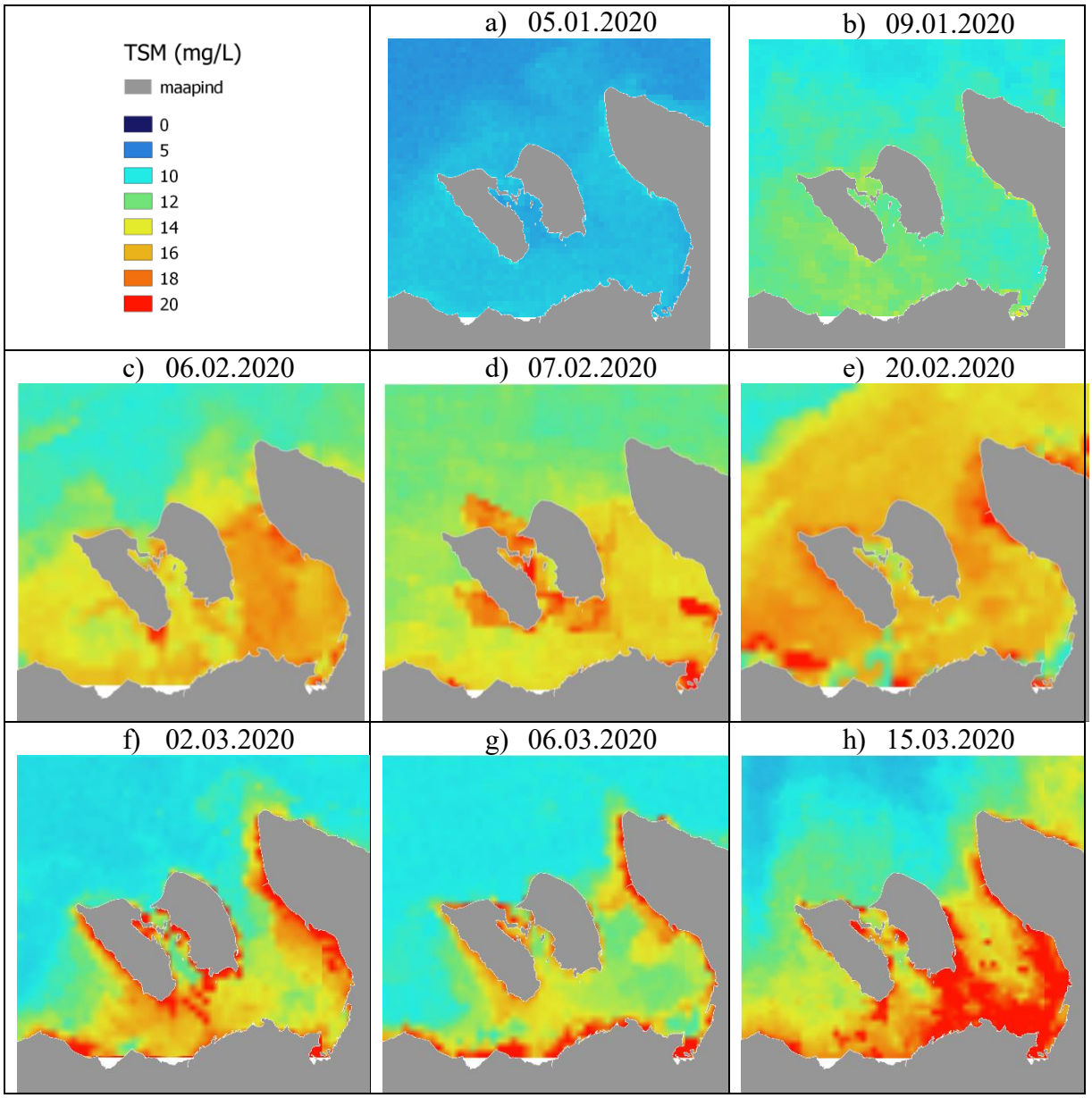
Veebruarikuust oli saadaval 3 satelliitpilti kuupäevadest 06.02.20, 07.02.20 ja 20.02.20. Kuuenda veebruari pildilt (Joonis 15 c)) võib näha, et heljumi kontsentratsioonid kogu Pakri lahe ulatuses olid vahemikus 14-18 mg/L. Lahe suudmes olid kontsentratsioonid keskmiselt 14 mg/L. 6 veebruaril puhus Pakri lahe piirkonnas valdavalt loode tuul kiirusega 7 m/s, puhanguti 15,1 m/s (Joonis 10). Seega võib öelda, et kõrgemad heljumi kontsentratsioonid on seotud tuule poolt põhjustatud resuspensiooniga. Seitsmendal veebruaril langes keskmine tuule kiirus 3 m/s. Satelliitpildilt (Joonis 15 d)) võib näha, et lahe keskosas oli heljumi keskmine kontsentratsioon 14 mg/L. Kõrgem kontsentratsiooniga piirkonnad Pakri saarte vahel madalas rannikumeres ja Kloostri jõe suudmeala. 20. veebruaril satelliitpildil on näha heljumi kõrgeid >15mg/L väärtusi Pakri poolsaare lääneranniku ja ka Pakri lahest väljaspool. Antud kuupäevale eelnenud päevadel puhusid edelakaare tuuled kiirusega 14 m/s, seega võib järeldada, et suuremad kontsentratsioonid kogu Pakri poolsaare läänekaldal ning ka Pakri lahest väljaspool olid põhjustatud eelnevate päevade tuulte poolt põhjustatud resuspensioonist (Joonis 15 e)).

Jaanuari ning veebruari satelliitpiltidelt on tuvastav ühtlaselt kõrge heljumi foon kogu Pakri lahe ulatuses, kuid see ei ole otseselt seostatav süvenduspiirkonnast laiali kandunud heljumiga.

Märtsikuu satelliitpildid pärinevad kuupäevadest 02.03.20, 06.03.20 ning 15.03.20 (Joonis 15 f) g) h)). 02.03.20 puhus uuringupiirkonnas tuul keskmise kiirusega 6 m/s ning puhanguti üle 10 m/s (Joonis 13). Heljumi kontsentratsioonid lahe keskosas olid vahemikus 12-14 mg/L ning rannikupiirkonnas 16-20 mg/L (Joonis 15 f)). Suuremad heljumi kontsentratsioonid ranniku piirkonnas on seotud tuule poolt põhjustatud resuspensiooniga. Sarnane olukord valitses ka kuuenda märtsi satelliitpildil (Joonid 15 g)). Lisaks võib 6. märtsi satelliitpildil Paldiski Lõunasadama piirkonnas täheldada kõrgema kontsentratsiooniga heljumi pilve. Kuigi ajavahemikul 25.02.20- 09.03.20 süvendust ei toimunud oli ilmselt sadamapiirkonnas pikast süvendusperioodist tingitud heljumi pilv veel alles. 15. märtsi satelliitpildil ulatusid heljumi kontsentratsioonid Pakri lahe kaldalähedasel alal üle 20 mg/L (Joonis 15 h)). Selleks ajaks olid süvendustööd ametlikult lõppenud, kuid nii poimaama andmetelt kui ka satelliitpildilt on tuvastav kõrge heljumi kontsentratsioon märtsi keskpaigas. Sel perioodil (12-15.03) puhusid Pakri lahe piirkonnas lõunakaare tuuled keskmise kiirusega 12 m/s (Joonis 13, Joonis 14), puhanguti kuni 20 m/s, seega oli kõrgem heljumi foon põhjustatud nii tuuletest aga ilmselt ka eelnenud pikast süvendusperioodist settimata jäänud väga peenest heljumi fraktsioonist.

Kogu Eesti rannikumere hägususe ruumilise jaotuse ülevaateks on sensori Sentinel-3 OLCI (*Ocean and Land Colour Instrument)* 300 m lahutusega produktist koostatud RGB pilt, kuupäevast 06.02.20 (Joonis 16). Satelliitpildilt võib näha suurenenud vee hägusust kogu Lääne- ning Loode-Eesti rannikumeres. Hägusust tekitavad suured tuulesündmused, mis põhjustavad resuspensiooni mere põhjast. Seejuures ei erine Pakri lahe piirkond heljumi kontsentratsioonide poolest muust rannikust s.t süvendustöödest tingitud heljumi kontsentratsiooni tõusu ei ole võimalik eristada looduslikust heljumi foonist.

Kokkuvõtvalt võib välja tuua, et satelliitseire tulemused on heas kooskõlas poijaamas saadud tulemustega. Madalaimad heljumi kontsentratsioonid mõõdeti nii poijaamas kui satelliitpiltidelt jaanuarikuus, kogu veebruarikuu oli heljum kontsentratsioon kõrge ning ruumiliselt väikse varieeruvusega kogu Pakri lahe ulatuses. Märtsikuus aga varieerus heljumi hulk (poijaama andmetel) ja ruumiline jaotus (satelliitpiltidelt hinnatuna) Pakri lahe ulatuses märkimisväärselt.



Joonis 15. Süvendusperioodist saada olevad satelliitpildid sensorilt MODIS. Iseloomustamaks hejumi (mg/L) ruumilist jaotust mere pinnakihis.

Joonis 16. Sentinel 3 RGB satelliitpilt kuupäevast 06.02.2020

4.3 Paikmõõtmised

Jaanuaris teostati paikmõõdistusi kuupäevadel 16.01.20 ning 23.01.20 (Tabel 3). Mõõtmispäeval 16.01.20 puhus Pakri lahes edelakaare tuul kiirusega 11,2 m/s, puhanguti kuni 15,9 m/s (Joonis 10). Veeproove koguti drooni külge ühendatud proovianumaga (Foto 4 ja 5). Proovianuma põhja oli kinnitatud raskus, et pudel vajuks tervenisti vee alla ning täituks pinnakihi veega. Vältimaks pudeli vajumist liiga sügavale oli nööri külge kinnitatud ujuk. Kogu mehhanism kinnitati drooni külge, mis transportis proovivõtupudeli soovitud punkti.

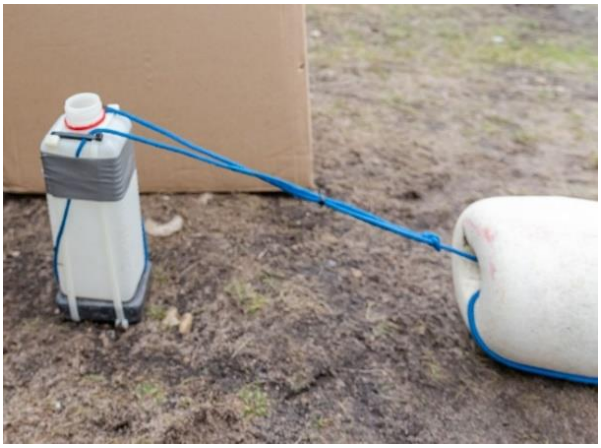
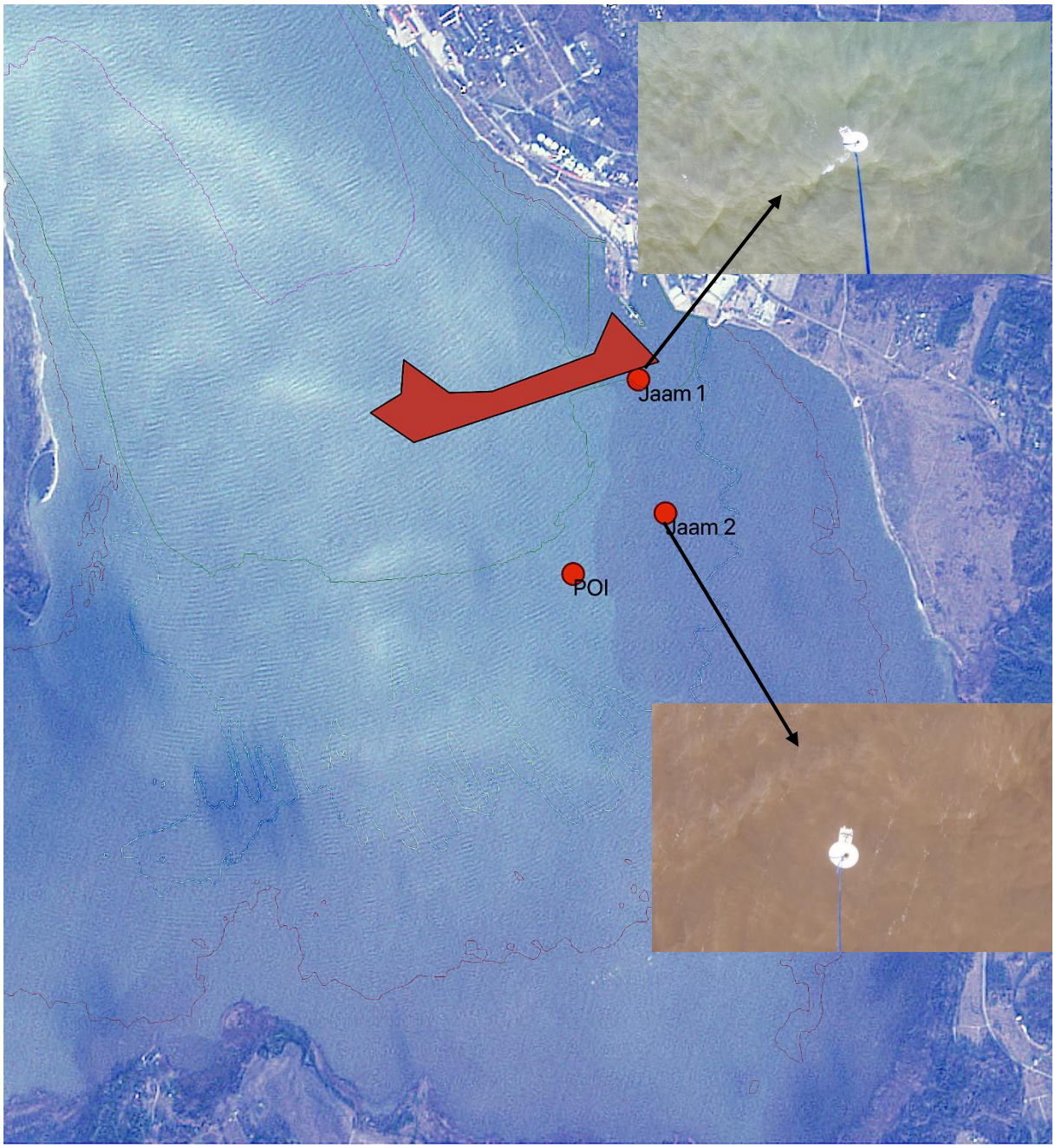


Foto 4. Veeproovide kogumise pudel.

Foto 5. Veeproovide kogumise süsteem ühendatud drooniga.

16.01.20 esinenud tuuleolud olid keerulised ning drooniga õnnestus koguda 2 veeproovi (Tabel 3). Mõõtepäeval esines pilvkate ning satelliitpilti ei olnud võimalik kasutada. Drooniga tehtud fotol (Foto 6) on selgelt näha piirjoon hägusa ja selge vee vahel. Mõõtepunktide asukoha joonisel (Joonis 17) on taustaks kasutatud mõõtmispäevale eelnenud Sentinel 2 satelliitpilti. Millelt võib samuti selgelt eristada hägusat ja selget vett. Poijaam jääb puhta veega piirkonda ning mõlemad veeproovid koguti kõrgema heljumiga alalt. Jaamas 1 oli heljumi kontsentratsioon 16,8 mg/L ning Jaamas 2 oli kontsentratsioon 12,8 mg/L (Tabel 3). Poijaamas mõõdetud heljumi kontsentratsioonid jäid sellel ajaperioodil vahemikku 8-10 mg/L. Kõrgenenud heljumi kontsentratsioon Pakri lahe idakaldal on seotud nii süvenduse kui ka tugevate tuulesündmusega antud piirkonnas. Tuultest tingitud kõrgemat loodusliku heljumi kontsentratsiooni ning sadama piirkonnast levivat süvendusest põhjustatud heljumi kontsentratsiooni kõrgemaid väärtuseid pole siiski võimalik eristada. Nagu eelnevates peatükkides mainitud oli tuultest tingitult resuspensioon madalas rannikumeres kõrge kogu seireperioodi vältel.



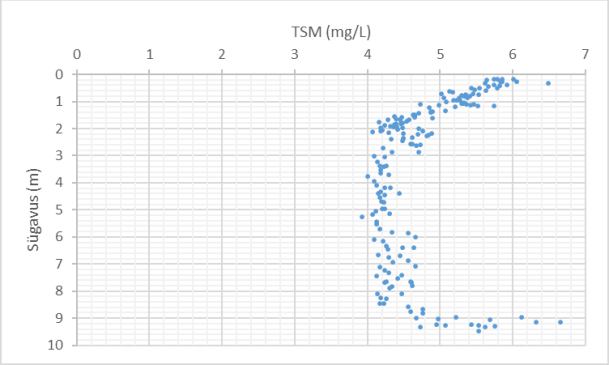
Joonis 17. Poijaama ja jaanuarikuu mõõtejaamade asukohad, Sentinel 2 satelliitpildil. Lisatud droonifotod veevõtu kohast. (Punase polügooniga on märgitud süvenduse ala, samasügavusjooned vastavalt värvile : Punane 2m, roheline 10m ja lilla 20m).

Foto 6. Heljumipilve piirjoon 16.01.2020, droonifoto Pakri lahe ida kaldalt.

Kuupäeval 23.01.20 koguti veeproovid poi juurest ning jaamast 2 (Tabel 3, Joonis 17). Poijaama kõrvalt kogutud veeproov andis heljumi kontsentratsiooniks 17,3 mg/L, mis langeb kokku poi poolt registreeritud hägususe väärtusest arvutatud heljumi kontsentratsiooniga, mis oli 15 mg/L proovivõtu ajahetkel. Tulemustes esineb küll teatav erinevus, kuid see on tingitud mõõtmistehnoloogiate erinevusest. Tabelist 3 võib näha, et ka Secchi sügavus mõõtejaamades jäi alla 1m, mis on väga vähe, võrreldes eelseire käigus saadud tulemustele, 8 m kuni põhjani läbipaistev.

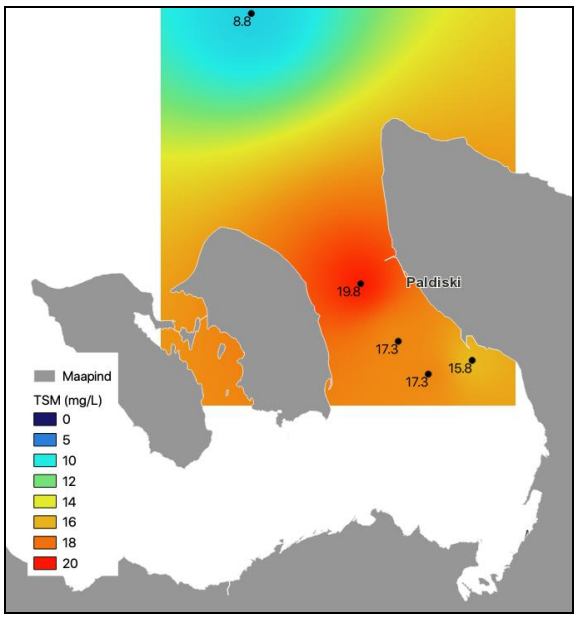
Veebruarikuus teostati paikmõõtmisi kuupäevadel 14.02.20 ning 19.02.20 (Tabel 3).
Kuupäeval 14.02.20 koguti veeproov poijaama asukohast (Joonis 18) ning teostati vertikaalne hägususe sondeerimine (Joonis 19). Seirepäeval puhus Pakri lahel muutliku suunaga tuul 3 m/s. Secchi sügavus oli 1,5 m ning veeproovist saadud heljumi kontsentratsioon 4,9 mg/L. Heljumi vertikaalne profiil (Joonis 19) näitab, et kogu veesammas oli hästi segunenud ning heljumi kontsentratsioonid jäid vahemikku 4-6 mg/L. Kõrgemad olid kontsentratsioonid pinnal ning põhjalähedases kihis (6 mg/L) ning sügavustel 2-9 m jäi kontsentratsioon vahemikku 4-5 mg/L.

Joonis 18. Seirejaamade asukoht 19.02.2020 ning poijaama asukoht.

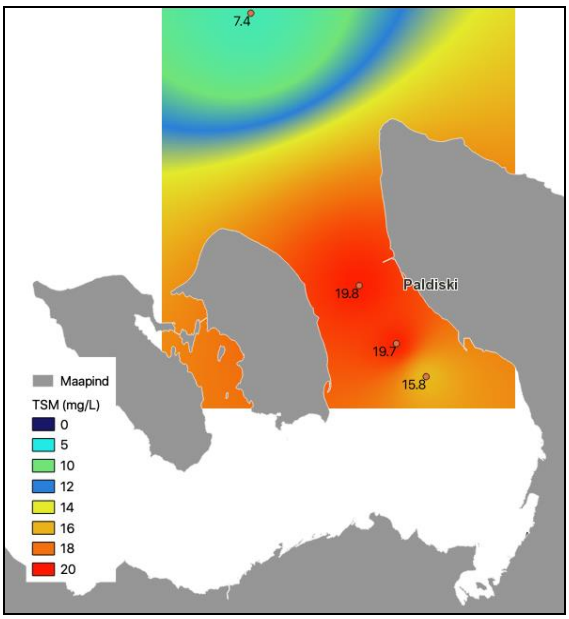


Joonis 19. Heljumi vertikaalne jaotus poijaamas, kuupäeval 14.02.2020

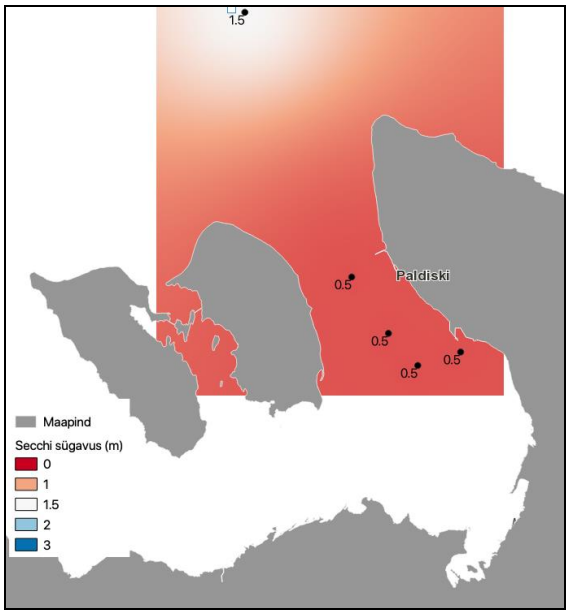
Kuupäeval 19.02.20 koguti veeproove ning mõõdeti Secchi sügavust 5 seirejaamas (Joonis 18). Veeproovid koguti pinnalt ning 15 m sügavuselt. Seirepäeval puhus valdavalt edelakaare tuul kiirusega 4-8 m/s. Heljumi kontsentratsioonid jäid vahemikku 7,4-19,8 mg/L (Tabel 3). Kõige madalamad olid kontsentratsioonid kaadamisala piirkonnas, kus pinnaproov andis tulemuseks 8,8 mg/L (Joonis 20) ning 15 m sügavusel oli kontsentratsioon 7,4 mg/L (Joonis 21). Jaamas Paldiski 18 oli veesammas segunenud vähemalt 15 m sügavuseni, kontsentratsioon oli nii pinnal kui 15 m sügavusel 18,9 mg/L (Joonis 20 , 21). Seirepäeva keskmine heljumi kontsentratsioon poijaamas mõõdetuna oli 17 mg/L (Joonis 12), mis on heas kooskõlas veeproovidest saadud heljumi kontsentratsioonidega. Secchi sügavus kõikides mõõtejaamades oli vahemikus 0,5-1,5m (Joonis 22). Kogu Pakri lahe ulatuses oli vee läbipaistvus väike (0,5 m), kaadamisala piirkonnas oli see 1m jagu suurem (1,5m).



Joonis 20. Heljumi kontsentratsioonid pinnakihis, mõõdetuna 19.02.2020 kogutud veeproovidest

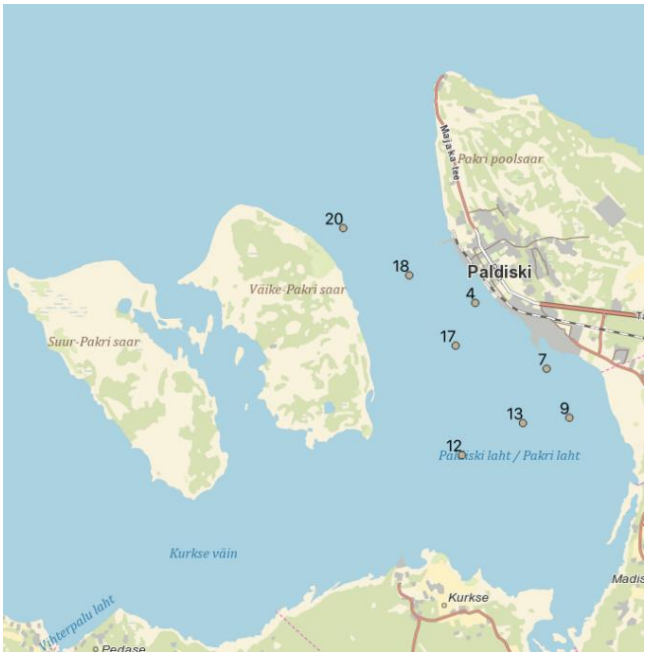


Joonis 21. Heljumi kontsentratsioonid 15 m sügavusel, mõõdetuna 19.02.2020 kogutud veeproovidest

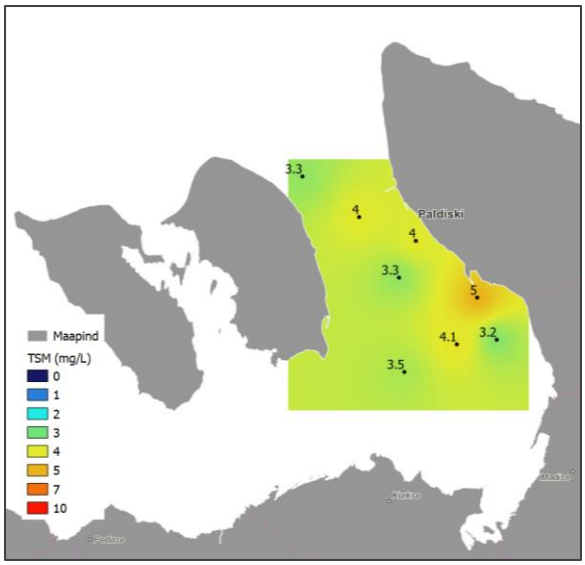


Joonis 22. Secchi sügavus kuupäeval 19.02.2020

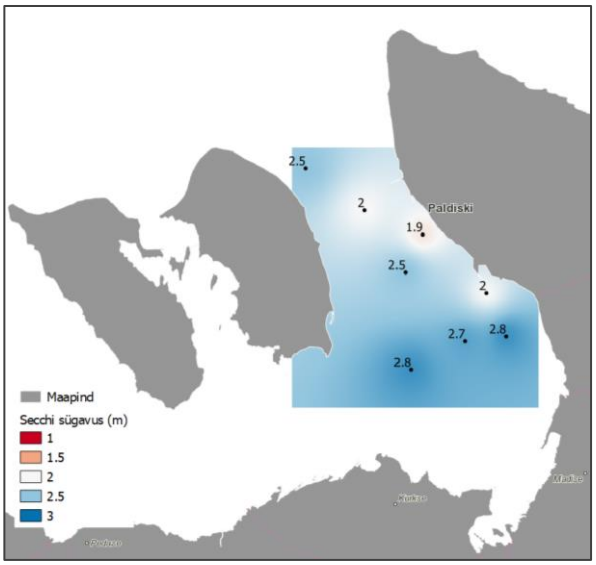
Märtsikuus teostati paikmõõdistusi kuupäeval 27.03.20 (Tabel 3). Süvendustööd lõppesid 12.03.20 ning seire tulemused iseloomustavad Pakri lahe olukorda 2 nädalat peale süvendustööde lõppu. Kaheksas mõõtejaamas (Joonis 23) teostati Secchi mõõtmised ning koguti veeproovid heljumi määramiseks laboris. Seirepäeval puhus Pakri lahel lõunakaare tuul keskmise kiirusega 3,4 m/s. Secchi sügavus kõikides mõõtejaamades oli vahemikus 1,9-2,8 m (Tabel 3). Kõige madalam (1,9 m) oli vee läbipaistvus jaamas nr 4 (Joonis 25). Heljumi kontsentratsioonid varieerusid vahemikus 3,2-5 mg/L. Kõige kõrgem heljumi kontsentratsioon (5 mg/L) mõõdeti jaamas nr 7 (Joonis 24). Tulemuste põhjal võib järeldada, et kuupäevaks 27.03.2020 oli Pakri lahes taastunud heljumi normaalne looduslik foon.



Joonis 23. Seirejaamade asukoht 27.03.2020



Joonis 24. Heljumi kontsentratsioonid, mõõdetuna 27.03.2020 kogutud veeproovidest



Joonis 25. Secchi sügavus kuupäeval 27.03.2020

Tabel 3. Süvendus pearioodil (16.01.20, 23.01.14.02.20, 19.02.20) ning peale süvendust (27.03.20) teostatud paikmõõtmised

Kuupäev	*ID*	*Proovi sügavus (m)*	*TSM*	*Secchi*	*kellaaeg*
16.01.2020	1	1	16,8		11:30
16.01.2020	2	1	12,8		12:30
23.01.2020	poi	1	17,3	0,6	13:30
23.01.2020	1	1	16,6	0,5	13:10
14.02.2020	poi	1	4,9	1,5	14:46
19.02.2020	Kaadamisala	1	8,8	1,5	13:47
19.02.2020	Kaadamisala	15	7,4		
19.02.2020	Paldiski18	1	19,8	0,5	14:45
19.02.2020	Paldiski18	15	19,8		
19.02.2020	Paldiski17	1	17,3	0,5	15:08
19.02.2020	Paldiski17	15	19,7		
19.02.2020	Paldiski14	1	17,2	0,5	15:26
19.02.2020	Paldiski14	15	15,8		
19.02.2020	Paldiski7	1	15,8	0,5	15:46
27.03.2020	18	1	4,0	2,0	13:19
27.03.2020	20	1	3,3	2,5	13:01
27.03.2020	17	1	3,3	2,5	13:50
27.03.2020	13	1	4,13	2,7	11:46
27.03.2020	4	1	4,0	1,9	13:36
27.03.2020	12	1	3,47	2,8	12:20
27.03.2020	9	1	3,2	2,8	14:21
27.03.2020	7	1	5,0	2,0	14:06

Vahearuanded

Enne süvendustööde algust teostati eelseire ning koostati eelseire aruanne. Süvendustööde perioodil koostati 2 vahearuannet.

Tabel 4 Seireperioodi jooksul koostatud vahearuanded

Aruanne	Seire periood	fail
Eelseire aruanne	Aprill 2019-detsember 2019	Eelseire_29_11_19.pdf
Jaanuarikuu vahearuanne	20.12.2019-31.01.2020	Aruanne jaanuar_03_02_20.pdf
Veebruarikuu vahearuanne	01.02.2020-29.02.2020	Aruanne veebruar.pdf

Kasutatud kirjandus

Doerffer, R., Schiller, H. 2007. The MERIS Case 2 water algoritm. International Journal of Remote Sensing, 28, pp. 517-535.

Islam, A., Wang, L., Smith, C., Reddy, S., Lewis, A., Smith, A. 2007. Evaluation of satellite remote sensing for operational monitoring of sediment plumes produced by dredging at Hay Point, Queensland, Australia. Journal of Applied Remote Sensing, 1, 011506.

Kutser, T., Metsamaa, L., Vahtmäe, E., Aps, R. 2007. Operative Monitoring of the Extent of Dredging Plumes in Coastal Ecosystems Using MODIS Satellite Imagery. Journal of Coastal Research, 50, pp. 180-184

Lindell, T., Pierson, D., Premazzi, G., Zilioli, E. 1999. Manual for monitoring European lakes using remote sensing techniques. Luxembourg Off. for Off. Publ. of the Europ. Communities.

Raag, L.; Uiboupin, R.; Sipelgas, L. (2013). Analysis of historical MERIS and MODIS data to evaluate the impact of dredging to monthly mean surface TSM concentration. SPIE Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2013, Dresden, Germany, September 2013. Ed. Bostater, C.; Mertikas, S.; Neyt, X. SPIE Hyperspectral Remote Sensing, 88880B-1−88880B-7. (8888).10.1117/12.2032327.

Raag, L., Sipelgas, L., Uiboupin, R., 2014. Analysis of natural background and dredging-induced changes in TSM concentration from MERIS images near commercial harbours in the Estonian coastal sea. International Journal of Remote Sensing, Vol. 35, No. 18, 6764–6780

Seapoint Turbidity Meter User Manual. URL (kasutatud jaanuar 2020) http://www.seapoint.com/pdf/stm_um.pdf

Sipelgas, L., Raudsepp, U., Kõuts, T. 2006. Operational monitoring of suspended matter distribution using MODIS images and numerical modeling. Advances in Space Research, 38, pp. 2182 – 2188.

Sipelgas, L.; Uiboupin, R.; Arikas, A.; Siitam, L. 2018. Water quality near Estonian harbours in the Baltic Sea as observed from entire MERIS full resolution archive. Marine Pollution Bulletin, 126, 565−574.10.1016/j.marpolbul.2017.09.058.