

Tartu Ülikool

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

Tareste lahe setete levik ja hüdrodünaamilised protsessid

Eliise Kesküla

Juhendajad: Martin Liira

Prof. Riko Noormets

Tartu 2025

Annotatsioon

Tareste lahe setete levik ja hüdrodünaamilised protsessid

Hiiumaa kirderannikul asuva Tareste lahe jätkusuutlikuks majandamiseks on liiga vähe teaduspõhist informatsiooni. Käesoleva töö eesmärgiks oli välja selgitada, milline on lahe merepõhja setete levik ning hüdrodünaamilised tingimused – sellised teadmised võimaldavad hinnata lainete, setete ja inimtegevuse jääkainete dünaamikat. Lahest koguti 188 setteproovi, analüüsiti nende lõimist ning ühendati saadud tulemused põhjalähedase veeliikumise andmetega. Tulemused võimaldasid lahes eristada kolme setteala, mis erinesid üksteisest settimiskeskonna omaduste ning setete päritolu poolest. Hüdrodünaamika analüüsist selgus, et setete transport toimub eelkõige lainetuse mõjul ning lõuna suunas, akumulcerudes lahe pcras. Lahe keskosas toimivad karid takistusena ja suunavad settevooge ümber.

Märksõnad: rannikumeri, põhjasetted, hüdrodünaamika, setete liikumine

CERCS kood: P460 Sedimentoloogia; P500 Geofüüsika, füüsikaline okeanograafia, meteoroloogia; P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Sediment distribution and hydrodynamic processes in Tareste Bay

Tareste Bay on the northeastern coast of Hiiumaa has currently limited scientific data available for sustainable management decisions. This study aimed determine the distribution of seabed sediments and the hydrodynamic conditions in the bay – those new insights will increase our understanding of wave, sediment, and pollution dynamics. A total of 188 sediment samples were collected and analyzed for grain size. The results were combined with near-bottom current data. Findings show three distinct sediment zones with different hydrodynamical conditions and sediment origins. The analysis of hydrodynamic data revealed that sediment transport in Tareste Bay is predominantly driven by wave action in southerly directions, with accumulation primarily in the inner bay. Reefs in the central part of the bay act as obstacles and redirect sediment flows.

Keywords: coastal sea, bottom sediments, hydrodynamics, sediment transport

CERCS code: P460 Sedimentology; P500 Geophysics, physical oceanography, meteorology; P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Hüdrodünaamika ja settetranspordi üldalused	6
1.1. Ranniku ja madalmerese setete dünaamika.....	6
1.2. Tarestelahe füsiograafia, setted ja hüdrodünaamika	7
1.3. Varasemad uuringud.....	9
2. Andmed ja meetodika	11
2.1. Andmed	11
2.1.1. Originaalandmed ja nende kogumine	11
2.1.1. Sekundaarandmed	12
2.2. Andmetöötlus ja -analüüs.....	13
2.2.1. Põhjasetted	13
2.2.2. Hüdrodünaamika.....	15
3. Tulemused	18
3.1. Merepõhja reljeef.....	18
3.2. Settetüüpide levik lahes	19
3.2.1. Punktandmed.....	19
3.2.2. Interpoleerimine	20
3.3. Hüdrodünaamilised protsessid ja nende mõju	22
3.3.1. Hetkeline veevool	22
3.3.2. Domineeriv veevool ja sellega seotud settetransport.....	25
3.3.3. Tuuleandmed ja seos hüdrodünaamikaga	27
3.3.4. Tormide mõju.....	27
4. Arutelu.....	30
4.1. Settetüüpide levik lahes	30
4.2. Hüdrodünaamilised protsessid ja nende mõju	31
4.3. Vesiviljeluse jääkained.....	35
4.4. Meetodika sobivus ja töö edasiarenduse võimalused	36
Kokkuvõte.....	37
Summary	38
Tänuavaldused	40
Kasutatud kirjandus	41
Lisad.....	45

Lisa 1. Setete proovipunktide asukohad	45
Lisa 2. Välitöödel kasutatud instrumendid	49
Lisa 3. Hüdrodünaamika proovipunktide asukohad	51
Lisa 4. Setteproovide lõimisevahemikkude massiprotsendid	52
Lisa 5. Magnetilise deklinatsiooni määramine	60
Lisa 6. Hüdrodünaamika mõõteperioodid.....	60
Lisa 7. Hüdrodünaamika proovipunktide setete erosioonikiirused.....	61
Lisa 8. Tareste lahe setteproovide jaotumine settetüüpide vahel Folk & Ward (1957) klassifikatsiooni järgi	61

Sissejuhatus

Tareste laht on Hiiumaa kirderannikul asuv madalaveeline avalaht. Tegemist on inimeste poolt aktiivselt kasutatava veekoguga – lahe käekäiku mõjutavad ning omakorda sellest sõltuvad väikesadamad, mereturism ja rekreatsioon (surfamine, purjetamine, ujumine, ümbritsevad Riigimetsa Majandamise Keskuse puhkealad). Inimtegevustest on negatiivseima keskkonnamõjuga lahte suubuv Kärkla reoveetoru (Keskkonnaagentuur, 2024a) ning Lehtma sadamasse ehitatud kai, mille tulemusena on osadel rannalõikudel tekkinud intensiivne erosioon (nt Orviku, 2018). Tareste laht on osaliselt ka kaitse all, sh Natura aladest asub lahe idaosas Väinamere linnu- ja loodusala (Keskkonnaagentuur, 2024c, 2024d) ning edelaosas Tareste loodusala (Keskkonnaagentuur, 2024b).

Lahe keskosas paikneb provisoorne vesiviljeluse ala (Artes Terrae OÜ, 2018), millel planeeritava tööstusliku kala-, karbi- ja vetikakasvanduse arendamisega kaasnev mõju keskkonnale ning teistele vee- ja rannakasutusega seotud tegevusaladele ei ole veel teada. Lahe jätkusuutlikuks majandamiseks on oluline teha kaalutletud ning teaduslikel andmetel põhinevaid otsuseid, hetkel on aga teadmised selles valdkonnas puudulikud.

Käesoleva töö eesmärgiks on välja selgitada, milline on Tareste lahe merepõhja setete koostis, levik ning hüdrodünaamilised tingimused. Sellised teadmised võimaldavad hinnata (tormi)lainete, hoovuste, settevoogude ja inimtegevusest tekkivate jääkainete dünaamikat lahes.

Töö eesmärgist lähtuvalt on püstitatud kaks uurimisküsimust:

- Milline on settetüüpide levik Tareste lahes?
- Kuidas avaldavad hüdrodünaamilised protsessid (lainetus ja hoovused) mõju merepõhjale (sh planeeritava vesiviljeluse jääkainetele) Tareste lahes?

Töö tulemusena koostatakse ka Tareste lahe pindmiste põhjasetete kaart, mis on oluline alus täiendavate uuringute läbiviimiseks.

1. Hüdrodünaamika ja settetranspordi üldalused

1.1. Ranniku ja madalmerese setete dünaamika

Setete levik merepõhjas sõltub nii nende omadustest kui ka settimiskeskonnast, st veesamba hüdrodünaamikast ja merepõhja reljeefist. Sette füüsikalised omadused, nt tera suurus ja tihedus, määravad ära selle mobiilsuse – peeneteralisemad setted on kergemini liikuvad ning settivad vaid väga aeglase voolukiiruste juures, samas kui jämedamate setete (nt kruus) liigutamiseks läheb vaja rohkem jõudu ja suuremaid kiiruseid (Hjulström, 1935). Seetõttu võib juba sette fraktsioonide jaotus peegeldada valitsevaid vee liikumise olusid. Veesamba hüdrodünaamikat kontrollib eelkõige ilmastik (tuul, õhurõhk), sellest mõjutatud veetaseme kõikumised, lainetus ja hoovused, aga ka taevakehade liikumisest tingitud muutused, nt tõus ja mõõn (Orviku, 2018). Rannikualade põhiliseks setete transporti kontrollivaks teguriks on lained ja lainetekkelsed hoovused, st põhiosa setteid liigub rannavööndis lainetsoonis – setteid hakatakse liigutama alles siis, kui laine mõju ulatub merepõhja (Soomere jt, 2013).

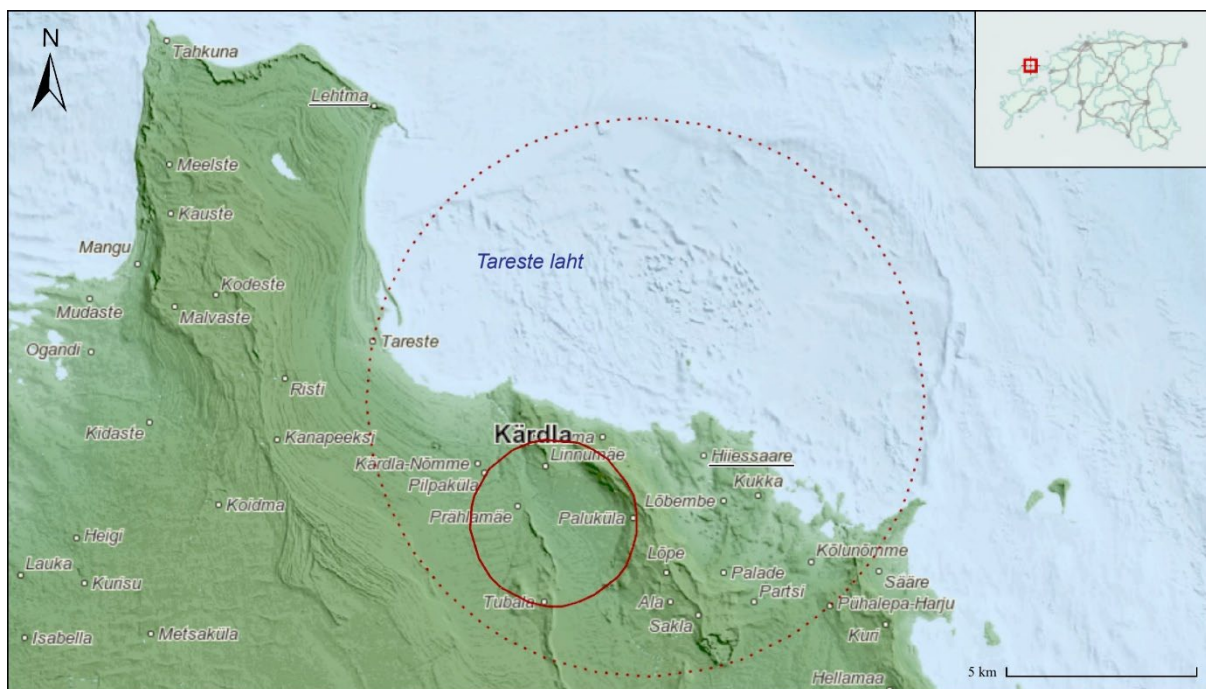
Lained kujunevad peamiselt tuule tagajärjel ning mere avaosas, kus püsivad tuuled saavad takistamatult puhuda üle pikkade vahemaade (Eelsalu jt, 2022). Selle pärast on lainete suund ja kõrgus enamasti määratud tuule suuna, tugevuse ning stabiilsusega. Näiteks keskmise kiirusega (6–8 m/s) tuul suudab tekitada kuni meetrikõrguse lainetuse ning vajab maksimumi saavutamiseks paar tundi ühtlaseid olusid (Orviku, 2018). Laine levikiirus sõltub laine pikkusest, mis omakorda sõltub vee sügavusest – sügavamal vees on pikemad ja kiiremini liikuvad lained (Orviku, 2018). See tähendab, et laine pikkus ja seeläbi ka suund võivad muutuda sõltuvalt rannalähedase merepõhja reljeefist – madalamasse vette jõudes võib laine front painduda.

Läänemere lainetust ja seeläbi ka lainetekkelsist settetransporti mõjutavad kõige enam mere geomeetria ning geograafiline asend. Eraldatuse tõttu maailmamereest on Läänemeres lainetus praktiliselt kogu mahus tekitatud mere kohal puhuvate tuulte poolt (Chirosca & Rusu, 2022; Soomere jt, 2012), mitte ei ole tegemist kaugemalt siia kandunud lainetega. Keskmised ja tugevad tuuled on Läänemere kohal äärmiselt anisotroopsed – domineerivad suunad on edel ning põhi (Soomere & Keevallik, 2001). Seetõttu on ka lainetekkeline settetransport väga suurel määral mõjutatud konkreetse piirkonna avatusest ja orienteeritusest domineerivate tuulte suhtes (Eelsalu jt, 2022). Läänemere keskosas hakkavad lained merepõhja mõjutama keskmiselt sügavusel 5–6 m, Soome ja Liivi lahe rannikutel aga 3–4 m sügavusel (Soomere jt, 2013).

Läänemere laineenergia on ajaliselt ebaühtlaselt jaotunud – märkimisväärne osa aastasest energiast koondub lühikestesse kõrgemate lainetega perioodidesse sügisel ja talvel, samas kui ligikaudu 200 päeval aastas on randa jõudev laineenergiavoog praktiliselt olematu (Soomere & Eelsalu, 2014). Enamasti jääb oluline lainekõrgus Läänemeres alla 1 m (Zaitseva-Pärnaste jt, 2009), tormide ajal võib see olla aga kordades suurem. Näiteks 2023. aastal mõõdeti Läänemere keskosa põhjaosas suurimaks oluliseks lainekõrguseks 7,8 m (Pettersson jt, 2024). Tüüpilised laineperioodid meres on 4–6 s ja rannikul 2–4 s (Zaitseva-Pärnaste jt, 2009).

1.2. Tareste lahe füsiograafia, setted ja hüdrodünaamika

Tareste laht on madalaveeline, põhjakaarde avatud laht Hiiumaa kirderannikul – laiemas (ja käesoleva töö) käsitluses loetakse selleks Lehtma ja Hiiesaares vahelist mereala (joonis 1). Laht on kõige madalaveelisem Tahkuna poolsaare idapoolisel küljel, sügavnedes lahe keskosas 12–13 meetrini (Transpordiamet, i.a). Oma asukoha ja avatuse tõttu on Tareste laht märkimisväärselt seotud Läänemere põhjaosa ja Soome lahe hüdrodünaamiliste protsessidega (Männikus jt, 2023).



Joonis 1. Tareste laht ja seda ümbritsevad geoloogilised struktuurid (Eesti Geoloogiateenistus, 2023; aluskaart Maa- ja Ruumiamet (2025)). Punane pidevjoon – Kärkla kraatri ringvalli hari, punane katkendjoon – oletatav Kärkla kraatri ringmurrang.

Piirkonna pinnavormide ning setete levikut on tugevalt mõjutanud Läänemere geoloogiline arengulugu viimase 16 000 aasta jooksul ehk alates viimasest jääajast – liustike taandumisel maha jäänud reljeefivormid ning moreenkiht on Läänemere arengu eri etappidel kattunud erinevate (viir)savidega (Rosentau jt, 2017; Tuuling jt, 2011). Enamus Hiiumaast moodustavad metsastunud Limnea- ja Litoriinaaegsed rannavallid ja liivaluited, mis nüüd on rannaliivade põhiliseks allikaks (K. Suuroja jt, 2020).

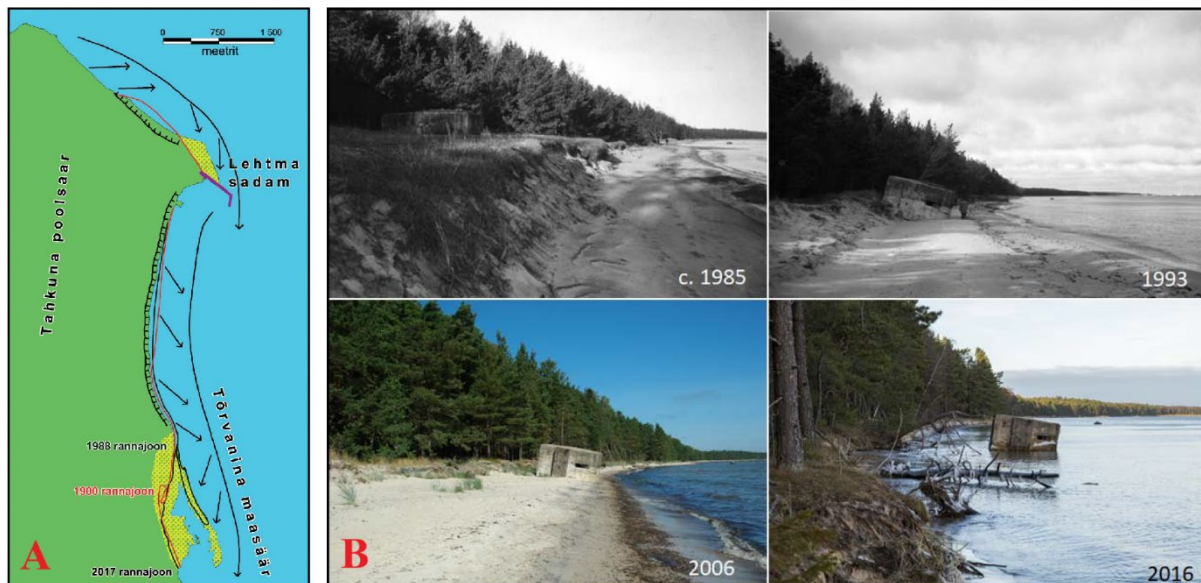
Tareste lahe setete struktuuri on siiaamaani detailsemalt uuritud vaid lahe lääneosas, Tahkuna poolsaare lähedal. Sealsed põhjasetted on valdavalt ühetaolised ja koosnevad 95–99% ulatuses keskmisest kuni väga peeneteralisest liivast (0,063–0,5 mm) (Noormets jt, 2019). Setteproovide terajämeduse mediaanväärtused jäävad nii vees kui rannas keskmise kuni peeneteralise liiva vahemikku (0,125–0,5 mm), kusjuures jämedamaid setteid leidub eelkõige rannas ning Lehtma sadamakaist põhja pool (Männikus jt, 2023). Liivase settekehandi all asub aluspõhi ning viimasest jäätumisest pärinev moreen, millest viimane osades kohtades ka paljandub (S. Suuroja jt, 2020).

Põhjasetete liikumine Tareste lahes on eelkõige lainetekkeline (Orviku, 2018) ning rannasetete transpordi põhiliseks kontrollivaks jõuks on tugevate tormituultega kujunev murdlaine ja murdlusvool (Männikus jt, 2023). Aasta lõikes toimub kõige intensiivsem setete transport oktoobrist jaanuarini kirde- ja idatormide puhul (Männikus jt, 2023). Looduslikult on lahe lääneosas tegemist klassikalise litomorfodünaamilise kulutus-kuhjesüsteemiga, kus kulutusala on Tahkuna poolsaare kirderannik ning setted transporditakse piki randa lõuna poole kuni Tõrvanina maasääreni (Orviku, 2018). Rannanõlval domineerib seega lääne- ja lõunasuunaline veevoog, mis uuringute järgi rannaku madaldudes intensiivistub (Noormets jt, 2019).

Piirkonnas liigub aastas keskmiselt 20 000–25 000 m³ liiva (Noormets, 2024). Männikus jt (2023) hindasid piirkonnas liikuvaks settemahuks vaid 2500 m³ aastas, aga nende kasutatud kartograafiline/morfoloogiline meetod ei ole tegelikult võimeline hindama setete liikumist laiadel suhteliselt tasastel aladel. Alahinnata võidi ka liikuvate setete paksust, kuna mõõtmisi tehti väga vähe.

Praegusel ajal on Tahkuna poolsaare kirdeosas looduslik lõunasuunaline settevool takistatud, sest 1970-ndatel valminud ja setete transiitalasse jääv Lehtma sadamakai toimib seal takistusena (Männikus jt, 2023; Noormets jt, 2019; Orviku, 2018; S. Suuroja jt, 2020). Selle tulemusena toimub märkimisväärne setete kuhjumine sadamaalale ning kaist lõuna pool on settedefitsiidi tõttu tekkinud rannikul tugev erosioon ja rannajoone taganemine (joonis 2)

(Männikus jt, 2023; Noormets jt, 2019; Orviku, 2018; S. Suuroja jt, 2020). Näiteks 2013–2020 rannaprofiili kõrgusmöödistamistest selgub, et sel perioodil on mõnedes kohtades rannaastang taganenud üle 5 meetri (S. Suuroja jt, 2020). Lisaks on maa poole nihkunud veealused rannabarrid, mistõttu lainetuse mõju rannale kasvab tulevikus veelgi (Männikus jt, 2023). Seega toimub ka praegu lahe lääneosas peamine settevoov ranniku lähedal ning lõunasse, kuid transiitla on muutunud takistuse tõttu kulutuslaks (Orviku, 2018) – sadamasse kuhjunud ning süvendustööde käigus eemaldatud setted enam ringlusesse ei jõua (Noormets jt, 2019).



Joonis 2. A: Rannaprotsessid Tahkuna poolsaare kirde- ja idarannikul (Orviku, 2018). Mustad sakid tähistavad murrutust, kollase-täpiline ala kuhjeranda. B: Tahkuna poolsaare idaranniku rannajoone taandumine betoonist militaarobjektide suhtes (Noormets jt, 2019).

1.3. Varasemad uuringud

Kõik Tareste lahega seotud setete ja hüdrodünaamika uuringud on siimaani keskendunud lahe n-ö probleemsele lääneosale (tulemustest ja saadud teadmistest on ülevaade antud eelmises alapeatükis) – seal on läbimõtlema inimtegevuse tagajärjel tekkinud rannaalal suured purustused ning samuti tuleb Lehtma sadama toimimise tagamiseks pidevalt tegeleda sadamas ummistuse likvideerimisega.

Kaks kõige märkimisvääremat tööd on mõlemad Lehtma sadama süvendustööde keskkonnamõju hindamisega seotud eksperthinnangud – Noormets jt (2019) ning Männikus jt (2023). Noormets jt (2019) analüüsisid lahe lääneosa setete liikumist läbi punktmõõtmiste, Männikus jt (2023) kasutasid aga Lehtma sadama ümbruse settevoogude hindamiseks

modelleerimist. Lisaks nendele viib Eesti Geoloogiateenistus riikliku keskkonnaseire programmi osana piirkonnas läbi mererannikute seiret. Tareste seireala asub Tahkuna poolsaare idarannikul (RMK Tõrvanina puhkealal) ning seal on rannamorfoloogia muutusi kaardistatud juba aastast 1995 – rannajoonega risti olevate kõrgusprofiilidega jälgitakse eelkõige Lehtma sadama rajamisest põhjustatud rannajoone taandumist (S. Suuroja & Veski, 2019; S. Suuroja jt, 2020).

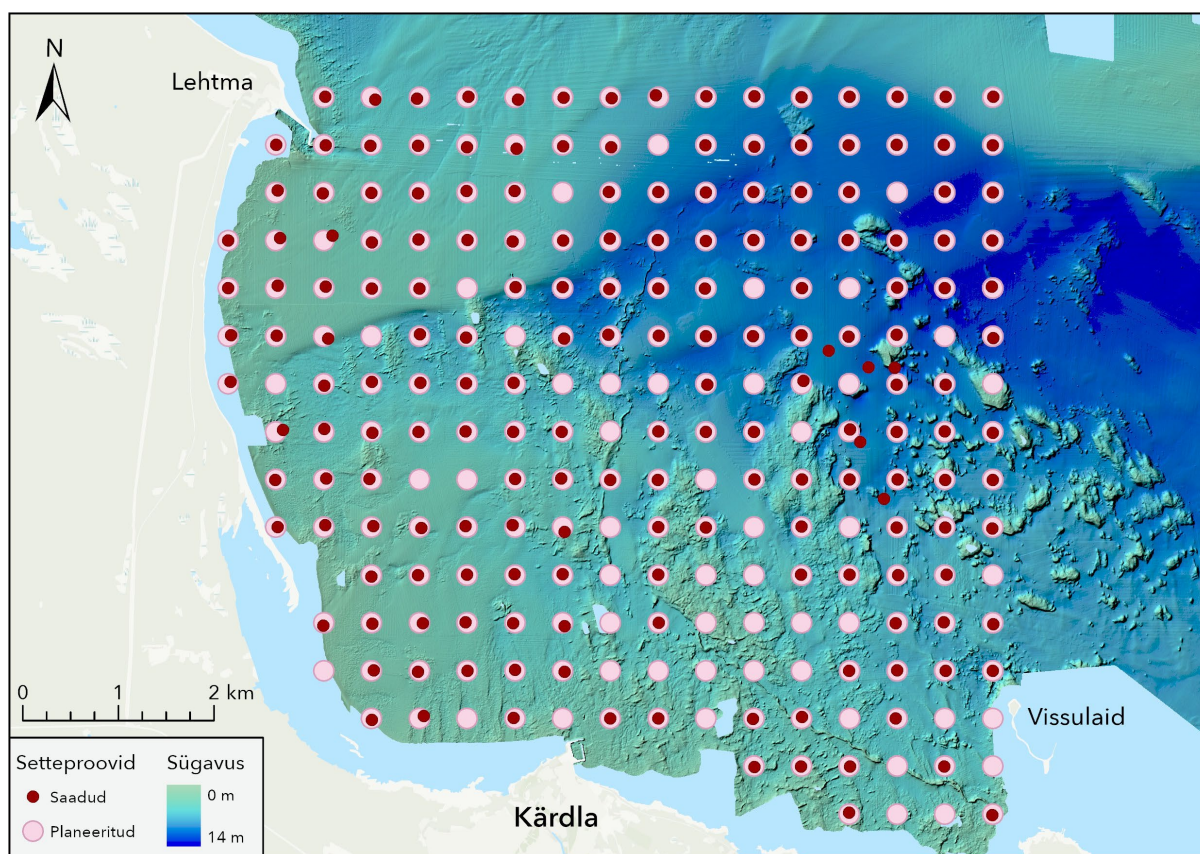
Erinevalt lääneosast ei ole Tareste lahe kesk- ning idaosa spetsiaalselt uuritud, kuigi vee-, sette- ja muude ainevoogude hindamiseks on vaja omada terviklikku ülevaadet lahes valitsevatest tingimustest. On diskuteeritud, et lahe keskosas on setted väiksema mobiilsusega (Noormets jt, 2019), kuid alusandmeid sellelt alalt on napilt. Samas on tänu Transpordiameti Eesti rannikumeres teostavatele mõõdistustöödele olemas täielik ülevaade lahe merepõhja batümeetriast (Transpordiamet, 2023).

2. Andmed ja metoodika

2.1. Andmed

2.1.1. Originaalandmed ja nende kogumine

Uurimuse läbiviimiseks ning põhjasetete kaardi koostamiseks koguti setteproove perioodil 7.–30.07.2023. Uurimisala suurus oli 50 km² ning see oli põhjast piiritletud Lehtma sadama ning idast Vissulaiuga. Ala kaeti planeeritud proovipunktide võrgustikuga (236 punkti, vahekaugus 500 m) ja sõideti läbi GNSS-seadmega varustatud kummipaadiga, eesmärgiga võimalikult paljudest kohtadest setteproov saada. Tegelikult kogutud ning analüüsitud proovide arvuks oli 188 (joonis 3, lisa 1).



Joonis 3. Planeeritud ja saadud setteproovid Tarestela lahest. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

Töövahendina kasutati Van Veen tüüpi haardkoppa (lisa 2 joonis 1), mis visati koos raskusega merepõhja. Haardkopaga on proove võimalik võtta vaid pudedatest põhjasetetest ehk kivisemale või kõvemale pinnale jõudes oli kopp enamasti tühi – sellisel juhul tehti vähemalt kolm katset proovi saamiseks, et vältida juhuslikkust. Käesolevas töös kasutatud haardkopaga

kogutud setteproov annab ülevaate setetest, mis asuvad vahetult vee ja sette piirpinnal. Sõltuvalt sette tüübist kajastab proov kõige ülemisi, umbes 1 kuni 5 cm paksuseid settekihte.

Kogutud setted pandi märgistatud proovikottidesse ning igas punktis dokumenteeriti ka täpne asukoht, sügavus (paadi sonari järgi, mis hiljem taandati Euroopa kõrgussüsteemi ehk Amsterdami nullile) ning muud märkused (näiteks molluskite olemasolu proovis). Lisaks kasutati osades proovipunktides allveedrooni Chasing M2 (lisa 2 joonis 2), et filmida ning pildistada merepõhja.

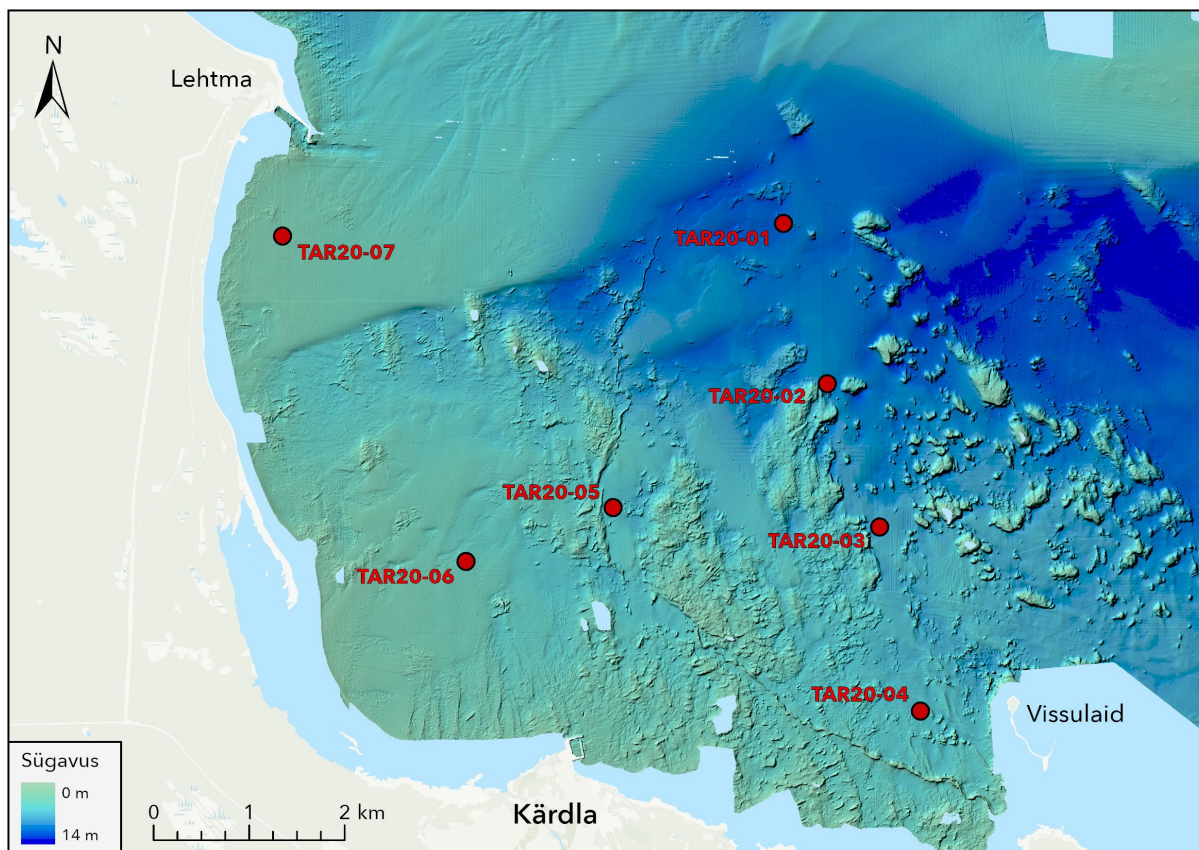
Välitöödel käidi kahekesi või kolmekesi – Riko Noormets juhtis paati ja koos Martin Liiraga tegeles haardkopaga, töö autor vastutas setteproovide pakkimise ning dokumenteerimise eest ning aitas aeg-ajalt samuti kopaga. Allveedrooni opereeris Riko Noormets.

2.1.1. Sekundaarandmed

Uurimisala pinnavormide, hüdrodünaamiliste protsesside ning ilmastiku analüüsi alusena kasutati eelnevate uuringute käigus kogutud andmeid.

Merepõhja sügavused on kaardistatud Transpordiameti hüdrograafia osakonna poolt lehviksonariga (Transpordiamet, 2023). 2023. aasta seisuga sügavusandmed on koondatud 2 m võrgusilmaga isomeetriliseks sügavusmudeliks EST97 koordinaatsüsteemis ning salvestatud GeoTIFF-failina. Sügavused on antud Euroopa kõrgussüsteemis ehk Amsterdami nulli suhtes.

Hüdrodünaamika andmed koguti 2020–2021 Riko Noormetsa poolt instrumendiga Marotte HS (lisa 2 joonis 3), mis merepõhja kinnitatuna mõõdab 1 Hz sagedusega instrumendi kaldenurka ja suunda (sõltuvad veevoolust, .txt faili) (Noormets, 2021). Tareste lahes tehti mõõtmisi paralleelselt seitsmes erinevas asukohas (joonis 4, lisa 3) perioodil 21.08.2020–26.06.2021 ning saadud andmeid ei ole varem analüüsitud ega avaldatud.



Joonis 4. Noormets (2021) hüdrodünaamika proovipunktid Tareste lahes. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

Ilmastiku andmetena kasutati Keskkonnaagentuuri poolt mõõdetud tuule kiirust ja suunda Heltermaa rannikujaamas (Keskkonnaagentuur, i.a). Heltermaa jaam asub Tareste lahest umbes 25 km kagu suunas ning on lähim ilmajaam, mis on sarnase ekspositsiooni ehk avatusega (maismaa jääb lääne suunda). Töös kasutati aastate 2020 ja 2021 vaatlusi, et andmed oleks ühildatavad hüdrodünaamika mõõtmistega. Kasutatud andmed on tunnise sammuga ning kättesaadavad Exceli failina.

2.2. Andmetöötlus ja -analüüs

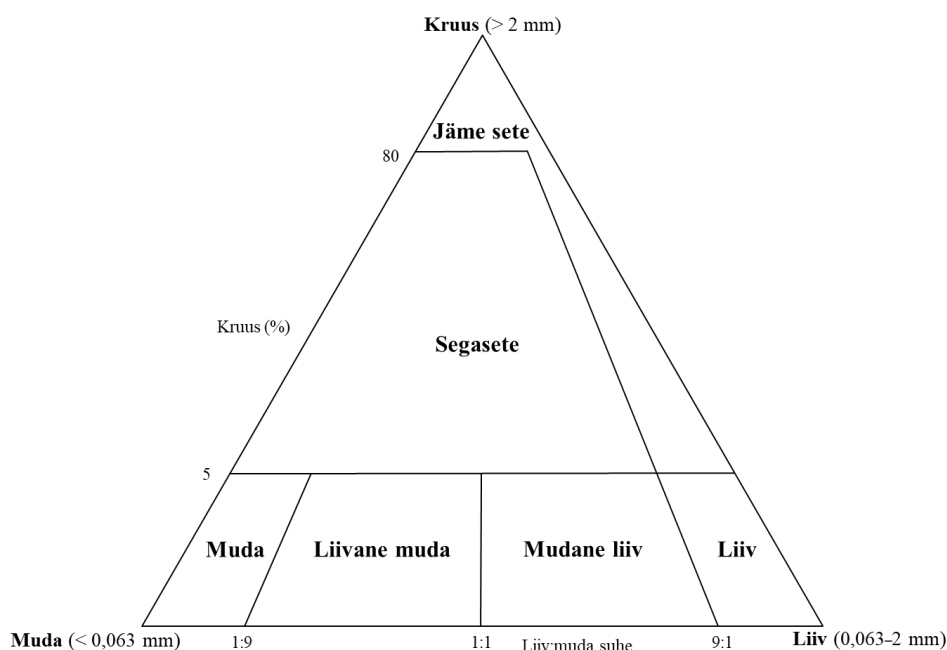
2.2.1. Põhjasetted

Kogutud põhjasetete proove analüüsiti laserdifraktomeeter Mastersizer 3000-ga Tartu Ülikooli geoloogia osakonnas. Tegemist on instrumendiga sette granulomeetrilise koostise analüüsiks, mis annab tulemuseks lõimisevahemikkude massiprotsendid proovis. Tareste liivade puhul on peamine mineraloogiline koostisosa kvarts – see on varasemalt määratud valitud proovidel röntgendifraktomeetria (XRD) meetodil (Noormets, 2021)

Laserdifraktomeeter suudab pool-automaatselt analüüsida alla 1 mm terasuurusega materjali ehk suuremad osakesed sõeluti (2 mm ja 1 mm sõeladega) kuivatatud proovidest käsitsi välja ning kaaluti. Viirsavide puhul oli vajalik teha märgsõelumine ja pärast sõelutud osad kaalumiseks eraldi kuivatada, kuna suur savisisaldus põhjustab kuivamisel klompide tekkimist. Seejärel ühildati käsitsi sõelumisel saadud massiprotsendid laserdifraktomeetri tulemustega (lisa 4).

Terviklikud andmed setete granulomeetrilise koostise kohta arvatati ja klassifitseeriti tarkvaraga GRADISTAT (Blott & Pye, 2001). GRADISTAT võimaldab lõimisevahemikkude massiprotsentidest arvutada näiteks sette keskmise terasuuruse, sümmeetrilisuse ning kruusa, liiva ja muda protsendid. Samuti ka Dx väärtuse, mis näitab terasuurust, millest x % settest on väiksema terasuurusega – nagu nt D50 ja D90.

Setete struktuuri võrdlemiseks kasutati geoloogias üldtunnustatud FOLK settetüüpide klassifikatsiooni (Folk & Ward, 1957), mis jaotab setted vastavalt nendes sisalduvatele kruusa (> 2 mm), liiva- (0,063–2 mm) ja mudaosakeste (< 0,063 mm) protsentidele (joonis 5). Analüüsis kasutati FOLK6 klassifikatsiooni, kus osad alamklassid on koondatud, et anda hea detailsusega aga jälgitav ülevaade setete jaotusest. Folk ja Ward (1957) töötasid välja ka sorteeritust iseloomustava klassifikatsiooni, mida antud töös kasutatakse. Sorteeritus kirjeldab sette terasuuruste jaotust – hästi sorteeritud settes on vaid ühetaolise suurusega osakesed, halvasti sorteeritud settes leidub erinevaid terasuurusi.



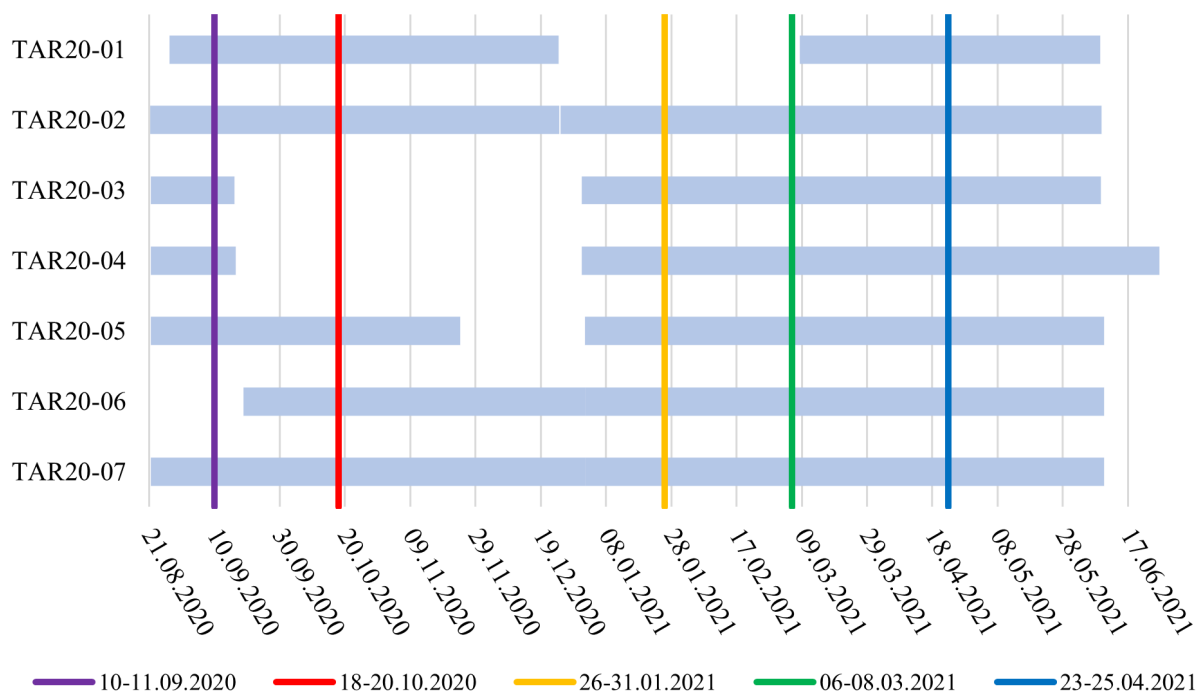
Joonis 5. Settetüüpide klassifikatsioon Folk & Ward (1957) järgi.

Ruumilised analüüsid ja kaartide koostamine tehti GIS-tarkvaraga ArcGIS Pro. Proovipunktide vahele jäänud aladel kasutati väärtuste leidmiseks IDW (ingl *Inverse Distance Weighted*; kaal ruutfunktsioon) meetodil interpoleerimist – kasutatud interpolatsioon arvutab punkti väärtuse naabruskonna punktide kaalutud keskmise väärtusena ning lähemal asuvad punktid saavad suurema kaalu. See sobis antud kontekstis hästi, kuna on vaid väike tõenäosus, et lähestikku asuvad setted erinevad üksteisest väga palju. FOLK klassifikatsioonil (Folk & Ward, 1957) põhineva põhjasettekaardi koostamiseks interpoleeriti kõigepealt eraldi kolm andmestikku (kruusa, liiva ja mudaprotsendid proovipunktides), normeeriti need omavahel (nii, et summa tuleks 100% ja vahekorrad ei muutuks) ning seejärel klassifitseeriti saadud tulemused. Samuti tehti interpoleerimine setete D50 ja D90 väärtustega, et saada ka hüdrodünaamika proovipunktides nende väärtused ning hinnata seeläbi setete liikuvust.

2.2.2. Hüdrodünaamika

Hüdrodünaamika andmete töötlemiseks kasutati tarkvara Marotte HS Config (*MarotteHSConfig*, 2016). See võimaldas instrumendi mõõdetud kaldenurga ja suuna konverteerida põhjalähedase veevoolu diagnostilisteks parameetriteks ehk kiiruseks ja suunaks (.csv faili). Enne töötlemist tuli määrata magnetiline deklinatsioon (nurk geograafilise ja magnetmeridiaani vahel, lisa 5), mõõteperiood ning andmete keskmistamisperiood.

Enne analüüsi lühendati instrumentide mõõteperioode algusest ja lõpust piisavalt, et välja jätta paigaldamisest või eemaldamisest tekkinud mõjutused. Lisaks jäeti kaalutusotsusena välja tõenäoliselt valed andmed – näiteks liiga staatilised mõõtmistulemused, mis viitasid instrumendi setetesse mattumisele või tehnilistele vigadele (näiteks patarei tühjenemisest tingitud katkestused) (lisa 6). Eraldi analüüsiti ka viie tormisema perioodi andmeid (joonis 6), et näha hüdrodünaamikat oluliste setteliikumiste ajal. Selleks valiti kahe- kuni kuuepäevased ajavahemikud, kus enamustes mõõtepunktides olid andmed olemas ning voolukiirused keskmisest suuremad.



Joonis 6. Marotte HS instrumentide usaldusväärsed mõõteperioodid (helesinisega) ning suuremad tormid. Instrumentide asukohad Tareste lahes on märgitud joonisel 4.

Kõiki saadud andmeid (usaldusväärsed mõõteperioodid ja tormid) vaadeldi kahe erineva keskmistamisastmega – 1 sekund ja 2 minutit. 1 sekundi andmed näitavad hetkelist voolukiirust ja on head analüüsiks setete mobiliseerumise lävendtingimusi, 2 minuti keskmised (u 20 laine keskmine) näitavad aga üldist setete liikumise suunda (lainetuse ebasümmeetrilisusest tulenevalt võib setete summaarne transpordivektor olla domineerivast lainetusest erinev).

Järgnev analüüs tehti andmetöötlastarkvaraga MATLAB (2025). Analüüsis kasutati Marine Geophysics Laboratory poolt väljatöötatud instrumendispetiifilisi skripte (James Cook University, 2020), mis võimaldasid koostada jooniseid vee liikumise kiiruse ja suuna ning lainespektri kohta igas proovipunktis. Lisaks kasutati Pereira (2025) koodi tuule- ja hoovuserooside tegemiseks.

Analüüsi täiendati ka hüdrodünaamika mõõtepunktides asuvate setete D90 ja D50 interpoleeritud väärtustega – antud terasuured saab läbi Hjulströmi diagrammi (Hjulström, 1935) siduda voolukiirustega, millega vastav osa settest muutub mobiilseks (lisa 7). Näiteks hoovuserooside puhul jaotati vee voolukiirused täiendavalt kolme vahemikku:

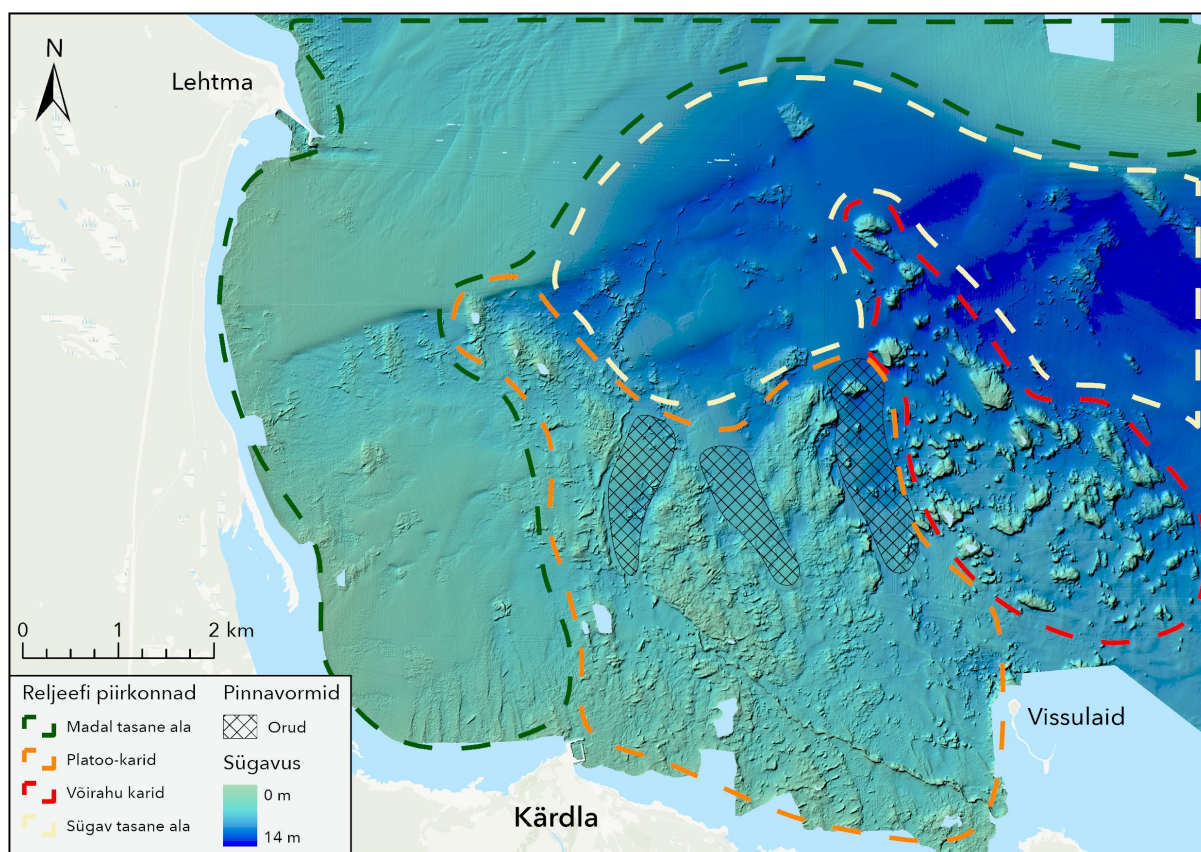
- $< 0,03$ m/s (keskmiseteralise liiva transpordi piirkiirus). Setete liikumist praktiliselt ei toimu;
- $0,03$ m/s – punktist sõltuvalt $0,18$ – $0,33$ m/s (vastavas punktis D90-le või D50-le vastav erosioonikiirus). Toimub põhjasetete osaline hõljumisse minek ja transport domineerivas voolusuunas;
- $>$ punktist sõltuvalt $0,18$ – $0,33$ m/s. Toimub praktiliselt kogu põhjasetete mobiliseerimine ja intensiivne transport domineerivas voolusuunas.

Vesiviljeluse jääkainete liikuvus ei olnud antud töö fookus ja seda statistiliselt ei analüüsitud. Viimast hinnatakse võrdlevalt arutelu peatükis.

3. Tulemused

3.1. Merepõhja reljeef

Settetüüpide leviku hindamiseks ning hüdrodünaamika tulemuste tõlgendamiseks on oluline teada merepõhja reljeefi ning pinnavorme. Tareste lahes on võimalik eristada nelja suuremat piirkonda (joonis 7).



Joonis 7. Tareste lahe merepõhja reljeef ja selle jaotumine neljaks piirkonnaks. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

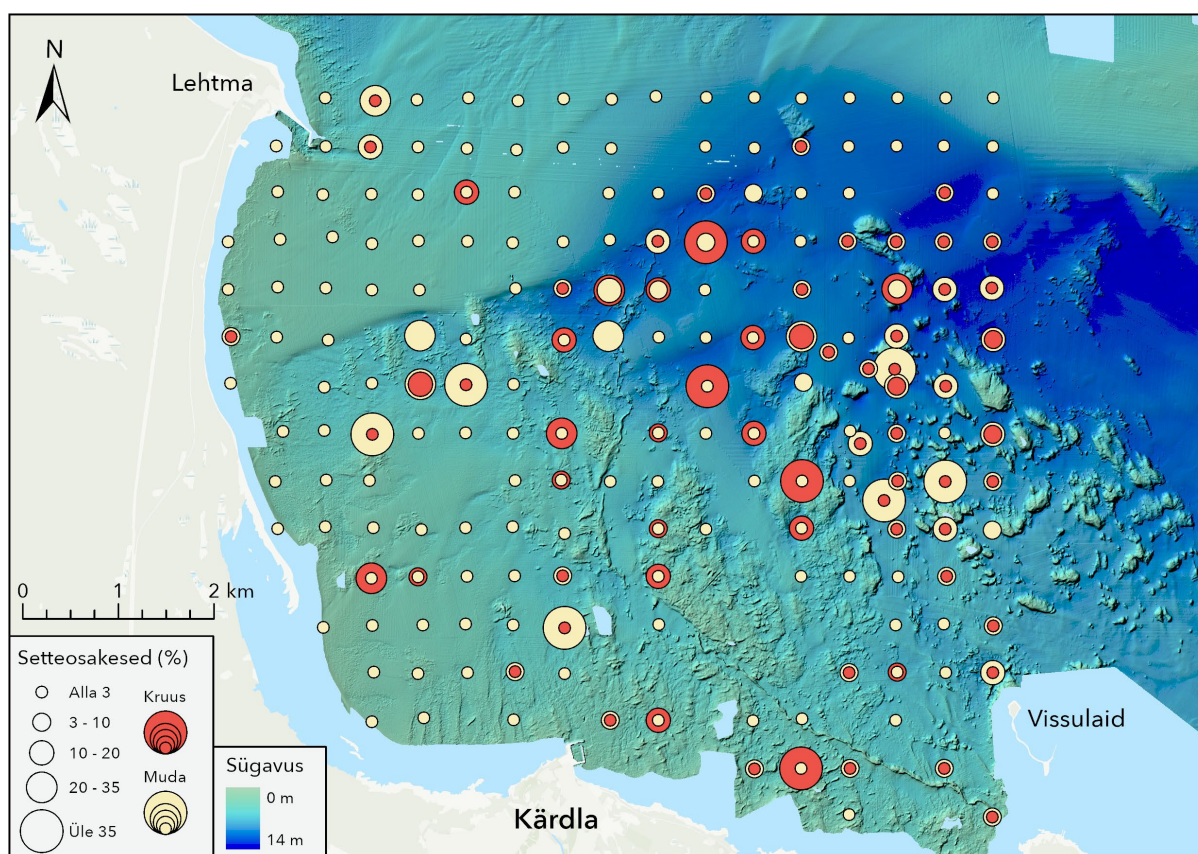
Lahe põhja- ning lääneosa on valdavalt tasased ning madalad, keskmise sügavusega 3–5 m. Lahe kesk- ja lõunaosas on merepõhi üldiselt sama madal, aga rohkem liigendatud – seal asuvad platoosarnased karid ja madalikud, mille vahelt ning ümbert jooksevad kitsad põhja-lõuna suunalised madalad orud. Lahe idaosa ehk Võirahu ümbrus on sügavam ning seal asub palju väiksemaid ning järskude nõlvadega veealuseid karisid. Eelmise kolme piirkonna vahele jääb tasase reljeefiga, aga sügav (10–12 m) piirkond. Batümeetriliselt kaardilt on võimalik tuvastada ka struktuur, mis võib viidata Kärkla meteoriidikraatri ringmurrangule.

3.2. Settetüüpide levik lahes

3.2.1. Punktandmed

Setteproovide terasuuruse põhjal arvatud statistilised näitajad erinesid proovipunktide lõikes märkimisväärselt ehk lahe põhjasetted on suhteliselt varieeruvad, kuigi lõviosa lahe põhjast on kaetud liivaste setetega. Setteproovide keskmine terasuurus varieerus 0,015 kuni 2,48 millimeetrini, mediaan oli sealjuures 0,22 mm. D50 ja D90 mediaanväärtused olid vastavalt 0,17 ja 0,38 mm.

Setete struktuuri lahes ilmestavad hästi setteproovides sisalduvate kruusa- (> 2 mm), liiva- (0,063–2 mm) ja mudaosakeste (< 0,063 mm) osakaalud. Analüüsitud proovides (188) oli kõige rohkem liivafraktsiooni, keskmiselt 91,6% sette mahust. Kruusa- ja mudafraktsiooni oli vastavalt 3,2 ja 5,3%, kusjuures 113 (60,1%) setteproovis olid mõlemaid alla 3%. Seega kui liivafraktsioon analüüsist välja jätta, tulevad esile alad, kus setete struktuur erineb tavapärasest (joonis 8).



Joonis 8. Kruusa- (> 2 mm) ja mudaosakeste (< 0,063 mm) osakaalud setteproovides. Võrdsete osakaalude korral on pealpool (näha) mudafraktsiooni sümbol. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

Võrdlev analüüs näitab, et suuremaid setteosakesi esineb pigem sügavatel aladel ning väiksemaid karide vahel. Suurema mudafraktsiooni sisaldusega üksikud anomaaliad tasastel aladel ranniku ääres esinevad valdavalt lokaalsete kõrgendike kõrval. Lahes leidub ka kohti, kus nii kruusa- kui ka mudaosakesi on mõlemaid keskmisest rohkem – enamus nendest punktidest on ida-lääne suunalises orus, mille algus asub Lehtma sadamast 2 km lõuna suunas (kattub oletatava kraatri ringvalliga).

Settefraktsioonide suhted võtab kokku FOLK settetüüp (lisa 8). Tareste lahe proovipunktides (188) oli enamlevinud settetüüp liiv – seda leidis 142 (ehk 75,5%) proovis. Ka jämedat setet, mudast liiva ja segasetet leidis arvestaval määral – vastavalt 20 (10,6%), 14 (7,4%) ja 8 (4,3%) asukohas. Liivast muda (3 ehk 1,6%) ja muda (1 ehk 0,5%) lahes praktiliselt ei olnud.

Setete sorteeritus jaotus üsna ühtlaselt – 78 proovipunktis (ehk 41,5%) olid setted hästi sorteeritud (täpsemalt keskmiselt hästi), 60 (31,9%) keskmiselt ning 50 (26,6%) halvasti (täpsemalt 37 ehk 19,7% halvasti, 12 ehk 6,4% väga halvasti ja 1 ehk 0,5% ülihalvasti). Settetüüpide lõikes olid kõige paremini sorteeritud liivad (tabel 1) – nendest olid enamus keskmiselt hästi sorteeritud. Jämedad setted ning mudased liivad olid üldjuhul halvasti sorteeritud ning segasetted oodatult väga halvasti.

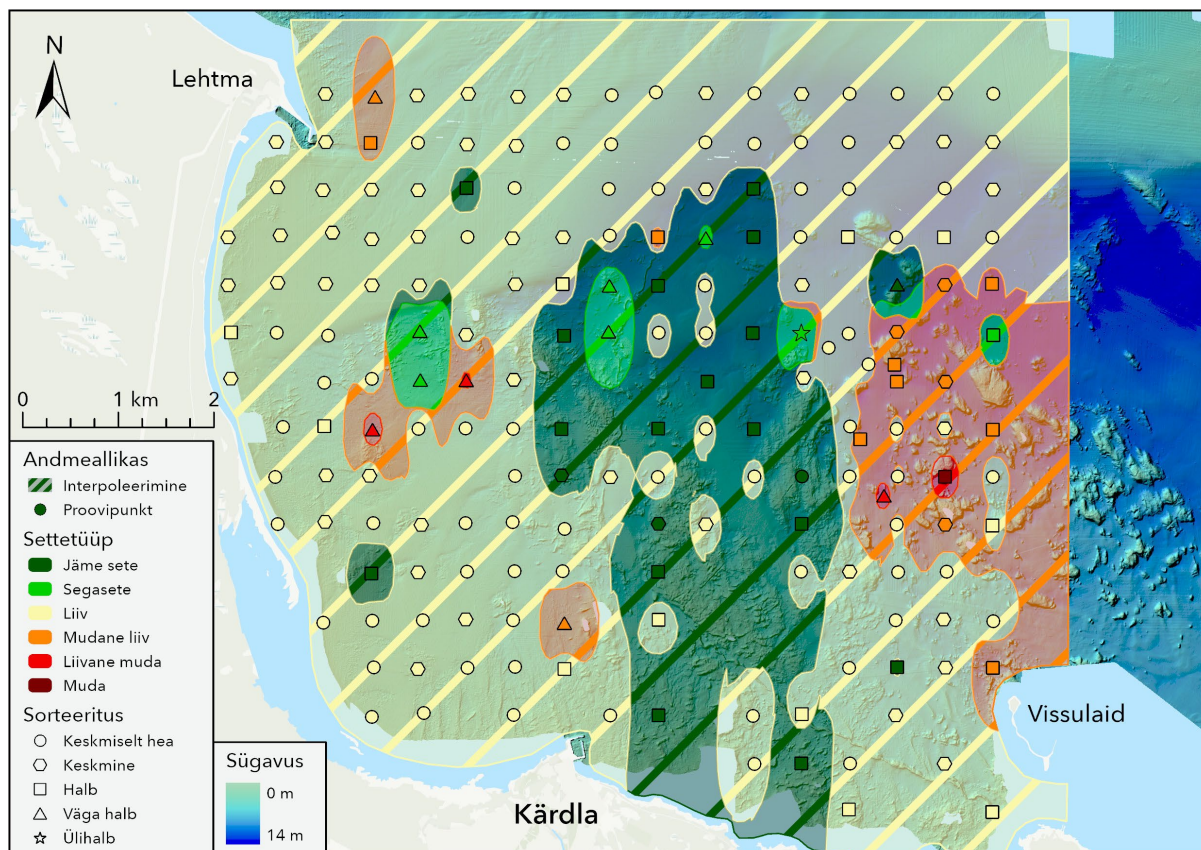
Tabel 1. Sorteerituse ja settetüüpide jaotus proovipunktides. Punane toon peegeldab väärtuste osakaalu (0–188 ehk 0–100%).

Sorteeritus / settetüüp	Keskmiselt hästi	Keskmiselt	Halvasti	Väga halvasti	Ülihalvasti	KOKKU
Jäme sete	1 (0,5%)	2 (1,1%)	16 (8,5%)	1 (0,5%)		20 (10,6%)
Segasete			1 (0,5%)	6 (3,2%)	1 (0,5%)	8 (4,3%)
Liiv	77 (41,0%)	54 (28,7%)	11 (5,9%)			142 (75,5%)
Mudane liiv		4 (2,1%)	8 (4,3%)	2 (1,1%)		14 (7,4%)
Liivane muda				3 (1,6%)		3 (1,6%)
Muda			1 (0,5%)			1 (0,5%)
KOKKU	78 (41,5%)	60 (31,9%)	37 (19,7%)	12 (6,4%)	1 (0,5%)	188 (100%)

3.2.2. Interpoleerimine

Interpoleerimisega oli võimalik hinnata settefraktsioonide väärtusi ja seeläbi settetüüpe ka proovipunktide vahele jäänud aladel (joonis 9). Selle tulemusena on samuti lahes valdavaks settetüübiks liiv, mida leidis kõige rohkem lahe lääne- ja põhjaosas madalatel ning tasastel aladel. Lisaks saab eristada kahte suurt settepiirkonda – lahe keskosas asub jämedate setete ala

ning idaosas mudase liiva ala. Jämedate setete ala piiridesse jääb keskmisest rohkem kohti, kust setteproovi ei õnnestunud saada.



Joonis 9. Tarestela lahe settetüübid ja setete sorteeritus proovipunktides. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

Võrreldes settetüüpide osakaalu proovipunktides ning interpoleeritud alal, võib näha mõningaid erinevusi (tabel 2). Interpoleerimise tulemusena said osakaalu juurde jäme sete (+9,0%) ning mudane liiv (+4,7%), märkimisväärselt kaotas osakaalu aga liiv (-10,0%).

Tabel 2. FOLK settetüüpide osakaal proovipunktides ning interpoleerimise tulemusena saadud pindaladest.

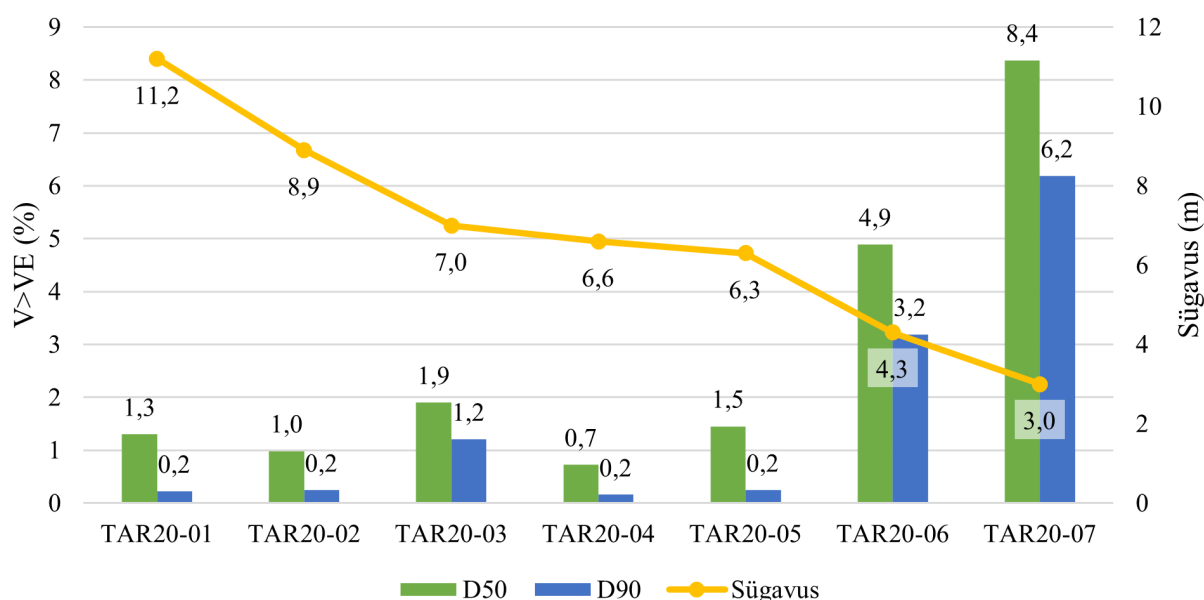
Settetüüp	Proovi-punktides (%)	Interpoleeritud alast (%)	Erinevus	Erinevus (%)
Jäme sete	10,6	19,6	+9,0	+85
Segasete	4,3	2,4	-1,9	-44
Liiv	75,5	65,5	-10,0	-13
Mudane liiv	7,4	12,2	+4,7	+63
Liivane muda	1,6	0,3	-1,3	-81
Muda	0,5	0,0	-0,5	-100

3.3. Hüdrodünaamilised protsessid ja nende mõju

3.3.1. Hetkeline veevool

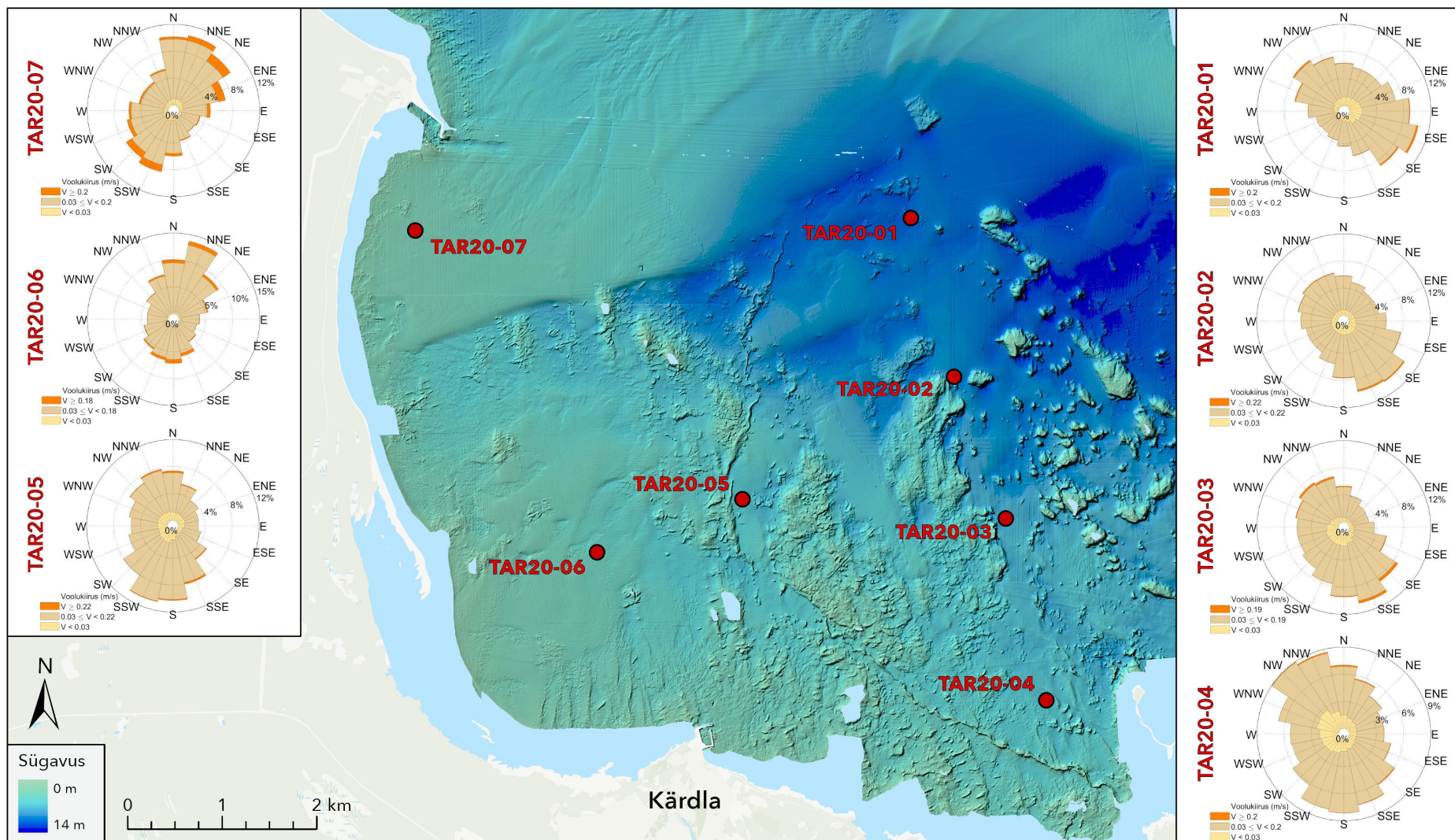
Hetkeline veevoolu suund ja kiirus on olulised eelkõige setete mobiilsuse hindamiseks ehk kui tihti on voolukiirus suurem kui vaja sette erodeerimiseks. Samas tuleb tulemuste tõlgendamisel arvestada, et andmelüngad olid punktiti erinevad ning settetransport on valdavalt kontrollitud tormide poolt – seega mõjutab näiteks 1–2 suurema tormi puudumine andmeseeriast mobiilsuse %-te isegi proportsionaalse andmesitamise korral.

Mõõtmiste tulemustest selgus, et enamustes punktides olid erosiooniks sobivad tingimused alla 2% ajast ning kogu põhjasette mobiliseerumist (D90 korral) praktiliselt ei toimugi (joonis 10). Erandiks on rannalähedased TAR20-06 ja TAR20-07 punktid, kus isegi D90 vastavaid erosioonitingimusi on vastavalt 3,2 ja 6,2% ajast.



Joonis 10. Punktides TAR20-01 kuni TAR20-07 mõõdetud sette transportiks vajalike voolukiiruste osakaal mõõteperioodist. Arvutusel on arvesse võetud andmelünki (punktiti erinevad), st tegemist on osakaaludega vastavatest usaldusväärsetest andmeperioodidest. V – vee hetkeline voolukiirus; VE – põhjasetete D50/90 erosiooniks vajalik minimaalne voolukiirus vastavas punktis.

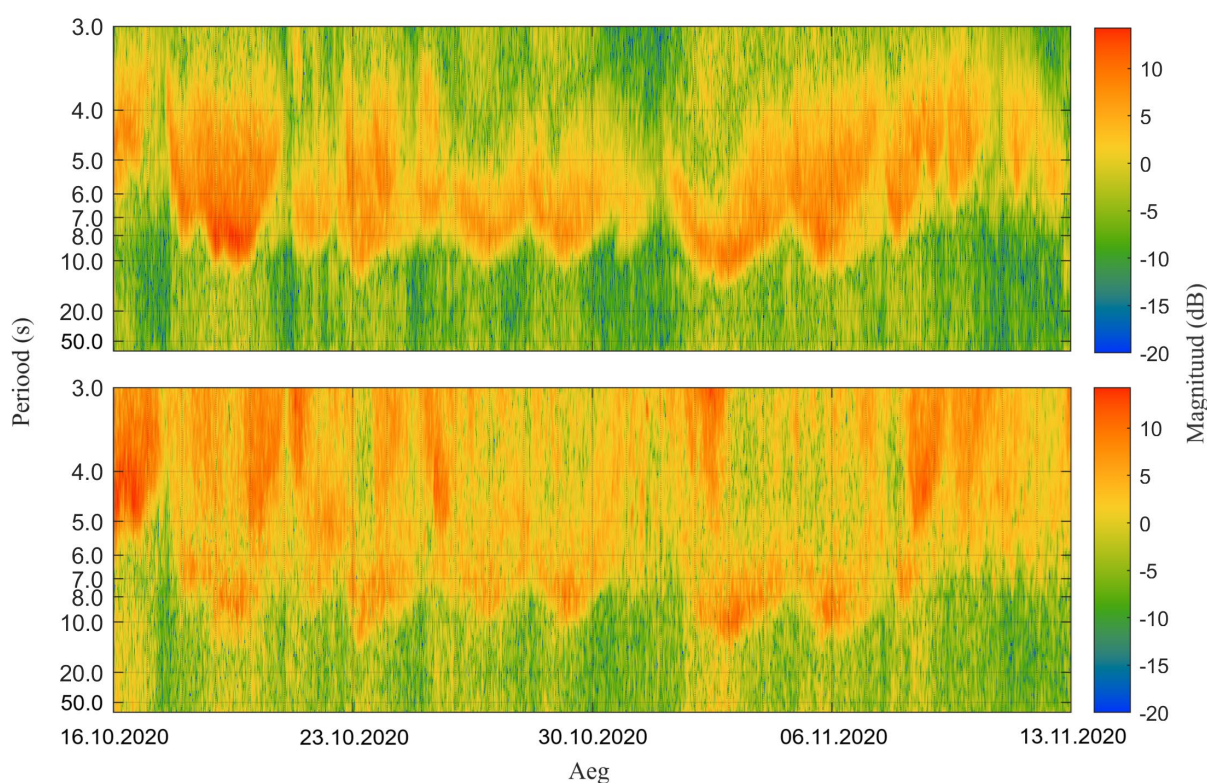
Veevoolu kiiruse ja suuna ajalise jaotuse illustreerivad kõige paremini ”tuuleroosi”-tüüpi graafikud ehk hoovuseroosid, kus värviskaala näitab kiirusvahemikke ja horisontaalteljel on näidatud suuna ajalise jaotuse % mõõteperioodist vastavates punktides (joonis 11). Vastupidiselt tuuleroosidele näidatakse hoovuste puhul suunda, kuhu vesi liigub.



Joonis 11. Hetkelise voolukiiruse ja -suuna ajaline jaotus mõõtepunktides TAR20-01 kuni TAR20-07. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

Graafikud on valdavalt kahes ligikaudu vastassuunas väljavenitatatud, mis näitab lainetuse põhjustatud edasi-tagasi voolu mõju merepõhjas. Lahe keskel (TAR20-05) on lainetus olnud domineerivalt põhja-lõuna suunaline, läänes ehk Tahkuna ranniku lähedal rohkem kirde-edela suunaline ning idas ehk mandri pool loode-kagu suunaline.

Hetkelise voolukiiruse andmete põhjal saab analüüsida ka lainespektrit ehk kuidas laineenergia jaotub erinevate lainepikkuste vahel. Tulemused näitasid, et punktiti erinevused väga suured ei ole – kõige rohkem energiat kannavad endas enamasti 3–8 s pikkused lained. Samas on märgatav, et suuremate sügavuste puhul ei mängi lühemad (alla 5 s) lained nii palju rolli kui madalamates kohtades (joonis 12).



Joonis 12. Laineenergia jaotumine lainepikkuste vahel kahe mõõtepunkti näitel 16.10–13.11.2020. Ülemine: TAR20-01 (sügavus 11,20 m); alumine: TAR20-07 (sügavus 3,00 m). Värviskaala näitab laineenergia suhtelist suurust detsibellides (vahemik -20 kuni andmestiku maksimaalne väärtus) – st mida suurem väärtus ja punasem värv, seda rohkem energiat laine endas kannab.

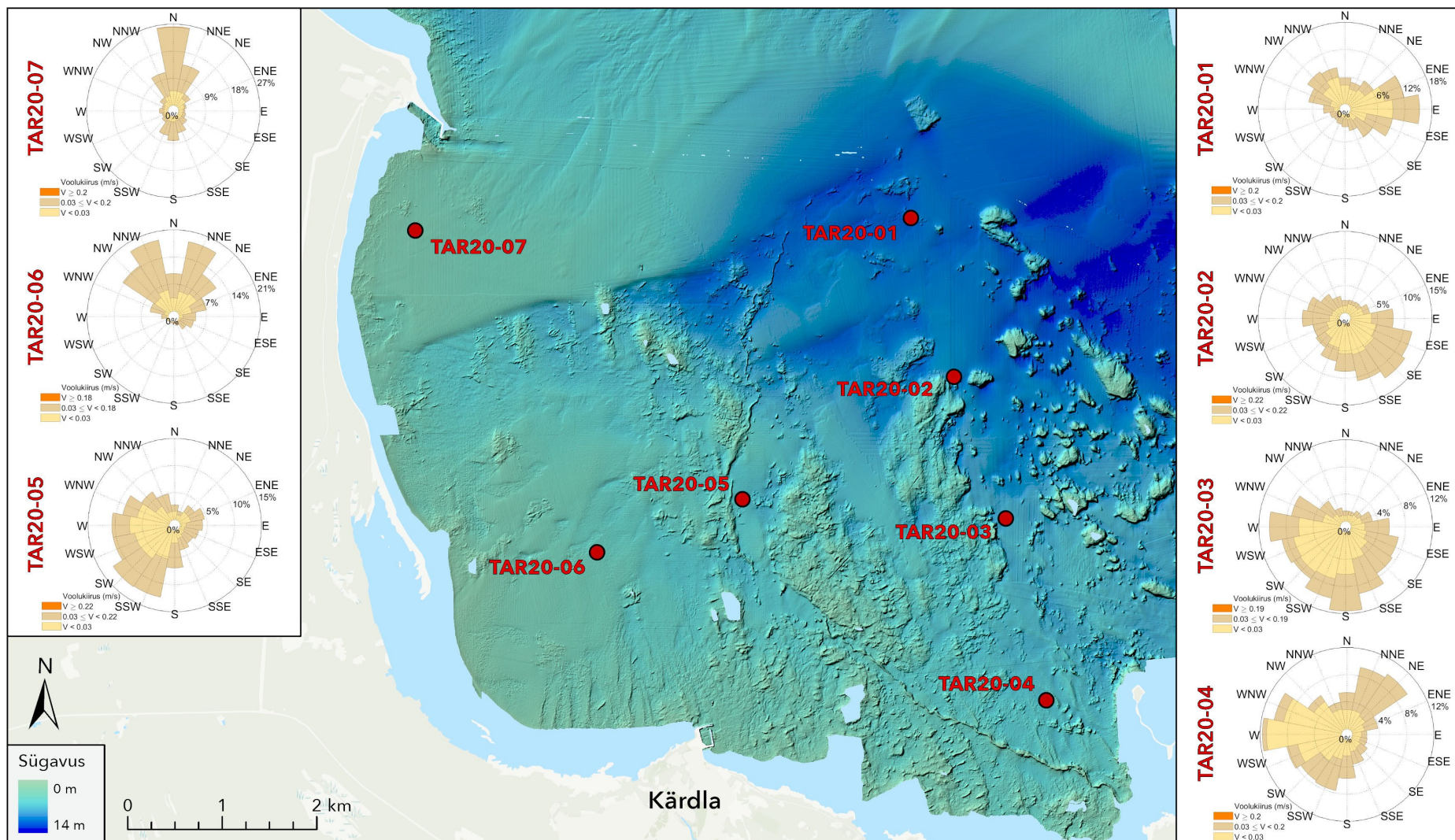
3.3.2. Domineeriv veevool ja sellega seotud settetransport

Keskmiistatud (2 min) andmed voolukiiruse ja -suuna kohta näitavad domineerivat põhjalähedast veevoolu ning iseloomustavad hästi pikemaajalist, lainetuse poolt hõljumisse paisatud settetranspordi suunda (joonis 13).

Punktides TAR20-01 ja TAR20-02 olid valdavateks vee ning setete liikumissuundadeks vastavalt ida ja kagu ehk Väinamere poole. Punktides TAR20-03, TAR20-04 ja TAR20-05 olid domineerivad voolusuunad lõuna kuni lääs – Kärkla ning lahe pära suunas. Madalas vees asuvate punktide TAR20-06 ja TAR20-07 voolusuunad olid aga hoopis põhja, näidates settevoolu liikumist rannaalalt ära või paralleelselt rannajoonega.

Enamikes punktides ei erinenud alla ja üle 0,03 m/s veevoolu suunad üksteisest märkimisväärselt. Vaid TAR20-03 näitas veidi suuremate voolukiiruste juures ka kagu- ning TAR20-04 kirdesuunalist komponenti.

On märkimisväärne, et punktid TAR20-02, TAR20-03 ja TAR20-05 asuvad varem mainitud platoo-karide põhja-lõuna suunalistes orgudes ning nende domineerivad voolusuunad langevad kokku orgude orienteeritusega antud kohtades.

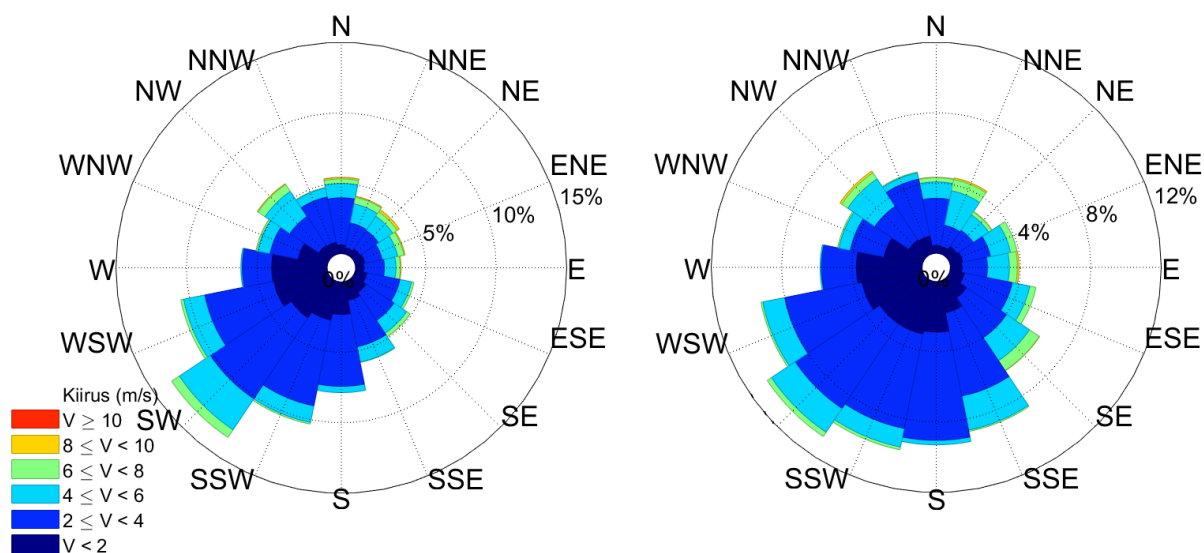


Joonis 13. 2 minuti keskmise voolukiiruse ja -suuna ajaline jaotus mõõtepunktides TAR20-01 kuni TAR20-07. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

3.3.3. Tuuleandmed ja seos hüdrodünaamikaga

Hüdrodünaamika mõõtmiste ajal domineerisid piirkonnas nõrgad (0–4 m/s) lõuna- ja läänekaare tuuled (joonis 14), mis põhjasetete transporti üldjuhul ei tekita. Suuremad tuulekiirused (> 6 m/s) olid iseloomulikud põhja- ja idakaarele ning põhjustasid eeldatavasti lõuna- ja läänesuunalist settetransporti (tuule- ja hoovuste suunad on tavapäraselt defineeritud vastupidiselt – tuule suund näitab, kust tuul puhub ja hoovuse suund, kuhu vesi voolab).

Tuuleandmete ja selle töö käigus kogutud merepõhja hüdrodünaamika andmete võrdlev analüüs näitab küllaltki head korrelatsiooni tuule ja hoovuste vahel – enamustes punktides oli valdav veevool lõunakaarde, väikeste lokaalsete erinevustega. Mõõteperioodi ning 2020–2021. aasta jooksul valitsenud tuuleandmed on omavahel sarnased.

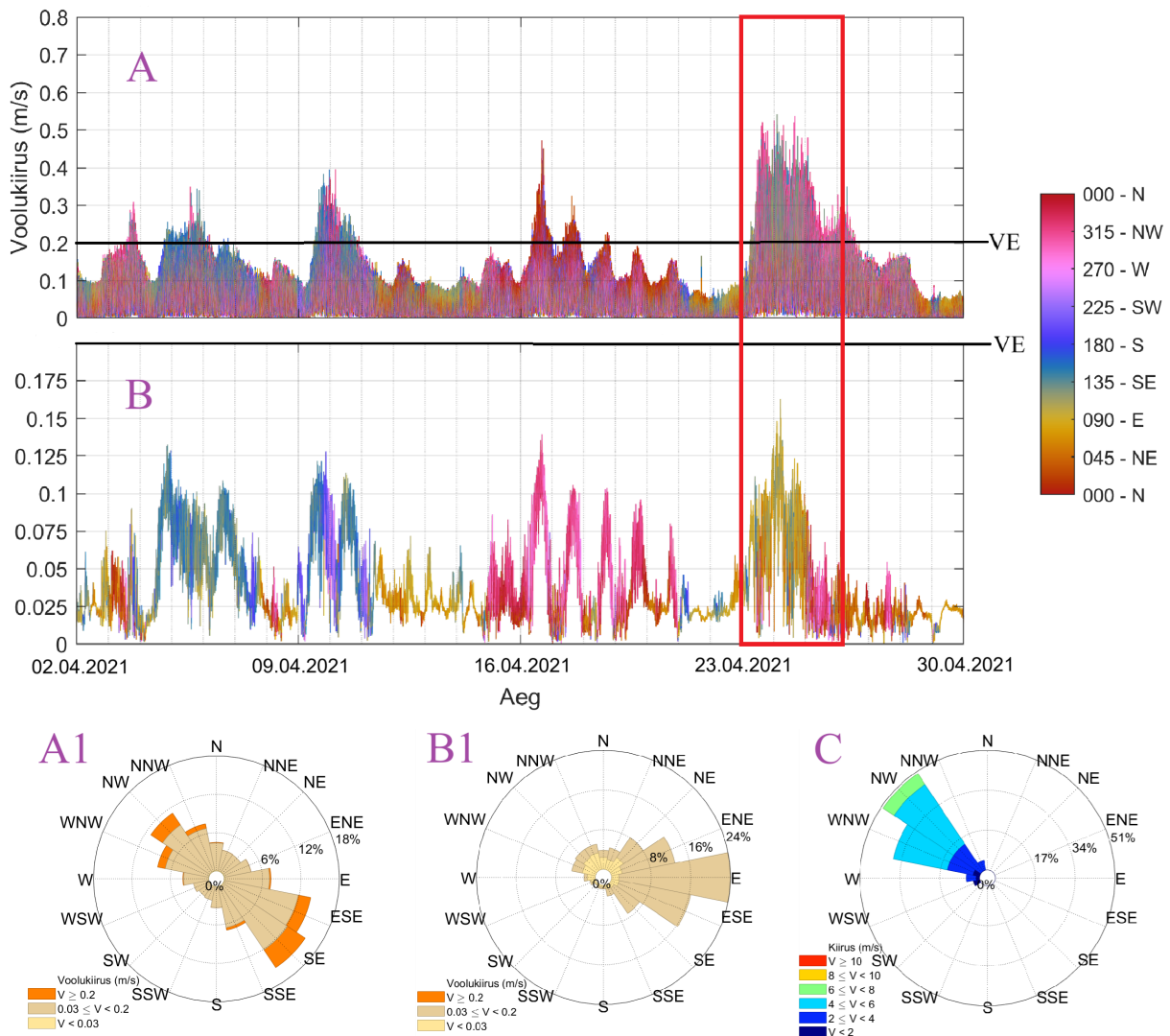


Joonis 14. Heltermaa ilmajaamas salvestatud tuule suuna ja kiiruse väärtused 1 tunnise sagedusega. Vasak: kaheaastase (2020–2021) perioodi jooksul; parem: hüdrodünaamika vaatluste jooksul 21.08.2020–26.06.2021.

3.3.4. Tormide mõju

Valdav setete liikumine toimub tormide ajal suurte tuulekiiruste juures, seega on oluline neid eraldi analüüsida. Enamus valitud tormidest olid lääne- kuni põhjatormid, kusjuures kõige rohkem mõjutasid setete liikumist põhjakaare tuuled. Vaatleme lähemalt aprillitormi (23.–25.04.2021, joonis 15) – selle kohta on olemas andmed kõigis proovipunktides ning lisaks puhus väga stabiilselt tugev loodetuul. Kuna analüüsiks valitud tormid mõjutasid lahes vee

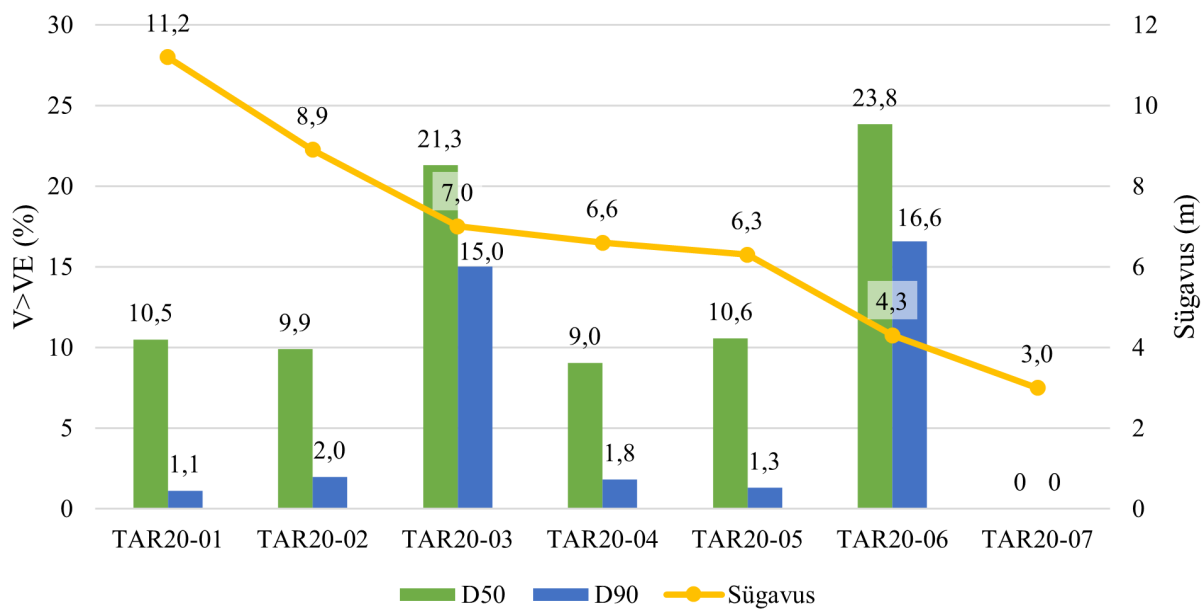
liikumist sarnaselt, saab aprillitormi andmeid üldistada enamustele (selle suunalistele) tormidele.



Joonis 15. Mõõduka tuulega perioodil (23.–25.04.2021) salvestatud põhjalähedase vee voolukiiruse ja -suuna näidis (TAR20-01). A: 1 Hz sagedusega salvestatud voolukiirus ja -suund; B: 2 minuti keskmine voolukiirus ja -suund; A1: voolukiiruse ja -suuna ajaline jaotus perioodil 23–25.04.2021 (paneelil A ja B punase joonega tähistatud periood); B1: 2 minuti keskmise voolukiiruse ja -suuna ajaline jaotus samal perioodil; C: Heltermaa ilmajaamas mõõdetud tuulekiiruse ja -suuna ajaline jaotus samal perioodil. VE jooned märgivad erosioonikiirust, mis valiti vastavalt lõimise D50 diameetrile igas punktis.

Enamikes punktides olid aprillitormi ajal veevoolu kiirused ja seega ka erosiooniks sobivad tingimused kordades suuremad kui keskmiselt terve mõõteperioodi jooksul. D50-le vastavat voolukiirust ületati punktides TAR20-01 kuni TAR20-07 keskmiselt 12,2% ajast, D90-le vastavat üle 5,4% ajast (joonis 16). Üks ilmselge kõrvalekalle on punkt TAR20-07 (erosioon

0% ajast), eriti kui arvestada, et tervet mõõteperioodi vaadates toimus just seal kõige intensiivsem põhjasetete mobiliseerumine (joonis 10). Vaadates ka teiste tormide andmeid, selgub, et punktis TAR20-07 on stabiilselt ning ebaharilikult madal erosioonimäär – keskmiselt 4,0 (D50) ja 2,8% (D90). Kõikide proovipunktide keskmine mobiilsus viie tormi löikes on 9,7 (D50) ja 4,8% (D90). Ülejäänud settepunktide väärtused aprillitormi ajal on oodatavad – veidi kõrgem erosioonitingimuste osakaal on punktides TAR20-03 ja TAR20-06, viimane neist asub madalaveelisel rannanõlval.



Joonis 16. Punktides TAR20-01 kuni TAR20-07 mõõdetud sette transpordiks vajalike voolukiiruste osakaal mõõteperioodist 23.–25.04.2021. V – vee hetkeline voolukiirus; VE – põhjasetete D50/90 erosiooniks vajalik minimaalne voolukiirus vastavas punktis.

Aprillitormi hetkelise voolukiiruse- ja suuna graafikutel on näha lainetuse tagajärjel tekkinud edasi-tagasi voolu. Hoovuseroosid on välja venitatud enamusel juhul loode-kagu suunal, mis vastab tuule suunale. Vaid TAR20-06 on rohkem põhja-lõuna suunaline ning TAR20-07 puhul on näha vaid veevoolu lõunasse.

Lainespektri analüüs kinnitas, et ka tormide ajal sõltub lainepikkus sügavusest – sügavamates punktides kandsid rohkem energiat pikemad lained (4–8 s) kui madalates rannikuvetes (3–6 s). 2 minuti keskmistatud andmed näitavad, et aprillitormi ajal domineeris praktiliselt kõikides proovipunktides ida- kuni kagusuunaline veevool. Vaid TAR20-04 ja TAR20-07 erinesid teistest veidi – esimesest liikus vee- ja settevool kirdesse ning teisest lõunasse, piki randa.

4. Arutelu

4.1. Settetüüpide levik lahes

Töö tulemusena selgus, et Tarestes lahes on pindmiste setete valdav settetüüp liiv, mida leidub eelkõige lahe läänerannikul ja põhjaosas. Lahe keskosas domineerivad see-eest jämedad setted ning idaosas Võirahu karide vahel mudased liivad. Varasemast on teada, et lahe setted koosnevad peamiselt liivafraktsioonist, kuid analüüse on tehtud vaid läänerannikul madalates vetes – seega puudus ülevaade kui mitmekesised ning erinevad setted lahe sügavamates osades tegelikult on (Noormets jt, 2019).

Lahe idaosas mudaseid liivu saab seletada vee liikumise energiaga – mudased liivad koosnevad võrreldes liivaga rohkematest saviosakestest, mis tähendab, et nende settimiseks on vaja palju aeglasemat veevoolu ja stabiilsemat keskkonda (Hjulström, 1935). Võimalik, et Võirahu veealused karid on veevooludele takistuseks ja pakuvad n-ö varju, andes väiksema terasuurustega osakestele võimaluse merepõhjale settida. Lahe idaosas leidis ka mitu proovipunkti, kust saadud sete oli tume ja roiskumishaisuga (joonis 17) – see viitab lagunevale orgaanilisele ainele. Selline nähtus on samuti tüüpiline aeglase veevahetusega (ja suure toitainete sisaldusega) kohtadele, kus hapnikupuuduse tõttu tekib lagunemisprotsessil jääkainena nt vesiniksulfiid (Zhang jt, 2023).



Joonis 17. Proovipunktis SMT23_03 (lahe idaosas, Võirahu karide vahel) saadud tume ja roiskumishaisuga sete (autori foto, 30.07.2023).

Lahe keskosa jämedate setete päritolu on keerulisem seletada – kirjanduses on see varasemalt olnud seotud voolukiirustega (Hjulström, 1935), aga käesoleva töö tulemused viitavad sõltuvusele sügavusest. Sügavamas vees levivad pikemad lained, milles on reeglina rohkem energiat setete liigutamiseks (Orviku, 2018). Lisaks võib lahe keskosas tegemist olla jääaja aegsete või järgsete pinnavormide ning setetega, mille suuremaid osakesi veevool ei ole veel suutnud minema kanda ega muude setetega täielikult katta. Siinkohal võivad abistavat rolli mängida ka vanemad pinnavormid, näiteks Kärkla meteoriidikraatri süvend – varem mainitud ida-lääne suunaline org Lehtma sadamast 2 km lõuna suunas langeb kokku eeldatava kraatri ringvalli asukohaga ning on proovide järgi ümbritsevast piirkonnast jämedamate setetega. Seal kinnitab liustikusette (moreeni) olemasolu ka Eesti Geoloogiateenistuse Tõrvanina rannikuseire käigus tehtud põhjasetete kaart, mis on tehtud seisimoakustika ja külgvaate sonari andmete põhjal (S. Suuroja jt, 2020).

Lahe liivased setted lääne- ja põhjaosas on üldjuhul hästi sorteeritud, mujal leidus aga mitmeid proovipunkte, kus nii kruusa- kui ka mudaosakesi oli mõlemad keskmisest rohkem. Selline fraktsioonide samal ajal esinemine kinnitab teooriat mitte veel tasakaalupunkti jõudnud ala kohta – piirkonnas on kas muutlikud hüdrodünaamilised tingimused või setted pärinevad erinevatest allikatest. Praegusel juhul on loogiline oletada, et tegemist on viimase variandiga ning jämedamaid jääaegseid setteid kaetakse ajapikku hilisemate pudedate setetega. Kiviste ja vastupidi liivaste alade levikut on seetõttu võimalik osaliselt seletada liiva allika ja transporditeekonna tõttu – lõviosa lahes liikuvatest setetest on pärit Tahkuna poolsaare kirderanniku vanadest luidetest ja neid transporditakse lõuna poole eelkõige piki poolsaare läänerannikut (Orviku, 2018). Lahe keskosas võib samas leiduda kohti, kuhu luiteliivad praktiliselt ei jõua ning merepõhjas on vaid moreen. Selle ülemisest kihist on enamasti väiksemad osakesed lainetuse tõttu välja pestud, aga setteproovi kogumisel Van Veen tüüpi haardkopaga võis sügavamalt saada ka algset savikat moreeni.

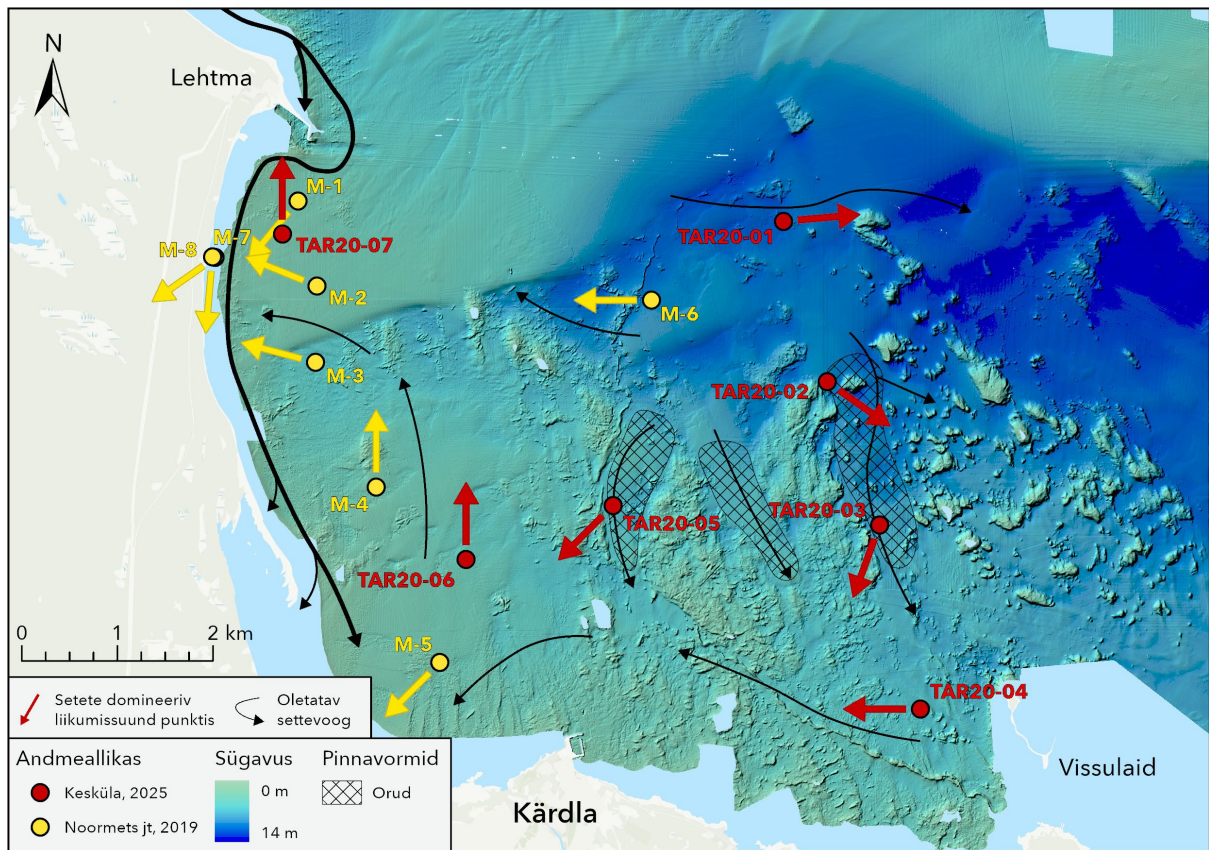
4.2. Hüdrodünaamilised protsessid ja nende mõju

Hüdrodünaamika hetkeliste voolukiiruste analüüsist tuli välja, et lahes toimub setete transport eelkõige lainetuse mõjul, kusjuures sügavamas vees ulatub lainetuse ja laine-tekkeliste voolude mõju põhja harvemini. Lained liiguvad lahe keskel põhja-lõuna suunal, servades aga aeglustavad ning murduvad sügavuse muutuste mõjul (Orviku, 2018). Lahe lainetus on omakorda põhjustatud tuultest ning arvestades mõõteperioodi ja 2020–2021. aasta

tuuleandmete sarnasust, võib eeldada, et analüüsitud merepõhja hüdrodünaamika andmed on esinduslikud ka laiemas ajaraamis.

Tulemused näitasid, et peamised setete liikumised toimuvad tõenäoliselt tormide ajal, mis on kinnitust leidnud ka muudes kohtades (nt Eelsalu jt, 2023). Keskmiselt ületab voolukiirus kõigis punktides erosioonikiirust suhteliselt väikese osa ajast, kinnitades settetranspordi perioodilisust – Männikus jt (2023) hinnangul tõid Tarestes lahes aastatel 1991–2021 vaid 23% ajast esinenud lained 70% aastasesest laineenergiast ja seega ka setete liikumisest. Analüüsitud tormide ajal tuli seos veevoolu ja tuule (suuna) vahel veel kindlamalt välja ning lahe settetranspordi mõjutasid enim põhjatuuled. Geograafilise asendi tõttu on Tarestes lahes põhja- ja idakaare tuulte korral lainete hoovõtumaa suurem ning nad kasvavad kõrgemaks – tormi mõju merepõhjale avaldubki eelkõige läbi lainekõrguse kasvu (Orviku, 2018). Ilmselt samal põhjusel olid TAR20-07 tormide aegsed erosioonimäärad teiste punktidega võrreldes ebaharilikult madalad. Analüüsitud tormid olid enamuse põhja- ja läänekaarest, antud punkt on aga vastavatest suundadest poolsaare ja sadamakai varjus. Seega mõjutavad seda kohta rohkem nõrgemad, aga teise kaare tuuled.

2 minuti keskmiste voolusuundade analüüs näitas domineerivaid veevoolu suundi ning sarnase meetodikaga läbiviidud Noormets jt (2019) uuringut kõrvutades saab anda ülevaatliku hinnangu setete liikumistele Tarestes lahes (joonis 18). Peamine setete transport toimub mööda Tahkuna poolsaare rannikut madalas vees lõuna poole – seda kinnitab lisaks uuringutele (nt Männikus jt, 2023) ka näiteks Tõrvanina maasääre kui kuhjeala olemasolu. Ülejäänud settevood kannavad endas vähem setteid ning on paika pandud proovipunktide domineerivate voolusuundade ning lahe pinnavormide järgi.



Joonis 18. Tarestela lahes mõõdetud voolukiiruse põhjal leitud setete liikumise domineerivad suunad käesoleva töö ja Noormets jt (2019) põhjal. Hinnangulised settevoogude liikumisteed, sh Männikus jt (2023) põhjal. Aluskaart: Esri (2017), sügavusandmed: Transpordiamet (2023).

Setete liikumise domineerivaid suundi vaadates tuleb välja setete akumulatsioon lahe päras (Kärddla ja Tõrvanina vahel), mis vastab üldisele arusaamisele selliste lahtede hüdro- ja settedünaamikast (Orviku, 2018). Üldiselt liiguvad setted lõuna suunas – enamuse ranniku lähedal, aga ka lahe keskel on välja kujunenud kindlad liikumisteed. Veealused karid toimivad seal takistusena ja suunavad põhjalähedasi veevooge nende vahele kanalitesse või sunnivad üldse kõrvale keerama. Näiteks punktide TAR20-01 ning M-6 juures on seetõttu domineerivad voolusuunad vastavalt ida ja lääs. Lahe keskosa karide vahelist suunatud vee- ja settevoogu kinnitavad nii sealne tasane reljeef kui ka allveedrooniga tehtud videod ning pildid – põhjalõuna suunalistes orgudes on erinevalt ümbrusest liivane merepõhi (joonis 19). Isegi kui tegemist ei ole akumulatsioonialaga, on see transporditsoon, kus liivad liiguvad aktiivselt lõuna poole.



Joonis 19. Merepõhi punktide TAR20-02 ja TAR20-03 vahel. Vasak: karide vahel orgudes; parem: karide peal (autori fotod, 12.07.2023).

Võirahu karide vaheline ala võib aga olla lokaalne akumulatsiooniala – sealsed mudasemad settid viitavad rahulikumale settimiskeskkonnale. Enamik veevoogudest suunatakse tõenäoliselt mööda varem mainitud külgnevaid orgusid piirkonnast kõrvale, kuid osa neist pääseb siiski ka karide vahele. Seal aeglustub veevool märgatavalt ning kaasatoodud settid settivad.

Punktides TAR20-07, M-4 ja TAR20-06 on veevoolu ja setete domineerivaks liikumissuunaks põhi. See ei lähe kokku piirkonna üldise tausta ega Männikus jt (2023) tehtud setete liikumise modelleerimisega, mis näitas Lehtma sadama lähistel settevoogude suunda lõunasse. Siinkohal tuleb arvestada sellega, et mõõtmistel ning modelleerimisel on mõlemal oma plussid ja miinused. Mudeldamine saab reeglina sisendi madala lahutusvõimega mudelitest ning harvadest ja kaugetest mõõtepunktidest, kuid on võimeline nende andmete põhjal protsesse interpoleerima (suur roll valideerimisel). Mõõtmised annavad tegelikku ja vahetut infot, aga on representatiivsed vaid konkreetsele punktile ja mõjutatud kohalikust reljeefist.

Samuti võisid mõõtmised kajastada hoopis madalas rannikuvees tekkivat tagasivoolu – hoovust, mis liigub merepõhjas lainetusele vastupidises suunas, kompenseerides kalda poole suunatud veetransporti (Kullachart & Suzuki, 2022). Antud hoovus nõrgeneb sügavuse suurenedes ning käesolevas ja Noormets jt (2019) töös kasutati just põhjalähedase veeliikumise andmeid – seega võisid mõõtepunktid sattuda sügavusele, kus veesamba kihistumine oli paksuse tõttu juba eristatav ning instrumenti (ja setteid) mõjutav tagasivool veel piisavalt tugev

(Lentz jt, 2008). Sealjuures erinevused kahe mõõteperioodi (2017–2018 ja 2020–2021) vahel ei ole ebatavalised, sest tingimused võivad aastate lõikes palju erineda – nt merejää võib ühel aastal elimineerida talvetormid päris olulise perioodi jooksul.

4.3. Vesiviljeluse jääkained

Käesoleva töö fookus oli Tareste lahes leiduvad setted ja nende dünaamika. Samas annavad tulemused täiendava võimaluse hinnata lahe keskossa planeeritud vesiviljelusala (kala-, karbi- ja vetikakasvanduse) (Artes Terrae OÜ, 2018) jääkainete liikuvust ning mõjusid keskkonnale. Kuigi kaasaegsed regulatsioonid ja tehnoloogiad püüavad keskkonnamõjusid vähendada, on need siiski jätkuvalt olulised aspektid vesiviljeluse planeerimisel.

Vesiviljelusalade jääkainete transpordil on võrreldes setetega mõned erinevused, mis tulenevad osakeste füüsikalistest omadustest. Kalakasvatuse orgaanilised jäägid on tunduvalt liikuvamad kui kvartslüüv (suurem diameeter ja tunduvalt väiksem tihedus) (White jt, 2017), mistõttu jäävad nad hõljumisse kauaks ja liiguvad tormide ajal mitte ainult põhjalähedaste hoovustega, vaid ka veesamba ülemistes kihtides. See tähendab muuhulgas seda, et nende mobiilsust hinnates ei ole argument, et Tareste lahe sügavamates vetes on setete D50-le vastavaid erosioonitingimusi haruharva (alla 2% ajast).

Samas saab jääkainete liikumissuundi hinnates üldjuhul lähtuda samadest põhimõtetest nagu setete puhul – oluline on vaadata piirkonnas domineerivaid veevoolu suundi. Seega on suur tõenäosus, et jääkained kuhjuvad lahe päras või liiguvad sügavamasse vette paigutatuna (TAR20-01 ümbrus) itta avatumatesse vetesse. Eelnimetatud kaks kohta on aga looduskaitse seisukohalt väga tähtsad ja kuuluvad üleeuroopalise tähtsusega kaitsealade võrgustiku ehk Natura alade alla (Keskkonnaagentuur, 2024b, 2024c, 2024d). Olenevalt vesiviljelusala konkreetsest asukohast ning täpsematest hüdrodünaamilistest tingimustest võib leida ka mõni lokaalne akumulatsiooniala, nt Võirahu karide vahel.

Samuti tuleb vesiviljeluse planeerimisel arvestada koha taluvuspiiridega – käesoleva töö raames leitud tumedad ja haisvad setted viitavad Tareste lahe halvale keskkonnaseisundile (Zhang jt, 2023). Võirahu veealuste karide vahele on mitmes kohas tekkinud nn surnud tsoonid, kus vesi vahetub aeglaselt ning orgaanika ülekülluse tõttu on hapnik otsa saanud. Arvestades, et tegemist on setete kuhjumiseks soodsa alaga, on seal ka võimalik kalakasvatusega seotud reostuse akumulatsioon. See soodustaks omakorda hapnikuvabade tsoonide laienemist või isegi uute teket (Thomsen jt, 2020).

4.4. Metoodika sobivus ja töö edasiarenduse võimalused

Töö tulemusena saadi vastused mõlemale uurimisküsimustele – nii settetüüpide kui hüdrodünaamika kohta. Valitud metoodika tõestas ennast ja selle erinevad aspektid täiendasid üksteist. Näiteks andsid kogutud setteproovid sisendi setete liikuvuse hindamiseks (läbi D50-le ja D90-le vastavate erosioonikiiruste). Samas leidsid metoodikas ka mõned kitsaskohad, mille vältimine võimalikuks ei osutunud. Põhjalähedase veeliikumise andmeid koguti Marotte HS instrumentidega, mille töökindlus ja usaldatavus on muuhulgas seotud keskkonnatingimustega – praktiliselt kõikides punktides salvestusid periooditi ebakorrektsed andmed (mis tuli eemaldada) instrumentide osalise setete alla mattumise vms tõttu. Seetõttu võivad kogu aastat hõlmavad aegrea andmed kohati kallutatud olla, näiteks kui andmelünk sisaldas mõnda olulisemat tormi. Sellest hoolimata olid hüdrodünaamika andmed siiski piisavalt esinduslikud ning vastavuses ka varasemate teadmistega.

Lahes leiduvate settetüüpide osakaalude erinevus punktmõõtmiste ning interpoleerimise tulemusena saadud alade vahel ei olnud märkimisväärsed. Interpoleerimise meetod ning settefraktsioonide täpsed osakaalud proovipunktides mõjutasid küll settetüüpide konkreetseid piire lahe sees, kuid koguosaaludes nad nii suurt rolli ei mänginud. Peamised erinevused tekkisid hoopis interpoleeritava ala suurusest (serva-alade puhvrist) ning lahe keskosas saamata jäänud proovidest. Viimane kinnitab tehtud klassifitseerimist, kuna seal määrati settetüübiks jäme sete ning haardkopaga on kivisemal pinnal proovi saamine raskendatud. Interpoleerimine võimaldas saada alast paremat ülevaadet ning tõi muuhulgas välja setteproovid, mis asusid klasside piirimail. Näiteks üksik mudase liiva punkt ei pruugi midagi tähendada, aga kui ümbritsevates liivades on mudafraktsioon olemas, näitab see seost. Interpoleerimise tulemusena joonistati seega ka mudase liiva ala suuremaks, sest arvesse võeti nii kruusa-, liiva- kui mudaosakeste osakaale.

Tööd on võimalik tulevikus edasi arendada mitmeti – näiteks võiks hüdrodünaamika andmete põhjal proovida veevoogusid matemaatiliselt modelleerida ka terves Tarestes lahes (sarnaselt Männikus jt (2023) tööle), kuna valideerimisandmed on nüüd põhjalähedase veevoolu punktmõõtmiste näol olemas. Mudeldamine annaks üldistatavama ja kvantitatiivsema tulemuse kui empiiriline arutelu ning võimaldaks prognoosida erinevate tingimuste mõju uuritavale piirkonnale. Praeguse töö käsitluselast jäi see välja mahukuse ning keerukuse tõttu. Samuti saab kogutud andmeid kasutada potentsiaalsete vesiviljelusalade ning muude projektide keskkonnamõju hindamisel või alusena täiendavate teaduslike ja/või rakenduslike uuringute ja analüüside läbiviimisel.

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli välja selgitada, milline on Tareste lahe merepõhja pindmiste setete levik ning hüdrodünaamilised tingimused. Selleks koguti lahest 188 setteproovi ning ühildati saadud löimise tulemused salvestatud põhjalähedase veeliikumise andmetega.

Töö tulemusena saab lahe settetüüpide poolt jagada kolmeks – liivane lääne- ja põhjaosa (66% ala pindalast), jämedate setetega keskosa (20%) ning mudase liivaga idaosa (12%). Esimese ala olemasolu oli varasemast teada ja sinna transporditakse setteid eelkõige Tahkuna poolsaare kirderanniku vanadest luidetest. Lahe keskosa jämedad setted on aga suure tõenäosusega jääaegse päritoluga ning idaosa mudased liivad on tekkinud sealsete karide kaitsva varju ja rahuliku settimiskeskkonna tõttu. Viimases esineb tõenäoliselt ka lokaalseid hapnikuvaeseid piirkondi.

Hüdrodünaamika analüüs näitas, et Tareste lahes toimub setete transport eelkõige lainetuse mõjul. Kusjuures lahe keskel liiguvad lained põhja-lõuna suunal, servades aga aeglustavad ning lainefront paindub. Tulemuste järgi on erosiooniks sobivaid tingimusi enamikes punktides alla 2% ajast (seoses tormidega) ning settetranspordiks soodsad tingimused harvenevad veesügavuse suurenedes. Setete liikumise domineerivad suunad viitavad üldjuhul lõunasuunalisele transpordile ning setete akumulatsioonile lahe päras (Kärdla ja Tõrvanina vahel). Lisaks tuvastati, et lahe keskosas paiknevad kõrgendikud toimivad settetranspordile takistusena – settevood suunatakse seal kitsastesse põhja-lõuna suunalistesse orgudesse või sunnitakse liikuma itta lahest välja ja läände poolsaare poole.

Töö tulemusena saavutati püstitatud eesmärk ning saadud teadmised võimaldasid hinnata lainete, hoovuste, settevoogude ja muude inimtegevusest tekkivate jääkainete dünaamikat lahes. Edaspidi võiks kaaluda analüüsitud hüdrodünaamika andmete põhjal lahes olevaid veevooge ka matemaatiliselt modelleerida, et paremini mõista hoovuste dünaamikat ning prognoosida võimalikke muutusi keskkonnatingimustes.

Sediment distribution and hydrodynamic processes in Tarest Bay

Eliise Kesküla

Summary

Tarest Bay is a shallow coastal bay located on the northeastern shore of Hiiumaa. It is actively used by the local population and is partially under environmental protection, including areas that are part of the Natura 2000 network. Sustainable management of the bay requires well-informed, science-based decisions, however, current knowledge in this area is insufficient.

Therefore, the goal of this study was to determine the distribution of seabed sediments and the hydrodynamic conditions in Tarest Bay. These insights help in understanding the dynamics of (storm) waves, currents, sediment transport, and the movement of anthropogenic residual materials in the bay.

To achieve this, 188 sediment samples were collected and analyzed for grain size using laser diffraction and manual sieving techniques. For hydrodynamic data, near-bottom water movement measurements collected previously in 2020–2021 were used and analyzed with MATLAB data processing software. The sediment samples and hydrodynamic data were integrated using the Hjulström diagram, which links grain sizes to flow velocities at which the corresponding sediment fractions become mobile.

As a result, seabed of the bay can be divided into three zones in terms of the sediment composition: a sandy western and northern parts (66% of the bay), a central area with coarse sediments (20%), and an eastern section with muddy sand (12%). The existence of the sandy zone was previously known, with sediments mainly transported from the old dunes along the northeastern coast of the Tahkuna Peninsula. The coarse sediments in the central area are most likely deposits of glacial origin reworked by modern marine processes, whereas the muddy sands in the eastern part are due to the protective shelter provided by local islets and the resulting calmer depositional environment.

The hydrodynamic analysis showed that sediment transport in Tarest Bay is primarily driven by wave action. In the central part of the bay, waves typically move in a north-south direction, while at the edges, their movement slows and deflects outward. Conditions favorable for erosion occur less than 2% of the time (during storms), and the frequency of these conditions decreases with increasing water depth. The dominant sediment transport direction was generally toward the south, leading to accumulation at the southern end of the bay, between

Kärdla and Tõrvanina. Additionally, it was found that the central seabed elevations act as barriers to sediment transport, funneling sediment flows into narrow north-south oriented channels or deflecting them eastward out of the bay and westward toward the peninsula.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajaid Martin Liirat ja Riko Noormetsa, kes olid väga abivalmis ja kannatlikud nii välitöödel, laboris, andmete analüüsil kui lõpliku teksti kirjutamisel. Lisaks olen tänulik Riko Noormetsale hüdrodünaamika andmete kasutamise võimaldamise eest. Soovin tänada ka Sten Suuroja Eesti Geoloogiateenistusest, kes laenas välitööde tegemiseks haardkoppa ning Maarja Kruusmaad Tallinna Tehnikaülikooli biorobotika laborist, kes andis kasutada allveedrooni. Suur aitäh mu sõpradele ning pereliikmetele, kes olid alati olemas ning andsid töö teemal head nõu või lihtsalt moraalselt tuge.

Kasutatud kirjandus

- Artes Terrae OÜ. (2018). *Hiiu maakonnaga piirneva mereala planeering*. Hiiu Maavalitsus. Kasutatud 4.05.2025, <https://planeeringud.ee/plank-web/#/planning/detail/10100120>
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001). *GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments* [Tarkvara]. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Chasing-Innovation Technology. (2023). *Chasing M2*. Chasing. Kasutatud 4.05.2025, <https://www.chasing.com/en/chasing-m2.html>
- Chirosca, A.-M., & Rusu, L. (2022). Characteristics of the Wind and Wave Climate along the European Seas Focusing on the Main Maritime Routes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), artikkel nr 75. <https://doi.org/10.3390/jmse10010075>
- Eelsalu, M., Parnell, K. E., & Soomere, T. (2022). Sandy beach evolution in the low-energy microtidal Baltic Sea: Attribution of changes to hydrometeorological forcing. *Geomorphology*, 414, artikkel nr 108383. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108383>
- Eelsalu, M., Viigand, K., & Soomere, T. (2023). Quantification of longshore sediment transport and compartments in urban areas: A case study of shores of Tallinn, the Baltic Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 67, artikkel nr 103199. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103199>
- Eesti Geoloogiateenistus. (2023). *Kärdla meteoriidikraater*. Eesti Geoloogiateenistuse Geoportaal. Kasutatud 4.05.2025, <https://gis.egt.ee/portal/apps/storymaps/stories/cbbeb70523fa4e29b37bf9f42014c1cf>
- Esri. (2017). *World Topographic Map* [Baaskaart]. Kasutatud 4.05.2025, <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=7dc6cea0b1764a1f9af2e679f642f0f5>
- Folk, R. L., & Ward, W. C. (1957). Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1), 3–26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris* [Dokoritöö, Uppsala Ülikool]. Kasutatud 4.05.2025, <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-481786>
- James Cook University. (i.a). *Current Meter: Marotte HS*. Kasutatud 4.05.2025, <https://www.marinegeophysics.com.au/current-meter/>

- James Cook University. (2020). *Matlab Scripts*. Kasutatud 4.05.2025, <https://drive.google.com/drive/folders/15PDg0tuDi7dLxw9H0ZzuRQHKyYgYdOQy>
- Keskkonnaagentuur. (i.a). *Ajaloolised ilmaandmed: Heltermaa 2008-2024* [Andmestik]. Kasutatud 4.05.2025, <https://www.ilmateenistus.ee/kliima/ajaloolised-ilmaandmed/>
- Keskkonnaagentuur. (2024a). *Kärdla Röösna reoveepuhasti*. Keskkonnaportaal. Kasutatud 4.05.2025, <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/waste-water-treatment-plant/8999684>
- Keskkonnaagentuur. (2024b). *Tareste loodusala*. Keskkonnaportaal. Kasutatud 4.05.2025, <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/internationally-important-area/8953550>
- Keskkonnaagentuur. (2024c). *Väinamere linnuala*. Keskkonnaportaal. Kasutatud 4.05.2025, <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/internationally-important-area/8953167>
- Keskkonnaagentuur. (2024d). *Väinamere loodusala*. Keskkonnaportaal. Kasutatud 4.05.2025, <https://register.keskkonnaportaal.ee/register/internationally-important-area/8953629>
- Kullachart, B., & Suzuki, T. (2022). Statistical modeling of undertow on a natural beach. *Coastal Engineering Journal*, 64(4), 489–505. <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2122374>
- Lentz, S. J., Fewings, M., Howd, P., Fredericks, J., & Hathaway, K. (2008). Observations and a Model of Undertow over the Inner Continental Shelf. *Journal of Physical Oceanography*, 38(11), 2341–2357. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3986.1>
- Maa- ja Ruumiamet. (2025). Maainfo. Geoportaal. Kasutatud 4.05.2025, <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maainfo>
- MarotteHSConfig* (Versioon 3.0). (2016). [Tarkvara]. James Cook University. Kasutatud 4.05.2025, <https://www.marinegeophysics.com.au/software/>
- MATLAB* (Versioon 2019a). (2025). [Tarkvara]. The MathWorks. Kasutatud 4.05.2025, <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>
- Männikus, R., Tõnisson, H., & Eelsalu, M. (2023). *Setete liikumise modelleerimine Lehtma sadama lähistel võimalike kaadamisalade korral (3/24/13186-2)* [Avaldamata eksperthinnang]. Lainemudel OÜ; Keskkonnaameti avalik dokumendiregister.
- Noormets, R. (2021). [Avaldamata andmestik: Tareste lahe hüdrodünaamilised mõõtmised].

- Noormets, R. (2024). *Seisukohad seoses Lehtma sadama siivendamise KMH aruandega* (6-3/24/13186-6) [Avaldamata eksperthinnang: Lehtma sadamakai liivakeha suurus]. Keskkonnaameti avalik dokumendiregister.
- Noormets, R., Orviku, K., Tõnisson, H., Liira, M., Väling, P., Kirsch, K., Suuroja, S., & Prigoda, I. (2019). *Tareste Lahe põhjasetete koostis ja dünaamika: Lehtma sadama siivendamise mõju rannaerosioonile ja selle leevendamise võimalused* (6-3/21/9811) [Avaldamata eksperthinnang]. Keskkonnaameti avalik dokumendiregister.
- Orviku, K. (2018). *Rannad ja rannikud: Õpik kõrgkoolidele* (H. Tõnisson, Toim.). Tallinna Ülikooli Kirjastus.
- Pereira, D. (2025). *Wind Rose*. MATLAB Central File Exchange. Kasutatud 4.05.2025, <https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47248-wind-rose>
- Pettersson, H., Fischer, J.-G., Wilms, M., & Hagenblad, A. (2024). Wave climate in the Baltic Sea 2023. *HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheet 2024*. Kasutatud 4.05.2025, https://helcom.fi/post_type_publ/wave-climate-in-the-baltic-sea-2023/
- Rosentau, A., Bennike, O., Uścińowicz, S., & Miotk-Szpiganowicz, G. (2017). The Baltic Sea Basin. Teoses *Submerged Landscapes of the European Continental Shelf* (lk 103–133). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118927823.ch5>
- Soomere, T., & Eelsalu, M. (2014). On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast. *Renewable Energy*, 71, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.025>
- Soomere, T., & Keevallik, S. (2001). Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering*, 7(1), 35–49. <https://doi.org/10.3176/eng.2001.1.04>
- Soomere, T., Viška, M., & Eelsalu, M. (2013). Spatial variations of wave loads and closure depths along the coast of the eastern Baltic Sea. *Estonian Journal of Engineering*, 19(2), 93–109. <https://doi.org/10.3176/eng.2013.2.01>
- Soomere, T., Weisse, R., & Behrens, A. (2012). Wave climate in the Arkona Basin, the Baltic Sea. *Ocean Science*, 8(2), 287–300. <https://doi.org/10.5194/os-8-287-2012>
- Suuroja, K., Veski, A., Shtokalenko, M., Polikarpus, M., Raidla, V., & Männik, M. (2020). *Eesti geoloogiline baaskaart. Hiiumaa: Seletuskiri*. Eesti Geoloogiateenistus. Kasutatud 4.05.2025, <https://fond.egt.ee/fond/egf/9434>

- Suuroja, S., Veski, A., Liira, M., Tuuling, I., & Ausmeel, M. (2020). *2019.–2020. aasta mererannikute seire tööd*. Geoloogiafond. Kasutatud 4.05.2025, <https://fond.egt.ee/fond/egf/9445>
- Suuroja, S., & Veski, A. (2019). *2018. aasta mererannikute seire tööd*. Geoloogiafond. <https://doi.org/10.23679/1023>
- Zaitseva-Pärnaste, I., Suursaar, Ü., Kullas, T., Lapimaa, S., & Soomere, T. (2009). Seasonal and Long-term Variations of Wave Conditions in the Northern Baltic Sea. *Journal of Coastal Research*, 56(1), 277–281. Kasutatud 4.05.2025, <https://www.jstor.org/stable/25737581>
- Zhang, X., Ren, Y., Zhu, X., Pan, H., Yao, H., Wang, J., Liu, M., & He, M. (2023). Driving Factors for Black-Odor-Related Microorganisms and Potential Self-Remediation Strategies. *Sustainability*, 15(1), artikkel 521. <https://doi.org/10.3390/su15010521>
- Thomsen, E., Herbeck, L. S., & Jennerjahn, T. C. (2020). The end of resilience: Surpassed nitrogen thresholds in coastal waters led to severe seagrass loss after decades of exposure to aquaculture effluents. *Marine Environmental Research*, 160, artikkel 104986. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.104986>
- Transpordiamet. (i.a). *Nutimeri*. Kasutatud 4.05.2025, <https://gis.transpordiamet.ee/nutimeri/>
- Transpordiamet. (2023). [Andmestik: Eesti merepõhja batümeetria].
- Tuuling, I., Bauert, H., Willman, S., & Budd, G. (2011). *The Baltic Sea. Geology and geotourism highlights*. Geoguide Baltoscandia.
- UK Research and Innovation. (2025). *International Geomagnetic Reference Field (IGRF), 14th Generation Calculator*. British Geological Survey. Kasutatud 4.05.2025, https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html
- White, C. A., Nichols, P. D., Ross, D. J., & Dempster, T. (2017). Dispersal and assimilation of an aquaculture waste subsidy in a low productivity coastal environment. *Marine Pollution Bulletin*, 120(1), 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.05.042>

Lisad

Lisa 1. Setete proovipunktide asukohad

Proovipunkt	WGS 1984	
	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)
A_03	59,0701626	22,7051913
A_04	59,0699865	22,7142587
A_05	59,0701811	22,7219111
A_06	59,0704359	22,7312489
A_07	59,070246	22,7402984
A_08	59,0705147	22,7486538
A_09	59,0705656	22,7574238
A_10	59,070927	22,7654367
A_11	59,0709177	22,7746213
A_12	59,070964	22,7834544
A_13	59,0709918	22,7920622
A_14	59,0710984	22,8008051
A_15	59,0711771	22,8095391
A_16	59,071279	22,8182821
A_17	59,0713393	22,826971
B_02	59,0655666	22,6963942
B_03	59,0656453	22,7054346
B_04	59,0656546	22,7135647
B_05	59,0657426	22,7222175
B_06	59,0656778	22,7312039
B_07	59,0656314	22,7401992
B_08	59,0659372	22,7487349
B_09	59,0659511	22,7575139
B_11	59,0663033	22,7746664
B_12	59,066243	22,7835986
B_13	59,0664701	22,7921072
B_14	59,0665581	22,8007781
B_15	59,0666461	22,8095571
B_16	59,0667527	22,8181379
B_17	59,066799	22,8270791
C_02	59,0613082	22,6967908
C_03	59,0611228	22,7050651
C_04	59,061248	22,7139342
C_05	59,0612897	22,7224339
C_06	59,0615816	22,7312489
C_07	59,0616882	22,7399919
C_09	59,0617392	22,7571804
C_10	59,0618457	22,7662569
C_11	59,0618782	22,7749007
C_12	59,0620079	22,7835896

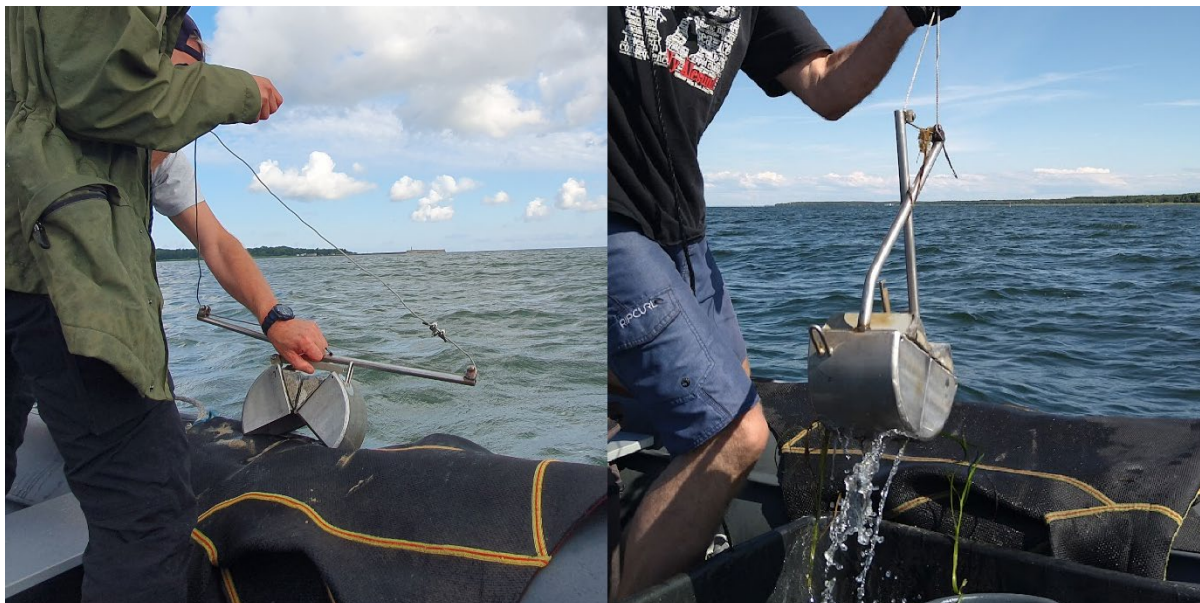
	WGS 1984	
Proovipunkt	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)
C_13	59,0620682	22,7922154
C_14	59,0621608	22,8009764
C_16	59,0623462	22,8184353
C_17	59,0623508	22,8272504
D_01	59,056521	22,6879577
D_02	59,056813	22,6974578
D_03	59,0571559	22,7069579
D_04	59,056609	22,7141416
D_05	59,0569288	22,7226141
D_06	59,0569798	22,7315554
D_07	59,0569381	22,7397846
D_08	59,0571328	22,7490053
D_09	59,0573737	22,7574779
D_10	59,0573135	22,7662929
D_11	59,0573089	22,7750539
D_12	59,057485	22,7837248
D_13	59,0575777	22,7923326
D_14	59,0576425	22,8009403
D_15	59,0576843	22,8097554
D_16	59,0577816	22,8184533
D_17	59,0578372	22,8272414
E_01	59,0520298	22,6881199
E_02	59,0523496	22,6971423
E_03	59,0523357	22,7058673
E_04	59,0522801	22,7143398
E_05	59,0523635	22,7229837
E_07	59,0526416	22,7405057
E_08	59,0527343	22,7491044
E_09	59,0526555	22,7576311
E_10	59,0527436	22,7665002
E_11	59,0528363	22,775081
E_13	59,0530634	22,7927562
E_15	59,0532534	22,8100889
E_16	59,0533044	22,8187778
E_17	59,0534852	22,8273675
F_01	59,0476075	22,688823
F_02	59,0476724	22,6971333
F_03	59,0474823	22,7064892
F_05	59,0480572	22,723236
F_06	59,0478115	22,7316906
F_08	59,0478856	22,7495461
F_09	59,0483492	22,7576221
F_10	59,0483214	22,7667526
F_11	59,0483678	22,7753784

	WGS 1984	
Proovipunkt	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)
F_12	59,0484697	22,7839141
F_13	59,0486088	22,7927652
F_14	59,0485764	22,801373
F_15	59,0488267	22,8101881
F_17	59,0486737	22,8277731
G_01	59,0432635	22,6889402
G_03	59,0430687	22,7059845
G_04	59,0435046	22,7146102
G_05	59,0434814	22,7234794
G_06	59,0435324	22,7318528
G_07	59,0436668	22,7405147
G_11	59,0438337	22,7758201
G_13	59,0443484	22,7933331
G_15	59,0441444	22,8103413
G_16	59,0442185	22,8192375
H_02	59,0388122	22,6986115
H_03	59,0389838	22,7061377
H_04	59,038738	22,7149437
H_05	59,0388911	22,7233082
H_06	59,0390302	22,7318979
H_07	59,0390719	22,7405868
H_08	59,0391275	22,7493838
H_10	59,0393408	22,766996
H_11	59,0394104	22,7756849
H_12	59,0394568	22,7844369
H_14	59,0398509	22,8019679
H_15	59,0397025	22,8104675
H_16	59,0398463	22,8191834
H_17	59,0397953	22,8279805
HMF23_01	59,0386833	22,8038667
HMF23_02	59,0334167	22,8083667
I_02	59,0341239	22,6973857
I_03	59,0343604	22,7066605
I_04	59,0344022	22,7145562
I_07	59,0346526	22,7410645
I_08	59,0347824	22,7495281
I_09	59,034699	22,7584513
I_10	59,0348103	22,7671222
I_12	59,0350004	22,7846892
I_13	59,0350978	22,7933331
I_14	59,0351859	22,802031
I_15	59,0352276	22,81081
I_16	59,0352926	22,8194268
I_17	59,0353621	22,8281427

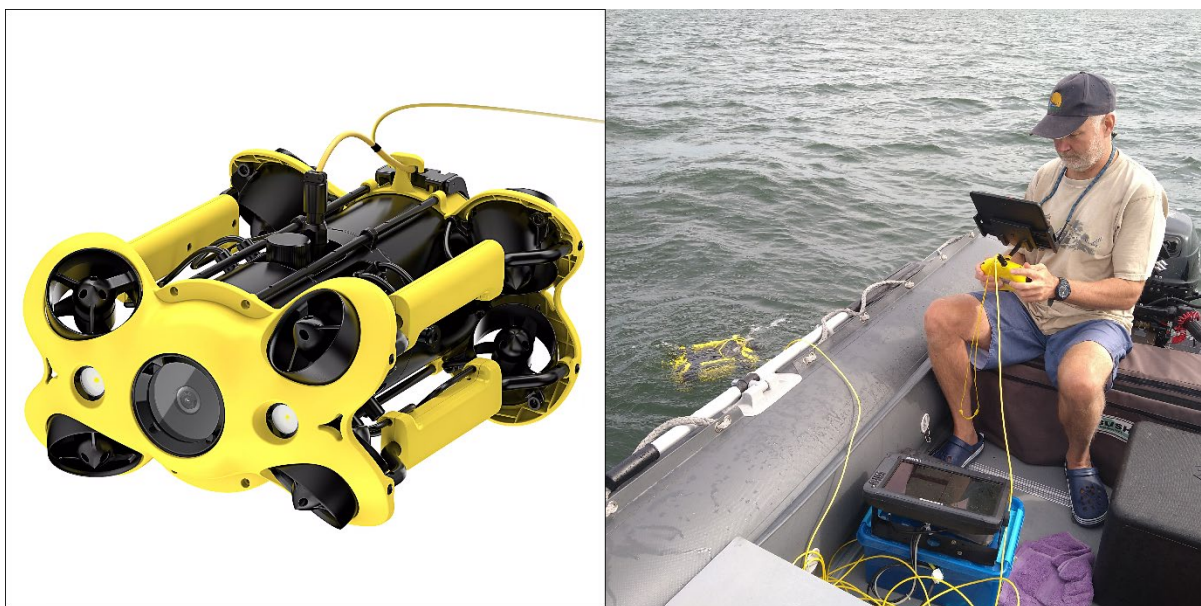
	WGS 1984	
Proovipunkt	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)
J_02	59,0296947	22,6979716
J_03	59,0299869	22,7066244
J_04	59,0299544	22,7154124
J_05	59,0298802	22,7241554
J_06	59,03014	22,7322224
J_07	59,0302837	22,740767
J_08	59,0297689	22,7502672
J_10	59,0303951	22,7673655
J_11	59,0304275	22,7760184
J_13	59,0306455	22,7934412
J_15	59,0307383	22,810792
J_16	59,0308078	22,8196251
J_17	59,0308032	22,8282238
K_04	59,0252324	22,7152322
K_05	59,0254226	22,7237408
K_06	59,025585	22,732637
K_07	59,0257056	22,7413259
K_08	59,0257844	22,7500869
K_10	59,0258958	22,7674557
K_13	59,0261509	22,7935223
K_14	59,0262344	22,8023554
K_15	59,0262808	22,8111615
K_16	59,0263782	22,8200036
L_03	59,020533	22,7066334
L_04	59,0207742	22,7155567
L_05	59,0209227	22,7248134
L_06	59,0210943	22,7325829
L_07	59,0210711	22,7412448
L_08	59,0209134	22,7505646
L_10	59,0213913	22,767717
L_15	59,021767	22,8108911
L_16	59,0219109	22,8196251
L_17	59,0218366	22,8287105
M_04	59,0164036	22,7159803
M_05	59,0163433	22,7240292
M_06	59,0165428	22,7330426
M_07	59,0167284	22,7417225
M_08	59,0166124	22,7507449
M_14	59,0171878	22,8025357
M_15	59,0173409	22,8113237
M_16	59,0173826	22,8201208
M_17	59,0174383	22,8287466
N_04	59,0117633	22,7158361
N_05	59,0122088	22,7253091

WGS 1984		
Proovipunkt	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)
N_06	59,0120835	22,7329074
N_07	59,0121856	22,7416233
N_09	59,0123387	22,7592625
N_10	59,0124222	22,7680235
N_12	59,0125243	22,78523
N_13	59,0127796	22,7941172
N_15	59,012826	22,8112066
O_12	59,0080041	22,7856266
O_13	59,0081527	22,7941713
O_14	59,0082037	22,8030314
O_16	59,0083662	22,820238
P_14	59,0038965	22,8029954
P_17	59,0039011	22,8291071
SMT23_01	59,0472333	22,7978333
SMT23_02	59,0457167	22,8051333
SMT23_03	59,0457333	22,8098667

Lisa 2. Välitöödel kasutatud instrumendid



Lisa 2 joonis 1. Van Veen haardkopp. Vasak: avatuna enne merepõhja laskmist; parem: setteid täis ja kinnisena (autori fotod, 07. ja 11.07.2023).



Lisa 2 joonis 2. Allveedroon Chasing M2. Vasak: välimus (Chasing-Innovation Technology, 2023); parem: kasutamine välitöödel (autori foto, 30.07.2023).



Lisa 2 joonis 3. Marotte HS merepõhja kinnitatuna voolukiirust ja -suunda mõõtmaks (James Cook University, i.a).

Lisa 3. Hüdrodünaamika proovipunktide asukohad

Proovipunkt	WGS 1984	
	Laiuskraad (°N)	Pikkuskraad (°E)
TAR20-01	59,0588333	22,7893167
TAR20-02	59,0438333	22,7978000
TAR20-03	59,0304667	22,8078333
TAR20-04	59,0132667	22,8158833
TAR20-05	59,0318500	22,7592167
TAR20-06	59,0265333	22,7326333
TAR20-07	59,0567500	22,6980000

Lisa 4. Setteproovide lõimisevahemikkude massiprotsendid

	Lõimisevahemikud (μm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
A_03	0,00	0,00	1,67	39,75	51,06	6,79	0,00	0,10	0,37	0,27	0,00	0,00	0,00
A_04	0,00	2,22	38,66	29,36	2,10	0,57	0,14	0,62	2,41	5,76	7,59	4,32	6,29
A_05	0,00	3,54	37,31	48,14	11,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_06	0,00	0,49	32,45	54,52	12,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_07	0,00	2,37	31,96	51,11	14,55	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_08	0,00	1,37	27,07	47,65	22,72	1,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_09	0,00	0,00	1,31	37,13	54,43	7,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_10	0,00	0,00	0,04	21,25	64,31	14,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_11	0,00	0,00	1,83	33,10	55,93	9,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_12	0,00	0,00	0,02	14,10	64,50	21,35	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_13	0,00	0,34	21,24	44,76	28,55	5,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_14	0,00	3,00	53,19	38,29	4,60	0,86	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_15	0,70	2,88	49,06	41,96	5,19	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_16	0,00	2,17	40,68	48,34	8,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A_17	1,43	2,72	50,19	42,02	3,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_02	0,00	0,00	2,48	39,58	48,98	8,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_03	0,00	0,86	0,91	28,68	56,69	12,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_04	0,12	3,73	61,19	18,93	0,03	0,36	0,51	0,96	2,12	3,27	3,48	2,10	3,18
B_05	0,00	4,02	49,43	42,34	4,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_06	0,00	0,00	27,82	58,23	13,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_07	0,00	0,00	0,92	28,01	59,66	11,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_08	0,00	0,00	0,45	26,04	62,58	10,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_09	0,00	0,00	0,08	20,10	65,57	14,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
B_11	0,00	0,00	0,00	8,46	62,77	28,12	0,14	0,00	0,18	0,33	0,00	0,00	0,00
B_12	0,00	0,00	0,00	1,62	56,85	40,79	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_13	0,00	0,00	0,00	2,72	41,09	49,93	6,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_14	0,00	0,00	0,00	3,38	57,87	38,07	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_15	0,00	0,00	0,00	12,28	53,75	32,59	1,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_16	0,00	0,00	18,54	49,68	27,33	4,22	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B_17	0,00	2,19	42,45	47,54	7,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_02	0,00	0,00	0,00	18,20	56,40	24,94	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_03	0,00	0,94	18,30	48,56	30,32	1,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_04	0,00	2,41	38,84	49,58	9,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_05	0,00	2,03	43,31	40,85	12,50	1,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_06	12,24	2,44	25,04	34,48	23,06	2,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_07	0,00	0,00	0,37	21,83	62,38	15,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_09	0,00	0,00	0,00	12,54	66,92	20,51	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_10	0,00	0,00	0,00	2,63	58,34	38,69	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_11	0,00	0,00	0,00	0,01	38,78	52,75	3,06	0,71	2,21	1,37	0,88	0,23	0,00
C_12	9,51	5,56	26,41	10,54	20,92	19,85	0,98	1,71	1,88	1,43	1,03	0,16	0,00
C_13	0,00	0,00	0,00	0,01	45,99	52,34	1,20	0,00	0,10	0,28	0,08	0,00	0,00
C_14	0,00	0,00	0,00	1,66	52,21	44,41	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_16	0,00	0,00	0,00	0,01	39,56	55,00	5,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C_17	0,00	1,18	3,12	19,05	50,22	25,72	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_01	0,00	0,00	23,14	58,29	18,49	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_02	0,00	0,00	0,14	19,66	62,12	18,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_03	0,00	0,09	7,59	41,24	45,39	5,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_04	0,00	0,02	5,15	38,33	49,87	6,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
D_05	0,00	1,02	13,16	39,84	40,65	5,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_06	0,00	0,00	0,02	16,96	68,46	14,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_07	0,00	0,02	7,48	45,90	43,17	3,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_08	0,00	0,00	0,98	26,88	58,65	13,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_09	0,00	0,00	0,00	7,77	61,29	30,67	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_10	2,90	6,05	15,66	17,15	26,62	20,93	1,86	2,44	2,63	2,04	1,44	0,28	0,00
D_11	38,48	19,32	1,44	1,15	15,65	16,28	1,11	0,71	1,56	1,81	1,72	0,71	0,06
D_12	11,61	15,99	12,59	5,41	27,28	25,68	1,27	0,00	0,08	0,10	0,00	0,00	0,00
D_13	0,00	0,00	0,00	1,30	47,83	48,64	2,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_14	0,00	8,30	0,00	0,28	33,39	51,09	3,38	0,22	1,48	1,08	0,63	0,16	0,00
D_15	0,00	0,00	0,00	0,00	36,25	60,44	3,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D_16	1,52	9,30	48,61	25,63	4,93	6,14	1,65	0,69	0,75	0,63	0,15	0,00	0,00
D_17	0,00	0,00	0,00	2,40	47,86	44,57	2,28	0,33	1,20	0,78	0,52	0,07	0,00
E_01	0,00	0,28	9,27	32,23	46,82	11,29	0,00	0,00	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00
E_02	0,00	0,09	8,34	39,38	45,91	6,15	0,00	0,00	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00
E_03	0,00	0,05	2,25	23,29	58,04	16,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E_04	0,00	0,11	4,86	27,87	53,46	13,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E_05	0,00	0,00	3,33	34,37	53,56	8,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E_07	0,00	0,00	0,87	30,01	58,07	11,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E_08	0,00	3,76	6,44	12,92	38,55	32,92	2,74	0,66	1,00	0,56	0,43	0,02	0,00
E_09	28,18	4,33	12,28	18,12	14,93	10,89	3,70	2,19	2,26	1,80	1,14	0,21	0,00
E_10	11,57	26,95	19,66	12,34	12,45	11,16	1,53	1,23	1,33	0,97	0,68	0,14	0,00
E_11	1,09	38,58	59,41	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E_13	0,00	1,38	3,83	11,01	43,54	37,13	2,21	0,00	0,29	0,55	0,05	0,00	0,00
E_15	29,15	25,74	8,51	6,91	12,06	13,70	1,82	0,52	0,81	0,47	0,31	0,02	0,00

	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
E_16	0,00	0,00	0,00	0,00	21,41	64,63	9,96	0,24	1,71	1,21	0,66	0,18	0,00
E_17	0,00	5,76	25,20	18,32	16,71	21,88	5,13	1,82	2,36	1,54	1,06	0,22	0,00
F_01	0,00	19,12	12,76	28,43	30,56	5,18	0,05	0,92	1,10	1,00	0,75	0,13	0,00
F_02	0,00	0,00	0,18	23,06	64,05	12,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_03	0,00	0,00	0,07	24,64	63,59	11,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_05	34,97	2,54	3,85	9,10	15,38	7,88	2,81	4,90	6,34	6,30	4,18	1,44	0,30
F_06	0,00	1,32	10,95	51,07	34,12	2,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_08	14,61	12,46	28,15	21,15	15,49	5,97	0,42	0,69	0,45	0,53	0,09	0,00	0,00
F_09	26,59	17,93	2,00	3,11	10,59	11,80	4,84	4,85	5,32	5,74	5,19	1,98	0,06
F_10	0,00	0,00	0,00	7,62	56,18	35,52	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_11	0,00	0,00	0,00	0,78	47,98	49,14	2,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_12	10,87	20,90	31,24	7,47	12,96	15,53	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_13	12,22	30,41	9,21	2,94	4,63	7,18	0,81	0,54	2,15	6,94	10,69	5,63	6,66
F_14	0,00	0,00	0,00	0,63	44,37	53,04	1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_15	0,00	0,08	1,60	2,08	30,30	54,30	11,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F_17	8,50	2,26	3,69	5,19	30,42	39,52	5,83	0,71	1,82	1,12	0,77	0,17	0,00
G_01	0,00	0,00	0,53	23,42	60,54	15,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G_03	0,00	0,00	0,00	9,26	59,07	31,28	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G_04	0,00	0,00	0,00	5,91	64,67	29,29	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G_05	12,46	6,91	3,30	14,13	28,24	12,03	2,16	4,64	5,91	5,87	3,56	0,77	0,00
G_06	2,41	3,65	4,98	12,74	17,15	4,63	2,30	6,30	9,17	12,93	12,67	5,60	5,46
G_07	0,00	1,51	4,23	42,55	43,07	8,58	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G_11	37,59	53,39	1,94	0,68	2,73	3,23	0,32	0,02	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00
G_13	3,37	10,63	70,60	1,81	5,09	3,96	0,11	1,08	1,39	1,13	0,73	0,10	0,00
G_15	4,44	8,78	3,81	9,83	25,31	35,00	7,84	1,00	1,94	1,02	0,84	0,18	0,00

Proovipunkt	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Osakaal proovi massist (%)													
G_16	0,00	1,62	0,00	0,00	19,47	64,66	10,61	0,30	1,72	0,96	0,52	0,14	0,00
H_02	0,00	0,00	0,00	15,78	62,42	21,71	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_03	1,66	8,90	29,06	35,62	19,72	4,83	0,05	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
H_04	16,67	7,46	130,3	393,38	929,43	523,68	189,68	310,08	732,33	1613,1	1860,5	856,85	701,81
H_05	0,00	0,00	0,00	6,63	64,88	28,41	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_06	0,00	0,00	0,00	5,31	60,42	33,81	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_07	0,00	0,00	0,00	10,40	69,15	20,43	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_08	25,58	22,07	20,59	13,25	12,23	6,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_10	7,29	22,37	6,51	5,43	37,59	20,64	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_11	0,00	0,04	0,46	7,09	55,63	36,14	0,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_12	14,30	4,20	9,09	7,27	33,83	30,05	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_14	0,00	0,00	0,00	0,00	38,98	58,96	2,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_15	0,00	0,00	0,00	0,00	26,47	68,14	5,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_16	0,00	0,00	0,01	7,35	49,34	41,15	2,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H_17	4,43	6,73	8,38	6,87	23,13	35,74	7,71	1,43	2,71	1,50	1,12	0,26	0,00
HMF23_01	0	0,05	1,64	3,22	33,27	44,6	6,17	2,33	3,29	2,48	2,22	0,73	0
HMF23_02	0,00	0,21	4,37	2,24	7,99	13,43	5,52	7,34	13,67	17,19	13,38	5,67	9,00
I_02	0,00	0,00	0,01	13,97	65,98	19,39	0,02	0,00	0,28	0,35	0,00	0,00	0,00
I_03	0,00	0,11	8,09	36,60	43,46	9,83	0,05	0,56	0,54	0,56	0,20	0,00	0,00
I_04	0,00	0,00	0,00	25,87	60,80	13,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_07	0,00	0,00	0,00	8,88	58,89	31,72	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_08	6,47	18,61	57,94	15,14	0,77	1,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_09	0,00	0,00	2,21	37,10	48,90	11,75	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_10	0,00	0,00	0,00	9,33	66,87	22,23	0,02	0,01	0,65	0,80	0,09	0,00	0,00
I_12	0,00	0,00	0,00	0,01	47,63	51,23	1,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
I_13	67,80	28,91	1,04	1,03	0,58	0,48	0,10	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
I_14	0,00	0,00	0,00	0,01	44,54	53,82	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_15	0,00	0,00	0,00	0,00	35,91	59,46	4,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	9,94	21,32	23,14	24,23	17,37	3,87	0,00
I_17	0,00	0,00	0,00	0,15	37,27	58,65	2,69	0,00	0,28	0,70	0,27	0,00	0,00
J_02	0,00	0,00	0,00	7,63	69,14	22,44	0,02	0,01	0,44	0,32	0,00	0,00	0,00
J_03	0,00	2,63	9,35	42,75	38,53	5,08	0,09	0,50	0,44	0,59	0,05	0,00	0,00
J_04	0,00	0,03	0,52	15,01	65,54	18,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J_05	0,00	0,02	0,30	12,65	61,02	25,89	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J_06	0,00	2,11	0,00	2,16	50,57	43,85	0,99	0,00	0,06	0,21	0,04	0,00	0,00
J_07	0,00	0,00	0,00	1,34	53,23	43,87	0,91	0,00	0,23	0,40	0,02	0,00	0,00
J_08	0,00	0,00	0,00	0,81	59,46	39,61	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J_10	9,75	19,47	59,14	9,85	0,57	1,19	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J_11	1,33	1,95	21,91	56,91	16,82	0,39	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J_13	15,82	24,78	22,85	6,79	15,55	12,23	0,41	0,39	0,55	0,37	0,26	0,00	0,00
J_15	0,00	0,00	0,00	0,92	47,10	47,68	1,56	0,10	1,25	0,95	0,40	0,05	0,00
J_16	0,00	0,00	0,00	0,01	32,40	55,93	5,51	0,61	2,31	1,79	1,17	0,28	0,00
J_17	4,88	0,77	0,00	0,32	29,36	56,75	6,97	0,00	0,48	0,46	0,00	0,00	0,00
K_04	20,32	2,89	0,00	8,78	54,49	13,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_05	3,10	0,00	0,00	7,29	61,25	28,26	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_06	0,00	0,00	0,00	0,61	48,54	49,90	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_07	0,00	0,00	0,00	0,05	33,11	64,32	2,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_08	0,00	0,00	0,00	0,01	28,24	67,01	4,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_10	19,98	20,70	46,97	11,59	0,04	0,57	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_13	0,00	0,00	0,00	1,00	59,57	39,26	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
K_14	0,00	0,00	0,01	8,79	53,86	36,31	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_15	0,00	0,00	0,00	0,92	46,94	50,00	2,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_16	0,00	0,00	0,00	0,01	42,09	54,35	1,70	0,00	0,58	0,97	0,29	0,01	0,00
L_03	0,00	0,00	0,00	11,89	68,34	19,76	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_04	0,00	0,00	0,00	6,37	61,61	31,80	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_05	0,00	0,00	0,00	3,90	57,87	37,81	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_06	0,00	0,03	0,49	8,06	51,94	38,38	1,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_07	0,00	0,00	0,00	0,00	35,89	61,41	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_08	5,44	25,07	426,32	523,04	2140,98	2424,56	637,6	662,01	946,54	845,12	571,87	185,93	2,82
L_10	0,00	9,43	26,60	23,34	18,82	19,50	1,93	0,00	0,17	0,20	0,00	0,00	0,00
L_15	0,00	0,00	0,00	0,27	48,63	49,57	1,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_16	0,00	2,46	1,93	4,37	45,36	42,95	2,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
L_17	0,00	0,00	0,00	2,81	43,14	49,28	4,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_04	0,00	0,00	0,00	6,02	59,07	34,53	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_05	0,00	0,00	0,06	13,59	60,40	25,83	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_06	0,00	0,00	0,00	3,28	51,25	44,19	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_07	0,00	0,00	0,00	0,00	37,00	59,12	2,12	0,01	0,75	0,82	0,18	0,00	0,00
M_08	0,93	11,53	18,35	17,11	25,78	23,87	1,89	0,00	0,41	0,14	0,00	0,00	0,00
M_14	0,00	0,00	0,00	4,50	48,82	42,95	3,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_15	5,62	21,29	28,64	20,35	13,89	9,03	1,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_16	0,00	0,00	0,01	12,63	54,05	31,62	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M_17	0,00	8,46	3,60	3,91	25,02	38,88	10,12	2,80	3,37	2,02	1,45	0,39	0,00
N_04	0,00	0,00	0,00	0,79	56,66	42,31	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N_05	0,00	0,00	0,00	0,23	58,65	40,88	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N_06	13,48	17,77	7,52	2,11	3,53	4,97	2,75	4,33	7,49	13,24	14,90	6,69	1,23

	Lõimisevahemikud (µm)												
	2000–10000	1000–2000	500–1000	250–500	125–250	63–125	32–63	16–32	8–16	4–8	2–4	1–2	0,1–1
Proovipunkt	Osakaal proovi massist (%)												
N_07	0,00	0,00	0,00	0,00	47,87	51,46	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N_09	0,00	0,00	0,00	0,01	41,00	54,76	2,20	0,05	1,01	0,79	0,19	0,01	0,00
N_10	17,48	15,11	14,49	17,40	20,69	13,87	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N_12	0,00	0,00	1,06	51,16	45,70	1,86	0,15	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N_13	0,00	6,64	0,82	18,16	47,29	25,77	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N_15	0,00	0,00	0,26	24,63	49,68	23,17	1,40	0,33	0,42	0,11	0,00	0,00	0,00
O_12	0,00	0,00	0,00	0,00	30,92	61,67	5,54	0,09	1,13	0,63	0,02	0,00	0,00
O_13	36,51	14,17	23,65	12,61	5,91	4,94	0,67	0,43	0,52	0,39	0,20	0,00	0,00
O_14	0,00	0,00	0,00	4,15	47,68	44,67	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O_16	0,00	2,19	2,13	4,98	41,04	43,97	4,31	0,12	0,81	0,37	0,08	0,00	0,00
P_14	0,00	4,02	33,69	31,73	18,57	9,58	0,87	0,41	0,59	0,49	0,07	0,00	0,00
P_17	0,00	6,93	9,77	28,97	42,76	8,24	0,07	1,07	1,01	0,79	0,38	0,00	0,00
SMT23_01	0,00	0,00	0,00	0,00	36,04	60,12	3,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SMT23_02	0,00	0,00	0,00	0,01	36,01	57,47	6,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SMT23_03	0,00	0,26	5,09	4,69	13,93	31,30	18,96	10,21	8,91	4,72	1,67	0,26	0,00

Lisa 5. Magnetilise deklinatsiooni määramine

Määramine:

- aeg: 1.01.2021 (mõõteperiood 2020 ja 2021);
- asukoht (WGS 1984): N59,0318500° E22,75921667° (TAR20-05, proovipunktidest keskmine);
- mudel: IGRF (UK Research and Innovation, 2025).

Väärtus: 8,421

Lisa 6. Hüdrodünaamika mõõteperioodid

Lisa 6 tabel 1. Marotte HS instrumentide mõõteperioodid.

Proovipunkt	Algus (A)	Lõpp (A)	Algus (B)	Lõpp (B)
TAR20-01	26.08.2020 10:45:35	24.12.2020 13:48:15	24.12.2020 13:57:23	09.06.2021 23:26:17
TAR20-02	21.08.2020 10:46:59	24.12.2020 14:54:54	24.12.2020 15:13:16	09.06.2021 23:12:56
TAR20-03	21.08.2020 11:17:33	31.12.2020 14:47:11	31.12.2020 14:55:55	09.06.2021 23:50:24
TAR20-04	21.08.2020 11:42:35	31.12.2020 13:37:25	31.12.2020 13:46:24	26.06.2021 16:09:14
TAR20-05	21.08.2020 12:05:46	01.01.2021 12:30:56	01.01.2021 12:38:51	09.06.2021 23:35:49
TAR20-06	21.08.2020 12:21:15	01.01.2021 13:18:22	01.01.2021 13:24:24	09.06.2021 23:43:43
TAR20-07	21.08.2020 12:44:41	01.01.2021 13:56:25	01.01.2021 14:01:55	09.06.2021 23:56:16

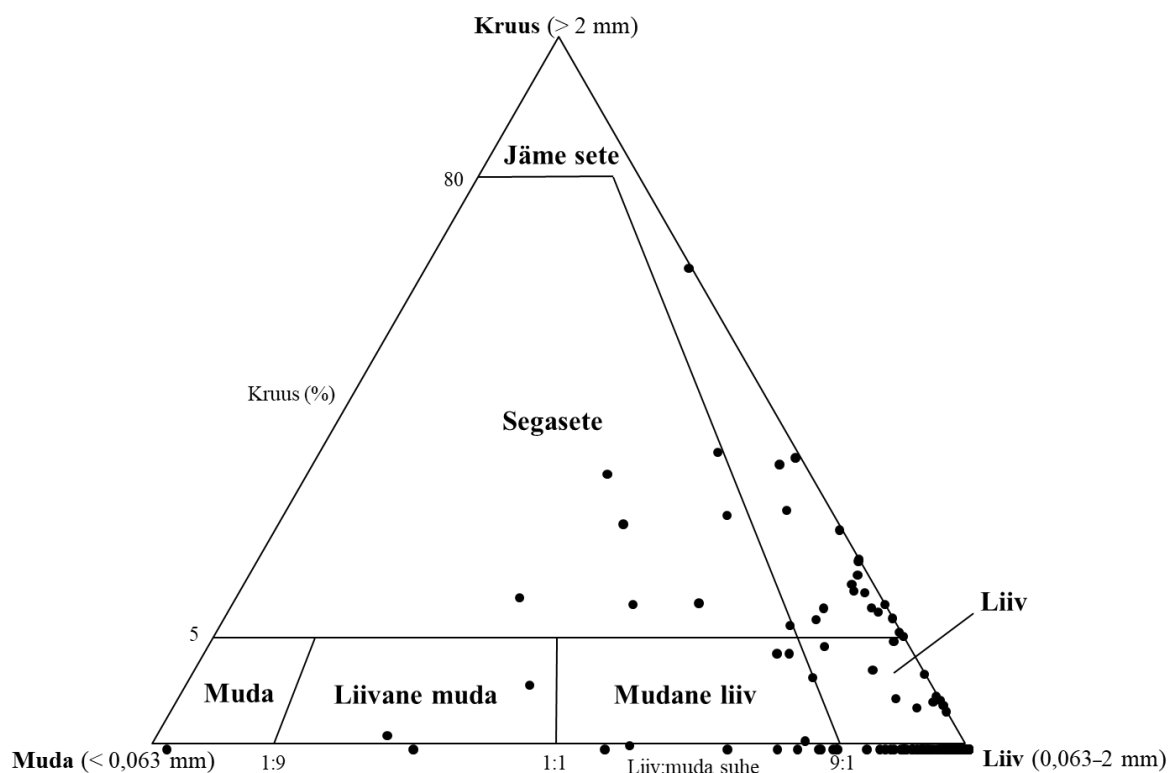
Lisa 6 tabel 2. Marotte HS instrumentide usaldusväärsed mõõteperioodid (kasutatud analüüsis). Punane toon märgib suuremaid erinevusi salvestatud ja kasutatud andmete vahel – helepunane 1 tunnist kuni päevani, tumepunane üle päeva.

Proovipunkt	Algus (A)	Lõpp (A)	Algus (B)	Lõpp (B)
TAR20-01	27.08.2020 06:20	24.12.2020 13:30	08.03.2021 09:45	08.06.2021 12:35
TAR20-02	21.08.2020 11:00	24.12.2020 14:40	25.12.2020 02:00	08.06.2021 19:50
TAR20-03	21.08.2020 11:30	16.09.2020 06:00	31.12.2020 15:20	08.06.2021 14:30
TAR20-04	21.08.2020 11:55	16.09.2020 12:00	31.12.2020 14:35	26.06.2021 12:00
TAR20-05	21.08.2020 12:20	24.11.2020 07:00	01.01.2021 13:05	09.06.2021 13:45
TAR20-06	19.09.2020 00:00	01.01.2021 13:05	01.01.2021 13:40	09.06.2021 14:00
TAR20-07	21.08.2020 13:00	01.01.2021 13:40	01.01.2021 14:15	09.06.2021 14:30

Lisa 7. Hüdrodünaamika proovipunktide setete erosioonikiirused

Proovipunkt	Sügavus (m)	D90		D50	
		Terasuurus (mm)	Erosiooni-kiirus (m/s)	Terasuurus (mm)	Erosiooni-kiirus (m/s)
TAR20-01	11,20	0,74	0,30	0,20	0,20
TAR20-02	8,91	0,71	0,30	0,32	0,22
TAR20-03	7,00	0,24	0,21	0,09	0,19
TAR20-04	6,58	0,53	0,25	0,21	0,20
TAR20-05	6,26	0,86	0,33	0,31	0,22
TAR20-06	4,34	0,22	0,20	0,13	0,18
TAR20-07	3,00	0,36	0,22	0,18	0,20

Lisa 8. Tareste lahe setteproovide jaotumine settetüüpide vahel Folk & Ward (1957) klassifikatsiooni järgi



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Eliise Kesküla,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Tareste lahe setete levik ja hüdrodünaamilised protsessid“, mille juhendajad on Martin Liira ja Riko Noormets, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Eliise Kesküla

22.05.2025