

LAINEMUDEL OÜ

Registrikood 14075763
Aadress Pärnu mnt 131b, Tallinn
Telefon +372 58 400 274
e-post lainemudel@gmail.com

Töö nr **2219**

Tellijä Lemma OÜ
Registrikood: 11453673
Objekti aadress Heltermaa sadam, Hiiumaa

HELTERMAA SADAMA KSH HÜDRODÜNAAMILINE MODELLEERIMINE

Autor:

Rain Männikus, PhD

Volitatud ehitusinsener tase 8. Sadamaehitus.

November 2023

Tallinn

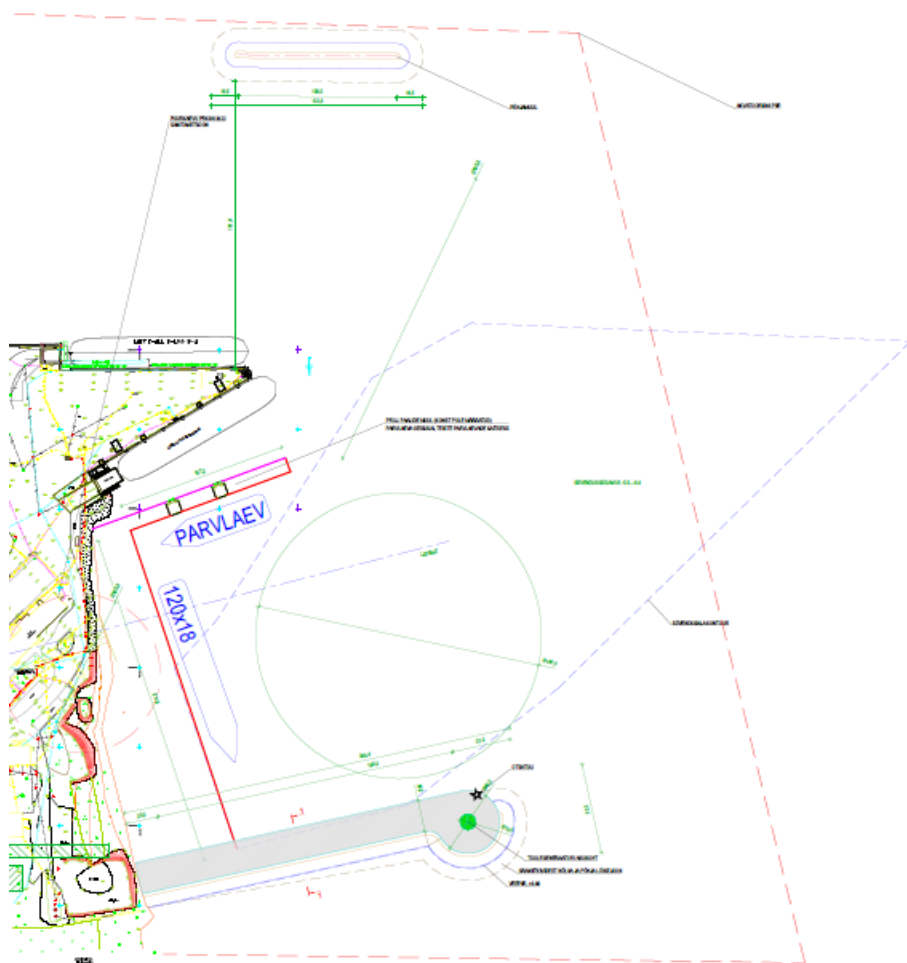
SISUKORD

1	LÄHTEÜLESANNE	3
1.1	Kavandatavad tööd Heltermaa sadamas	3
1.2	Töö eesmärk ja sisu	4
1.3	Töö alusmaterjalid	4
2	PROJEKTI ANALÜÜS	5
2.1	Mahtude hinnang.....	5
2.2	Süvendatava pinnase kirjeldus	5
2.3	Kanali analüüs ja sihimärkide võimalik varjestamine	6
2.4	Rajatiste mõju rannaprotsessidele.....	7
3	HELJUMI LIIKUMISE MODELLEERIMINE	9
3.1	Programm Delft3D.....	9
3.2	Mudelite seadistused.....	9
3.3	Heljumi levik sadama lähistel.....	11
3.4	Heljumi levik kaadamisalal	13
	KASUTATUD KIRJANDUS	20

1 LÄHTEÜLESANNE

1.1 Kavandatavad tööd Heltermaa sadamas

Aktsiaselts Saarte Liinid (edaspidi *Arendaja*) esitas 07.10.2021. a taotluse detailplaneeringu (edaspidi *DP*) algatamiseks. Heltermaa sadama detailplaneeringu koostamine ja keskkonnamõju strateegiline hindamine (edaspidi *KSH*) algatati Hiiumaa Vallavolikogu 16.12.2021. a otsusega nr 20. Joonis 1.1 esitab kaide ja muulide esialgse kavandi. Planeeringusse haaratud merealale on kavas ehitada kaubakai ja parvlaeva seisukai. Lisaks esineb ka lainemurdjate/muulide kavandamise vajadus. Kogu planeeringualale jääva mereala ulatuses toimub tahkete ainete merre paigutamine). Planeeritav kaubakai hakkab teenindama aluseid, mille veeväljasurve ületab 1350 tonni. Kaubakai rajamisel uputatakse merre tahkeid aineid mahuga üle 10 000 m³ ja tuleb teostada süvendustöid mahuga üle 10 000 m³. Uue kaubakai valmimisega Heltermaa sadama olemasolev kaubamaht lähiaastatel ei suurene ja jääb aastas 150 000 tonni piirisse.



Joonis 1.1. Kaide ja muulide esialgne eskiis.

Keskkonnamõju strateegilise hindamise eesmärk on anda tegevusloa andjale teavet kavandatava tegevuse ja selle reaalsete alternatiivsete võimalustega kaasneva olulise keskkonnamõju kohta ning kavandatavaks tegevuseks sobivaima lahendusvariandi valikuks, millega on võimalik vältida või vähendada ebasoodsat mõju keskkonnale ning edendada säästvaid arengut. Keskkonnamõju strateegilisel hindamisel tuvastatakse kavandatava tegevuse otsene ja kaudne oluline keskkonnamõju keskkonnaelementidele ning kirjeldatakse ja hinnatakse neid.

1.2 Töö eesmärk ja sisu

Eesmärk: teostada analüüsid ja hüdrodünaamiline modelleerimine Heltermaa sadamas ja kaadamiskohas, mis on vajalikud keskkonnamõju strateegiliseks hindamiseks. Täpsemalt on töö sisuks:

- Süvendamise, kaadamise ja tahkete ainete paigutamise mahtude välja selgitamine
- Süvenduspinnase iseloomu (koostis, saasteainete sisaldus) kirjeldamine olemasolevate tööde baasil. Eraldi saasteainete uuringut ei tellita.
- Heljumi leviku modelleerimine ja hindamine detailplaneeringu alal oleva uue nn kaubakai ja selle akvatooriumi rajamisel (täitematerjali kaadamisel ja merepõhja süvendamisel)
- Sadamast lõuna poole jäävate uute potentsiaalsete rajatiste mõju hindamine piirkonna veerežiimile – hoovuste liikumisele ning rannaprotsessidele
- Lõhkamistöde vajalikkuse ja mahu hindamine olemasolevate uuringute põhjal
- Heljumi modelleerimine merepõhja süvendamisel saadud pinnase kaadamisel kuni kahes erinevas asukohas. Asukohtade arutamine tellijaga ning nende eelhindamisel abistamine. Kaadamisalternatiivide leidmise konsulteerimine.
- Parima võimaliku tehnika välja selgitamise ja seire programmi koostamise abistamine
- Kanali optimaalsuse hindamine, sihimärkide võimalik varjestamine silduvate kaubalaevade poolt.

1.3 Töö alusmaterjalid

- Heltermaa sadama kinnistute detailplaneeringu lähteseisukohad ja keskkonnamõju strateegilise hindamise programm. OÜ Lemma. 09.06.2023.
- TLÜ Ökoloogia keskus ja Eesti Geoloogiateenistus. 2021. Heltermaa sadama laienduse merepõhja geofüüsikalised uuringud.
- OÜ REI Geotehnika. 2021. Töö nr 4837-21. Heltermaa sadam. Ehitusgeoloogiuuringu aruanne.

2 PROJEKTI ANALÜÜS

2.1 Mahtude hinnang

Rajatiste mahud arvutati joonisel (Joonis 1.1) näidatud pikkuste ning eelduslike ristlõigete põhjal. Kasutati programmi Delft3D moodulit, mille aluseks olid Transpordiameti ja Saarte Liinide sügavuste andmebaasid. Tabel 2.1 esitab mahud nii veepealse osa kui ka uputatud mahtude kohta. Raudbetooni osa on võrreldes muu täitega väike. Kõikide rajatiste puhul kasutatakse mineraalse täitena ilmselt purustatud paekivi. Lisaks on kasutusel graniitkivid nõlvade kindlustamiseks.

Tabel 2.1. Rajatiste mahud

	Kaubasadam koos seisukaiga	Lõunamuul	Põhjamuul
Uputatav täide, m ³	4000	22000	52000
Veepealne täide, m ³	25000	24000	2000
Kokku maht, m ³	29000	46000	54000

Kui kaubasadama kai rajatakse nii, et selle liin ehitatakse L-elementidest, mille puhul tuleb süvendada merepõhja, kuid seda materjali kasutatakse tagasitäiteks, siis on hinnanguline maht 13500 m³. Arvestatud on siin sellega, et kailiini pikkus on 215 m. Rajades sama meetodiga lõunamuuli, kus põhjapoolse liini osa pikkus oleks 210 m (ilma kaubasadamat ehitamata), siis oleks hinnanguline maht 13000 m³.

Sadamas tuleb süvendada akvatooriumi rajamiseks ning olemasoleva kanali laiendamiseks. Kui arvestada projektseks sügavuseks konservatiivselt -6,5 m (tegelik on ilmselt -6,0 või -5,5 m), siis on vajalik süvendatava pinnase maht 250 500 m³. Suurem osa sellest pinnasest (hinnanguliselt ca 90%) on plastne savi. Kogu süvendatav pinnas tuleb kaadata kaadamisalale, mis asub sadamast ca 10 km kaugusel idas.

2.2 Süvendatava pinnase kirjeldus

2021. aastal läbi viidud OÜ REI Geotehnika ja TLÜ Ökoloogia keskuse ning Eesti Geoloogiteenistuse uuringud näitasid, et tegemist on Läänemere sellele piirkonnale tüüpilise setete lasundiga. Kõige all lamab suhteliselt tasase pinnaga aluspõhi (paekivi), millele on kuhjunud väga ebaühtlase lasundina (enamasti 2–5 m tusedune) moreen, mis avaneb ka rannalähedases meres. Moreeni pinda katab omakorda Balti jääjärve viirsavi, mis oma voolava konsistentsi tõttu on ehitusgeoloogiliselt kõige ebastabiilsem pinnas. Viirsavi paksus on enamasti 2–3 m ning selle pind jälgib üsna täpselt moreeni pinda. Viimane, kõige ülemine kiht on Joldiamere-Limneamere settekompleks (savikad setted), mille tusedus on kohati üle 10 meetri ja selle pealispind langeb kokku merepõhja sügavusega. Selle savika kihi pealispind on enamasti väga lauge. OÜ REI Geotehnika on ülemist kihti kirjeldanud üliplastse savi, mis on väga kleepuv. Üldjuhul puudusid uuringualal liivakad ja kruusakad setted või esinesid liiga õhukese kihina, et seda geofüüsikaliste meetoditega tuvastada.

Nii Heltermaa kanalis kui ka sadamast lõunas mõõdistatud profiilide puhul nähti, et rannast mõnesaja meetri kaugusel hakkas nii moreeni kui ka aluspõhja pind kiirelt langema,

moodustades ulatusliku, ligi 1500 m laia ja ca 20 m sügava oru, mis on tänaseks savikate setetega täitunud. See on oluline teadmine, sest alates sellest piirist halvenevad oluliselt ehitusgeoloogilised tingimused, ent samas lihtsustuvad süvendamise tingimused.

Heltermaa sadamast põhja pool teostatud uuringute kombineerimisel varasemate geoloogiliste uuringutega selgus, et jahisadama merepoolses küljes paikneb vana mattunud org, mille sügavus suureneb põhja-kirdesuunas liikudes ning mis on täitunud pehmete savidega. Võib arvata, et savikad setted ulatuvad umbes 10 meetri sügavuseni, umbes 50–75 m tänasest jahisadamamuulist kirdes. Umbes tänase kaubasadama kai keskel paikneb aga kõrgendik, mille kõrgeim osa jääb umbes 7–8 meetrit alla merepinda. Umbes 100 m kaubasadama kaist põhjasuunas liikudes kõrgendik sisuliselt kaob ja jahisadama esine org ühineb idas oleva sügavama oruga.

OÜ REI Geotehnika leidis, et ala geoloogiline ehitus on äärmiselt muutlik, mistõttu sõltuvalt projekteeritavate kaide asukohast on kaisid võimalik ehitada nii L-elementidest kui ka sulundseina. Käesoleva töö aluseks olev eskiis näeb ette L-elementidest kaubakaid.

Valdaval osal süvendusalal levib suhteliselt kergesti kaevatav nõrk savipinnas ning väga kohev moreen. Ala lääneosas on aga tegemist raskesti kaevatavate moreenpinnastega, milledes esineb lubjakivi materjalist pankasid. Kaevandamissügavusse jääda ka kaljupinnas lubjakivi. Tuleb arvestada, et lubjakivi pealispind on äärmiselt ebaühtlane. Mere põhjas ja moreenis on ka tardkivi rahnusid.

Mõlema töö puhul ei uuritud saasteainete sisaldust, kuid OÜ REI Geotehnika vaatas üle puuraukudest saadud proovid ning visuaalselt ei olnud neis näha ka reostust. Visuaalne hinnang toetus OÜ REI Geotehnika projektijuhi Tiit Leinsalu varasemale töökogemusele Heltermaal (aastast 2008), mis pole ka pidanud vajalikuks analüüsida saasteainete sisaldust pinnases. **Seega saab olemasolevate uuringute põhjal väita, et Heltermaa sadamas süvendatav pinnas ei sisalda saasteaineid.**

Töö aluseks oleval eskiisil on rajatised paigutatud nii, et täiteala jääb alale, kus maapinnale lähemal on paas. Süvendataval alal on pehmed savid. Seega **ei ole näha ette lõhkamistöid**. L-elementide paigaldamisel on ilmselt vaja kaevata süvendid merre tugevamale pinnasele, kuid seda on tõenäoliselt võimalik teha koppekskavaatoritega. Lõhkamine oleks sellise töö puhul erakordne ja väga vähese tõenäosusega.

Kauba- ja seisukai ning lõunamuuli ehitamiseks on ilmselt kasutada koppekskavaatoreid ning alustada töödega maismaa poolt. Põhjamuuli tuleks esmalt asendada pehme savipinnas minimaalselt kokkusurutava pinnasega (näiteks purustatud paekiviga), misjärel saab ehitada lainemurdja keha ja katta selle kividega. Tööd tuleb teha vee pealt. Akvatooriumi süvendamisel tuleb kasutada koppsüvendajat, näiteks AS Saarte Liinide Watermasterit.

2.3 Kanali analüüs ja sihimärkide võimalik varjestamine

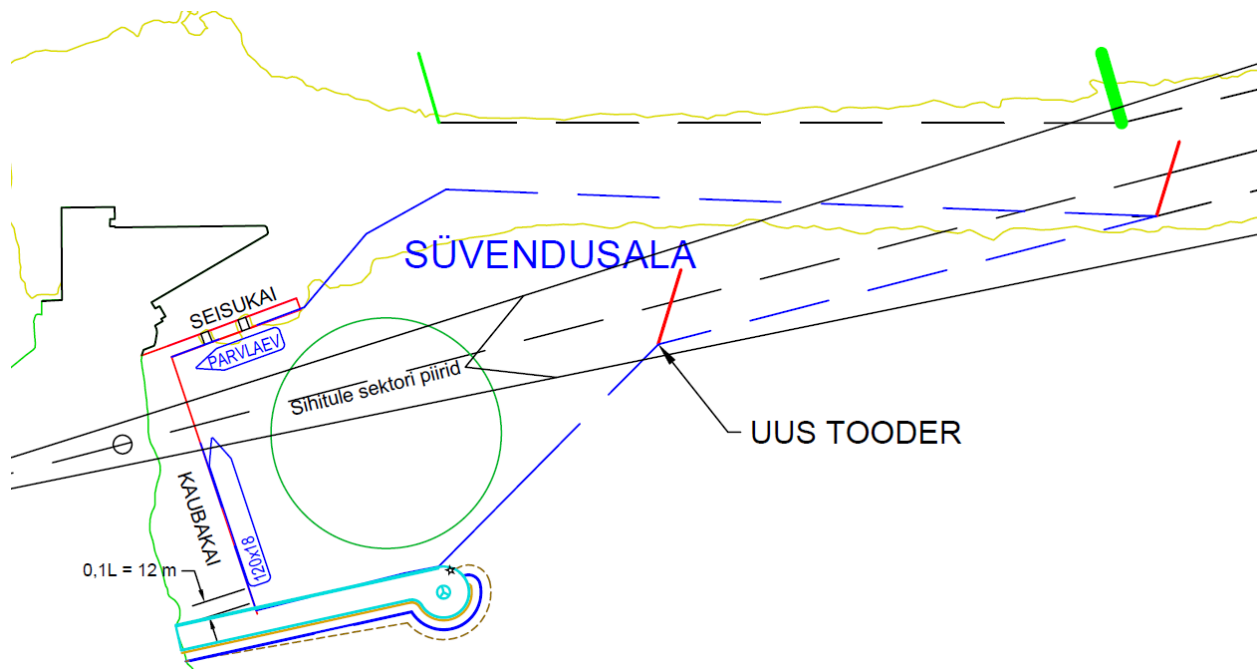
Kaubakaile juurdepääsu süvendamine kanali pikendusena nii, et laev saab sirgelt suunduda kaubakai äärde manööverdamiseks pöördealale on laeva juhituduse säilitamiseks ja ohutuse tagamiseks optimaalne lahendus. Samuti hõlbustab selline lahendus tunduvalt ka parvlaevade liiklemist.

Alternatiivina kaalutud väiksema süvendusalaga variandi korral peaks laev kaubakai äärde jõudmiseks tegema kõigepealt praeguse kanali järgi pöörde paremale ning kohe seejärel vasakule kai poole. Selleks ajaks on laev juba kiiruse maha võtnud, mistõttu rool ei tööta

efektiivselt ning ta on tundlik tuule ja hoovuse suhtes, st laev ei ole hästi juhitud ja võib kanduda madalale. Seega ei ole see variant vaatamata väiksematele süvenduskuludele sobiv.

Planeeritav kaubakai paikneb Heltermaa sadama sihi ees. Kaubakaist põhja pool, olemasolevate paalide ümber on planeeritud parvlaeva seisukai, mille ääres seisev parvlaev vähendab sihimärkide nähtavussektorit võrreldes senisega. Süvendusala paiknemine viitab, et kaubalaevad hakkavad seisma kaubakai lõunapoolses otsas, kuid vaatamata sellele võivad need piirata sihimärkide nähtavussektorit parvlaevast rohkemgi. Sihitulede sektori laius on 6°. Seda võib käsitleda minimaalse vajaliku nähtavussektorina, mis peab takistustest vaba olema, et mitte halvendada sihi kasutatavust.

Lähtudes planeeritavast kai pikkusest, kai ääres seisva suurima laeva pikkusest ning sellest, et kai otsa ja laeva vahele peab jääma teatud ohutusvaru, on praeguse lahenduse puhul oht, et pikemad laevad ulatuvad sihitulede sektorisse ja hakkavad sihitulesid varjama. Selle vältimiseks tuleb piirata kai ääres seisva laeva pikkust, suurendada kai pikkust ja/või leppida väiksema ohutusvaruga laeva ja muuli vahel. Viimane ei ole soovitatud lähenemine.



Joonis 2.1. Planeeritavate kaide, seal silduvate laevade ja süvendusala paiknemine. Navigatsioonimärgistuse täiendamise ettepanek.

2.4 Rajatiste mõju rannaprotsessidele

Esmajoones mõjutavad rannaprotsesse lainetus ja selle murdumisel tekkiv murdlusvool, mida mõnikord ka hoovuseks kutsutakse. Tegelikud hoovused on suure koguse vee horisontaalne ja enam-vähem püsiva suuna ja kiirusega liikumine, mis on põhjustatud püsiva suunaga tuultest, soolsuse- või temperatuurierinevustest. Kaarel Orviku (2018) sõnul on püsihoovustel rannasetete dünaamikas väga tagasihoidlik osa, kuna randa moodustavad setted on suhteliselt

jämeda lõimise ja suure erikaaluga ning tuulehoovused ei suuda väikese kiiruse tõttu neid paigastki nihutada, rääkimata nende edasikandmisest.

Laboratoorseid katsete ja hoovuste mõõdistuste tulemusel on tehtud üldistused, mis kajastavad hoovuste kiiruse mõju rannasetetele. Näiteks kesk- ja peeneteralise rannaliiva (0,1–0,5 mm) massiliseks liigutamiseks ja mööda merepõhja veeretamiseks peab põhjalähedase hoovuse kiirus olema vähemalt 15 cm/s, jämeda liiva (0,5–1,0 mm) korral aga ligikaudu 30 cm/s (Orviku, 2018). TTÜ Meresüsteemide Instituut näitas oma töös (Alkranel jt, 2015), et keskmised hoovuste liikumiskiirused on pinnakihi Heltermaa lähisel madalad (ca 2 cm/s). Üldiselt varieerusid kuu keskmised tuulehoovused tugevamate tuulte perioodil 11–33 cm/s vahemikus. Seega on enamjaolt liikumiskiirused liiga madalad. Mida sügavamale veesambas minna, seda vähemaks jääb liikumiskiirus. Orviku (2018) hindab, et tuulehoovusest tingitud liikumine haarab endaga kaasa vaid 10–15 cm pinnakihi. Sügavamal on hoovuse mõju nõrk. Lisaks on merepõhjas enamasti üliplastne savi, mis on väga kleepuv ning seetõttu pole aldis liikuma. Seetõttu on ca 3 m sügavamas vees väga vähe setete liikumist ning seda ei muuda ka planeeritavate rajatiste ehitamine.

Eelnevast selgus, et Väinamere hoovused on suure mastaabiga. Seetõttu ei avalda neile mingit mõju planeeritavate rajatiste ehitamine, kuna nende mõõtmel on oluliselt väiksemad võrreldes Väinamere mõõtmega.

Lainetusel ja murdlusvool on olulisem roll, sest tekkivad vee liikumiskiirused on oluliselt suuremad. Samas on Väinameres lainete kõrgus piiratud madala sügavuse ja lühikese hoovõtumaaga. Suurimad lained on Hari kurgu piirkonnas, mujal on rannik (s.h. Heltermaa ümbrus) suhteliselt hästi kaitstud.

Rannajoone olulisi muutusi 2000.–2022. aastate ortofotodelt ei täheldatud. Heltermaa sadamast lõunas on näha, et liiv ja liikuvad setted sisuliselt puuduvad (Foto 2.1 ja Foto 2.2). Kui ehitada planeeritavad rajatised, siis sisuliselt midagi ei muutu – rannaprotsessid ei kiirene ega aeglustu. Samuti ei ole näha setete kuhjumist planeeritavate ehitiste ette või taha.



Foto 2.1. Vaade Heltermaa sadama suunas freespuru mäelt. 21.05.2021.



Foto 2.2. Vaade lõunasse freespuru mäelt. 21.05.2021.

3 HELJUMI LIIKUMISE MODELLEERIMINE

3.1 Programm Delft3D

Erinevates alternatiivsetes asukohtades süvendamisel ja kaadamisel tekkiva heljumi leviku modelleerimiseks on kasutatud tarkvara Delft3D. See on tarkvara uurimaks hüdrodünaamilisi protsesse (nii hoovuseid kui ka lainetust), setete transporti, põhja morfoloogiat ning vee kvaliteeti jõgedes, estuaarides ja rannikutel. Seda on kasutatud paljudes paikades üle maailma, nagu näiteks Hollandis, USAs, Hong Kongis, Singapuris, Austraalias, Veneetsias. Delft3D koosneb moodulitest, milledest igaüks on suunatud erineva sisuga ülesannete lahendamiseks. Neid võib kasutada kombineeritult keerukamate ülesannete jaoks. Lisaks on eraldi moodulid andmete sisestamiseks ja tulemuste analüüsiks.

Moodul WAVE põhineb SWAN mudelil. Hüdrodünaamiline moodul FLOW baseerub Navier-Stokes'i võrranditel, mis on kohaldatud madala vee jaoks. Nende võrrandite lahendamiseks rakendatakse kõrgemat järku absoluutselt stabiilseid numbrilisi skeeme. Tõusudest-mõõnadest ning atmosfääri mõjudest (õhurõhu muutumine, tuul) tingitud mittestatsionaarsed hüdrodünaamilised protsessid (nt hoovused ja nende poolt põhjustatud transport) arvutatakse ebaregulaarsel arvutusvõrgul, mis on üldiselt konstrueeritud vastavuses arvutuspiirkonna raja(de) geomeetriaga piirtingimustega piiratud võrgustikul.

3.2 Mudelite seadistused

Heljumi leviku modelleerimiseks arvutati esmalt lainetuse parameetrid moodulis WAVE. Heltermaa lähistel kasutati kolmeastmelist võrku, millest esimene kattis tervet Läänemerd (võrgu silma suurus 5 km). Teises astmes kattis võrk Väinamerd ja Hiiumaa ümbrust. Kaetava ala suurus oli 100 x 110 km ning silma suurus 500 m. Kolmas võrk kattis Heltermaa sadama ümbrust (ala 7 x 7 km, võrgusilma suurus oli 125 m). Väinamerre kaadamisel modelleeriti vaid kahe võrguga (jäeti välja Heltermaa sadama võrk). Kõige madalamate WAVE võrkude väljundid olid sisendiks FLOW dünaamilisse mudelitesse, mis olid tehtud eraldi nii Väinamere kaadamisala kui ka Heltermaa sadama ümbruse jaoks. Heltermaa sadama ümbruse FLOW võrk kattis ala 3,3 x 3,1 km ning võrgusilma suurus varieerus 12...48 m vahel). Väinamere kaadamisala FLOW võrk kattis ala 10,7 x 7,5 km ning võrgusilma suurus varieerus 90...30 m vahel, tihenedes kaadamisala asukohas). Kõikides moodulites rakendati ühest suunast pidevalt puhuvat tuult ning tervet ala katvat ühtlast veetaset (valiti kõikjal 0 meetrit). Heljumi leviku hindamiseks vaadeldi nelja erinevat tuule suunda ja Kalbadagrundil ning Heltermaal mõõdetud tuulekiiruste protsentile. Näiteks 90%-tiil näitab läve, millisest on 90% väiksemad tuulekiirused.

Simulatsioone teostati 36-tunnise ajavahemiku vältel alates 00:00 01.01.2020 kuni 12:00 02.01.2020. Arvutusi ei seotud hüdroloogiliste ja meteoroloogiliste parameetritega konkreetsetel päevadel, mistõttu mudel ei peegelda situatsiooni valitud päeval ning on kasutusel vaid mittestatsionaarsete protsesside käigu iseloomustamiseks. Mitmesugused hüdrodünaamilised parameetrid vajavad üldjuhul teatavat kohanemisaega (*spin-up time*), et kohaneda muutuva situatsiooniga (nt. avamerelt saabuvate lainetuse tingimustega). Selle aja jooksul võivad settimisprotsessid toimuda märgatavalt erinevalt tasakaalulisest situatsioonist ning nende väärtused ei ole realistlikud. Süsteemi kohanemisaegaks valiti 360 minutit. Tuule kiirus ja suund simulatsioonide vältel ei muutunud.

Sadamas süvendamisel ja rajatiste ehitamisel (täite uputamisel) tekkivat heljumit imiteeriti üksikusse võrgupunkti paigutatud konstantse intensiivsusega setete allika kaudu, mis aktiveeriti kindlaks ajavahemikuks (algus: 01.01 08:00, lõpp: 01.01 20:00). Kaide ja muulide ehitamisel kasutatakse ilmselt suuri paelahmakaid ning suuremaid kive (läbimõõt vähemalt 100 mm). Need kukuvad sisuliselt kohe põhja ja heljumit ei teki. Siiski on selle osas ka peenosist, mis jääb veesambasse pikemaks ajaks. Kui hinnata, et ühe koppekskavaator jõuab teisaldada 100 m³/h, siis konservatiivselt võiks sellest veesambasse heljumiks jääda 10%. Kaide ja muulide puhul annab kõige enam merele avatud punkt konservatiivseima hinnangu ning on sobilik keskkonnamõjude hindamiseks. Kaide ja muulide rajamisel hinnati peenosise terasuuruseks $D_{50}=150\ \mu\text{m}$. Tegu on peenliivaga.

Süvendamisel sõltub heljumi levik kasutatavast tehnoloogiast. Tõenäoliselt kasutatakse pinnasepumpsüvendajat. Kõige suurema heljumi leviku annab üliplastse savi hüdrauliline süvendamine (veeja abiga), kuna tegu on väikeste osakestega. Samas on see savi väga kleepuv ning moodustab känkraid, mis tegelikult veesambas ei hõlju. Konservatiivne hinnang on, et 50% kaevandatavast materjalist muutub heljumiks. Sellise hinnangu puhul ei ole vahet, millist tehnoloogiat süvendamiseks kasutatakse.

Väinameres kaadamisel tekkivat heljumit imiteeriti samuti üksikusse võrgupunkti paigutatud konstantse intensiivsusega setete allika kaudu, mis aktiveeriti kindlaks ajavahemikuks (algus: 01.01 08:00, lõpp: 01.01 09:00). Eeldati, et kasutusel on pargas, mille põhja avamisel kukub laaditud pinnas kohe vette. Pargase mahuks eeldati 3000 m³. Laadungiks on enamjaolt üliplastne savi, mis põhjustab ka kõige laialdasemat heljumit. Et transpordil välja kaevatud pinnas uuesti kokku kleepub, siis tekivad känkrad, mis kiirelt põhja vajuvad. Hinnanguliselt 10% kogu laadungist jääb veesambasse kauemaks hõljuma ning selle mahuga ka modelleeriti.

Keskkonnamõju hindamiseks on oluline seada mudelisse kontsentratsiooni piir, millest madalamate puhul ei erine need looduslikust foonist. Laura Raag uuris oma magistritöös (2014) süvendustööde mõju heljumi kontsentratsiooni ruumilisele jaotusele. Ta leidis, et olemasoleva heljumi looduslikus kontsentratsioonis võib tuvastada Eesti rannikul suuri hooajalisi muutuseid (Raag, 2014) ning koostas selle kohta kaardid. Tabel 3.1 esitab tulemused Heltermaa sadama ja Väinamere kaadamisala kohta.

Tabel 3.1. Kuu keskmine heljumi looduslik kontsentratsioon g/m³ aastail 2006–2011.

	Aprill	Mai	Juuni	Juuli*	Aug*	Sept*	Okt
Heltermaa sadam	9	7	5	9	3	6	9
Väinamere kaadamisala	8	4	3	5	2	5	9

* Arvutustest on välja jäetud 2008. aasta

Kõrgeimaid kontsentratsioone on näha aprillis, mil on fütoplanktoni kevadõitseng. Juuli kõrged tulemused on seotud sinivetikate kogumitega, mida suvisel perioodil sageli esineb. Heljumi kontsentratsioonide suuremad väärtused oktoobris on põhjustatud tuulepinge kasvust. Tugevam tuul põhjustab suuremat resuspensiooni. Madalaimad heljumi kontsentratsiooni väärtused esinesid juunis, peale kevadõitsengut, mil toitained on tarbitud. Lääne-Eesti saarte vahelisel alal toimuvad suurimad heljumi kontsentratsioonide ruumilised muutused. Selles piirkonnas on vesi madal ja suletud ning tuulte poolt põhjustatud resuspensioon on oluline tegur (Raag, 2014).

Raagi magistritöös välja toodud heljumi fooni kaartide põhjal võib valida heljumi kontsentratsiooni looduslikuks piiriks konservatiivselt 3 g/m^3 , sest mitmes varasemas töös on valitud sama piir ning selline heljumi kontsentratsioon langeb alla selle piiri vaid augustis. Sõltuvalt tööde tegemise ajast võib looduslikku kontsentratsiooni piiri tõsta. Kui töid tehakse aprillis, juulis, septembris või oktoobris, oleks adekvaatsemaks looduslikuks piiriks 5 g/m^3 . Käesolevas töös on toodud tulemused 3 g/m^3 korral, et anda võimalikult palju infot.

3.3 Heljumi levik sadama lähistel

Heljumi leviku hindamiseks kasutati Kalbadagrundi mõõtejaama tuule kiiruste 90% kvantiile (Tabel 3.2). See tähendab, et 90% juhtudel on tuulekiirus väiksem kui 90% kvantiilile vastav kiirus. Heltermaa mõõtejaamas mõõdetud tuule kiirused on oluliselt madalamad. Seepärast ülehindavad tulemused tegelikkust.

Tabel 3.2. Tuule kiirused erinevate suundade jaoks

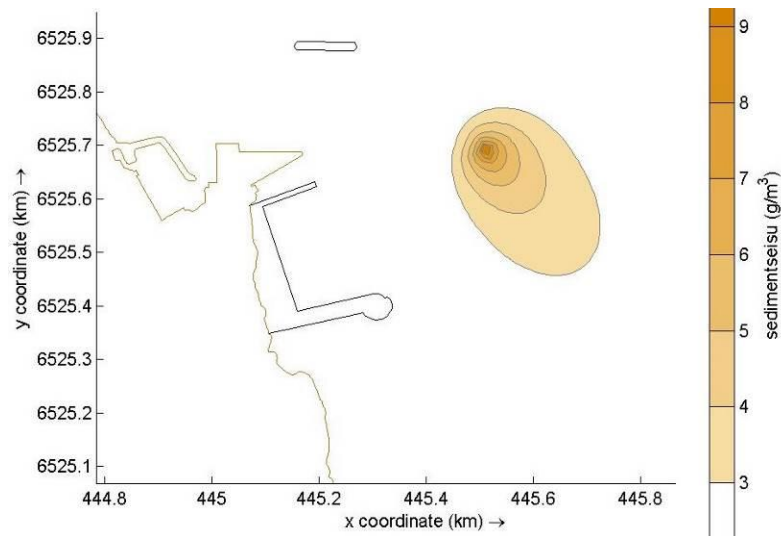
	45°	135°	225°	315°
90%-line protsentiil, m/s	13	11,9	13,4	12,4

Tabel 3.3 esitab heljumi leviku (3 g/m^3 piiri) maksimaalse kauguse allikast (süvendamise või kaadamise asukohast antud simulatsioonides) erinevate tuulesuundade korral. On näha, et Põhjamuuli, Lõunamuuli ja Kaubakai ehitamisel on heljumi levik kõikide suundade puhul väga väike (Joonis 3.2). Sisuliselt on heljumi levik olematu. Kõige suurem oli heljumi levik sissesõidukanali süvendamisel (Joonis 3.1 ja Joonis 3.2), kuna kaevamisel lenduvad saviosakesed on väga väikesed. Ehitiste rajamisel on täiteks kasutatav pinnas pigem väga jäme ning see heljumi osakesi vähe.

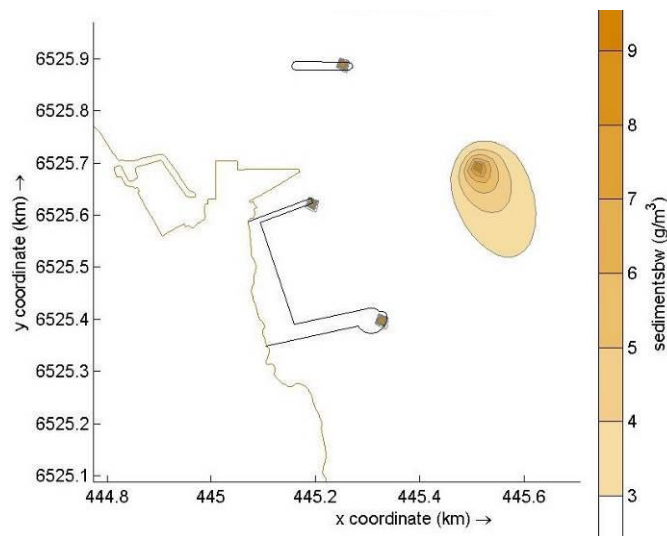
Tabel 3.3. Heljumi levikuga kaetud mereala maksimaalne läbimõõt

Heljumi levik, m	45°	135°	225°	315°
Süvendamisel sissesõidukanalis	400	300	350	200
Põhjamuuli ehitamisel	50	50	50	50
Lõunamuuli ehitamisel	50	50	50	50
Kaubakai ehitamisel	50	50	50	50

Käesolevas töös tuule kiirusest lähtuvaid piiranguid sadamas ette tulevatele süvendamistele ja kaadamistöödele ette ei nähta. Tehnoloogiliselt on ilmselt mõistlik peatada tööd merel, kui tuule kiirus ületab merel 10 m/s . Oluline on siinkohal ka märkida, et nõrga tuule ja madala lainetuse korral jääb süvendus- ja kaadamistöödel tekkiva heljumi levik reeglina lokaalseks ja laiemat mõju, mis ületaks oluliselt looduslike protsesside tulemusel esinevat foonilist kontsentratsiooni, ette näha ei ole. Määravaks on siin täitematerjali granulomeetriline koostis – mida jämedam on sete (liiv), seda kiiremini toimub selle settimine põhja. Näiteks on 200 mikromeetrise läbimõõduga kvartslüliiva settimiskiirus on $\sim 2 \text{ cm/s}$, mis $1,5 \text{ m}$ sügavuses seisvas vees langeks põhja ca 1 minuti jooksul.



Joonis 3.1. Heljumi levik süvendamisel kanalis loodetuulega (45°). Pruuni joonega on näidatud veepiir 0-veetaseme korral ning mustaga projekteeritavad rajatised.



Joonis 3.2. Heljumi levik süvendamisel kanalis loodetuulega (315°). Pruuni joonega on näidatud veepiir 0-veetaseme korral ning mustaga projekteeritavad rajatised.

3.4 Heljumi levik kaadamisalal

Heljumi leviku hindamiseks kasutati Kalbadagrundi mõõtejaama tuule kiiruste 50%-list protsentiili (Tabel 3.4). See tähendab, et 50% juhtudel on tuulekiirus väiksem kui 50-protsentiilile vastav kiirus. Heltermaa mõõtejaamas mõõdetud tuule kiirused on oluliselt madalamad. Seepärast ülehindavad tulemused tegelikkust.

Tabel 3.4. Tuule kiirused erinevate suundade jaoks

	45°	135°	225°	315°
50%-line protsentiil Kalbadagrundis, m/s	7,3	7,2	8,5	7,4
95%-line protsentiil Heltermaal, m/s	7,7	5,7	5,2	6,3

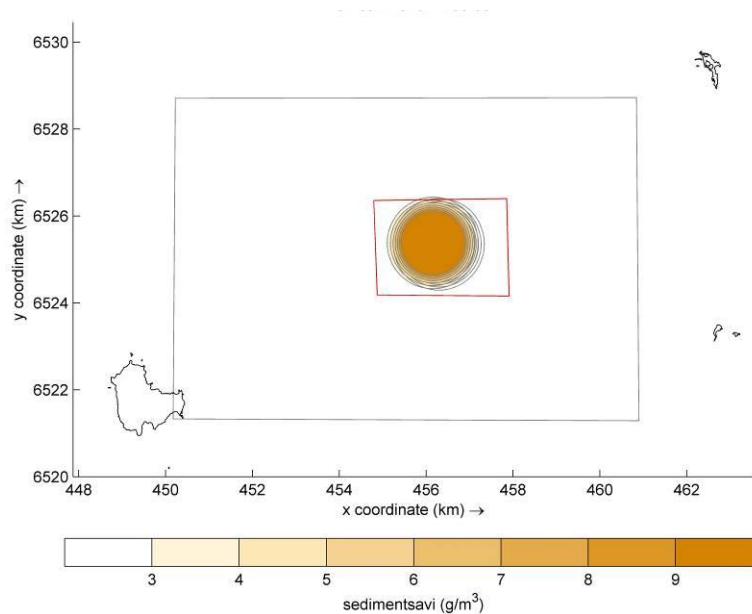
Joonis 3.3...Joonis 3.6 esitavad heljumi leviku piirid 3 m/s tuule kiiruse korral erinevatest suundadest 2 tundi pärast pargaselt vette viskamist. Joonistelt on näha, et üldiselt jääb kontsentratsioon 3 g/m³ kaadamisala piiridesse, kuid võib põhjas või lõunas teatud juhul ületada ala piire. Kui on möödunud rohkem aega kaadamisest, siis on 3 g/m³ piir levinud ca 100 m kaugemale joonistel kujutatust. 5 g/m³ seevastu jääb alati piiridesse. 10 tundi pärast kaadamist on heljumi kontsentratsioon kõikjal vähem kui 3 g/m³.

Joonis 3.7...Joonis 3.10 esitavad heljumi leviku 5 m/s tuule kiiruse korral erinevatest suundadest 2 tundi pärast pargaselt vette viskamist. Tulemused näitavad, et heljum on kuni 0,5 km võrra kaadamisalast välja liikunud. Aja möödudes see suureneb kuni 1 km.

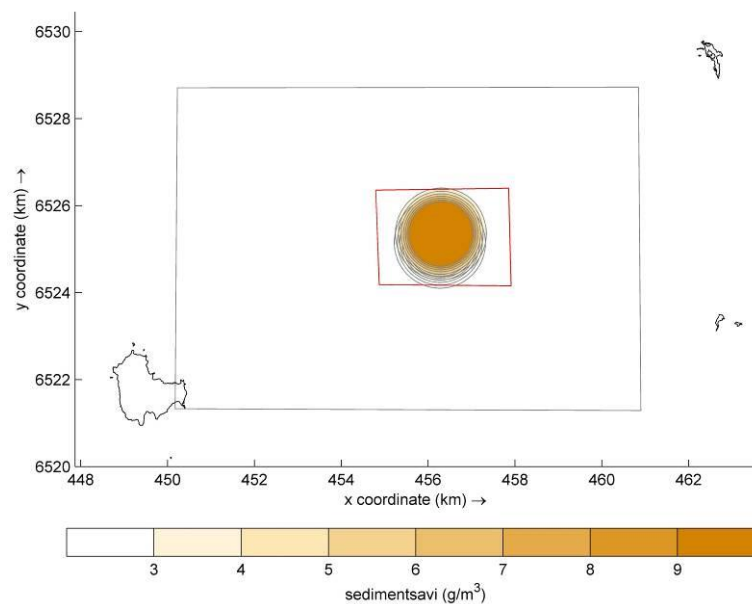
Joonis 3.11...Joonis 3.14 esitavad heljumi leviku Kalbadagrundi 50%-protsentiilile vastavate tuulekiirustega erinevate suundade korral. Nagu näitab Tabel 3.4, on need kiirused olulised suuremad Heltermaal mõõdetust ja seega on tulemused ilmselt ülehinnatud. Tulemused näitavad, et heljum on 2 tundi pärast kaadamist kuni 1 km võrra kaadamisalast välja liikunud. Aja möödudes see suureneb kuni 2 km.

Simulatsioonide võrdlemisel saab öelda, et 10 tunni pärast kaadamist on heljumi kontsentratsioon kõikjal vähem kui 3 g/m³. Heljum leviku pindala (läbimõõt ca 2 km) on jäänud sisuliselt samaks kõikidel tuule kiirustel. Seega mõjutab tuule kiirus vaid heljumi leviku kaugust algsest kaadamispunktist.

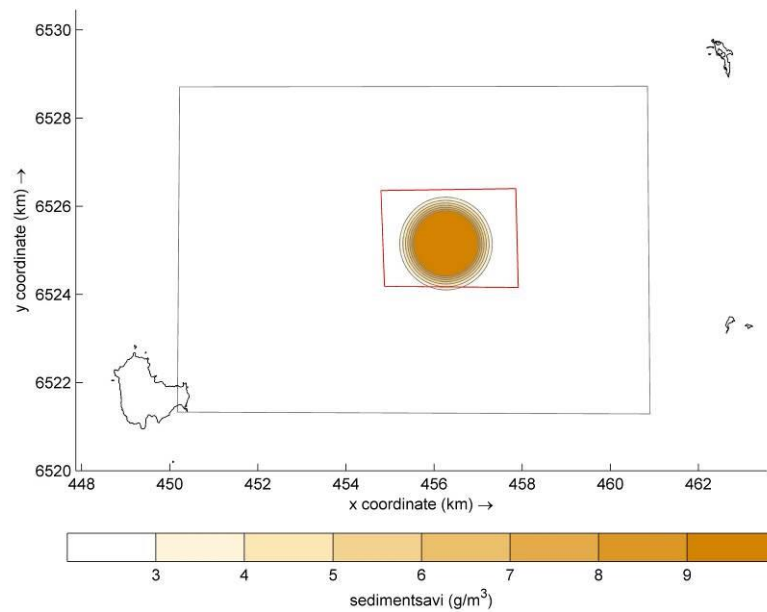
Kui on oluline, et heljum ei leviks kaadamisel välja kaadamisalast, tuleb kaadata võimalikult tuulevaikse ilmaga. Soovituslik tuulekiiruse ülemine piir on 3 m/s. Sellise kiiruse puhul ei ole tuule suund oluline. Kui tuule kiirus on kuni 5 m/s, tuleks kirde- ja kagutuule korral kaadamispunkt valida ca 200 m rohkem lõunas ning edela- ja loodetuulte korral ca 200 m põhja pool. Simulatsioonis kasutatud kaadamispunkti koordinaadid on X=6526270 ja Y=456210 L-EST97 süsteemis.



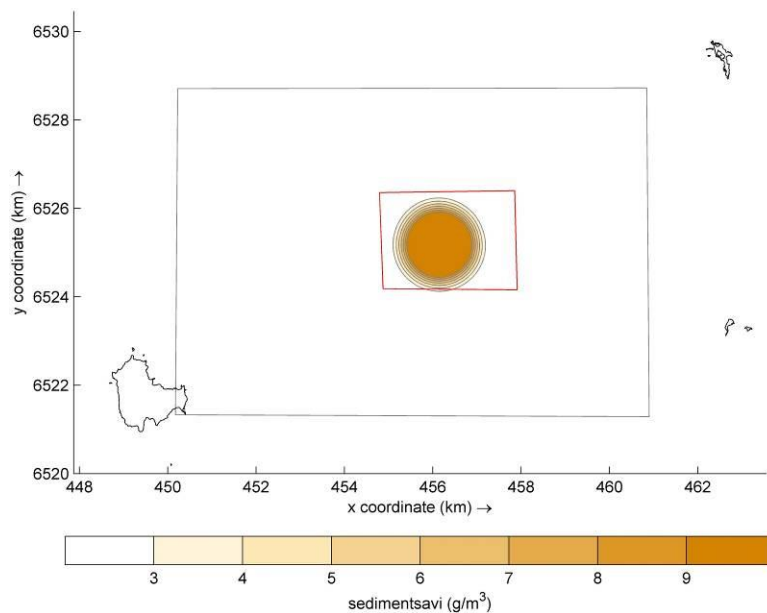
Joonis 3.3. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 3 m/s kirde tuulega (45°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



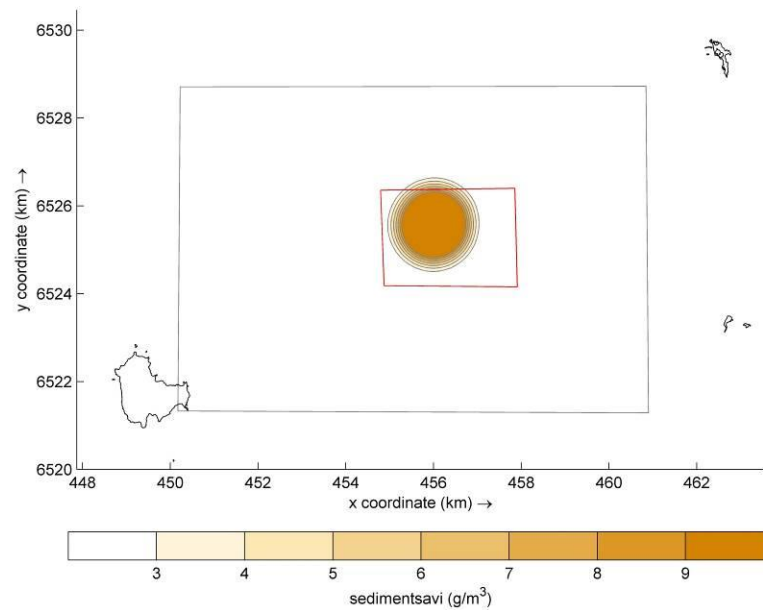
Joonis 3.4. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 3 m/s kagutuulega (135°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



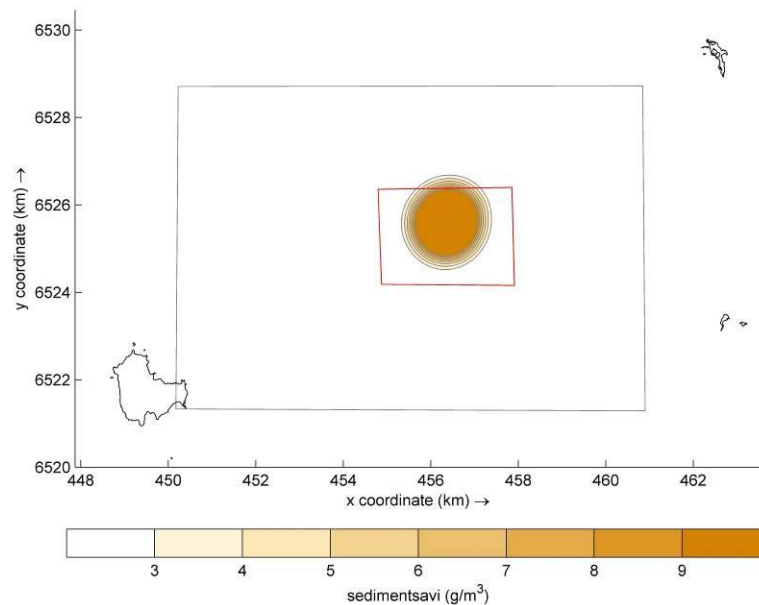
Joonis 3.5. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 3 m/s edelatuulega (225°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



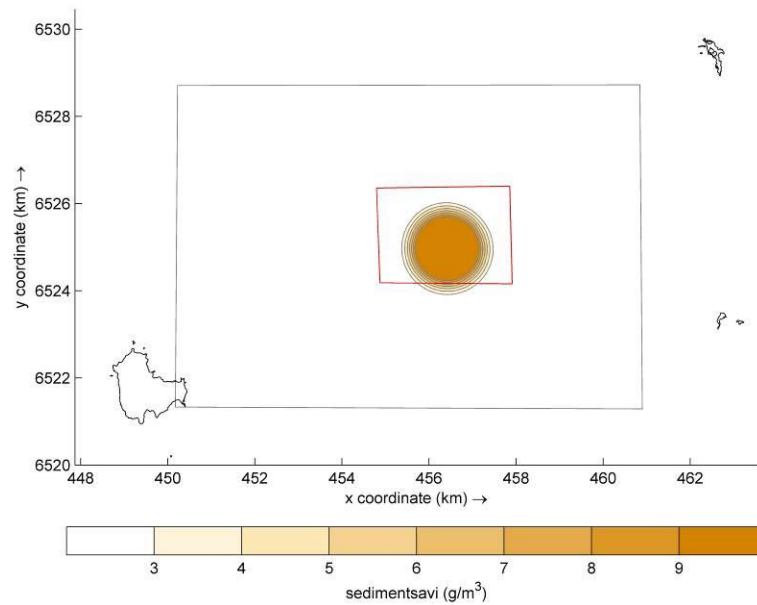
Joonis 3.6. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 3 m/s loodetuulega (315°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



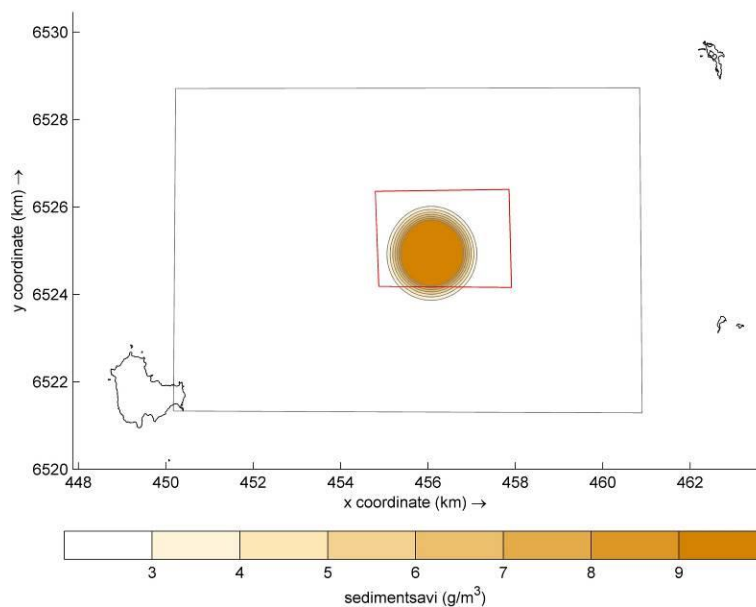
Joonis 3.7. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 5 m/s kirdetuulega (45°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



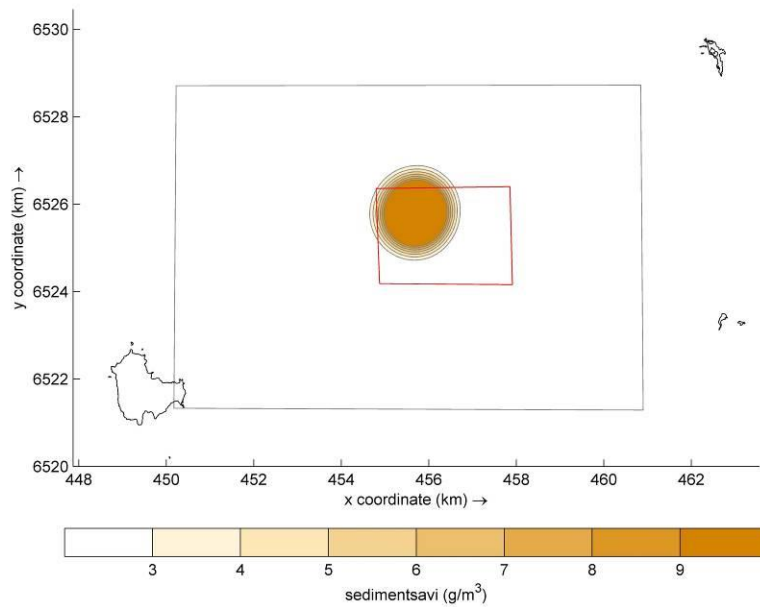
Joonis 3.8. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 5 m/s kagutuulega (135°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



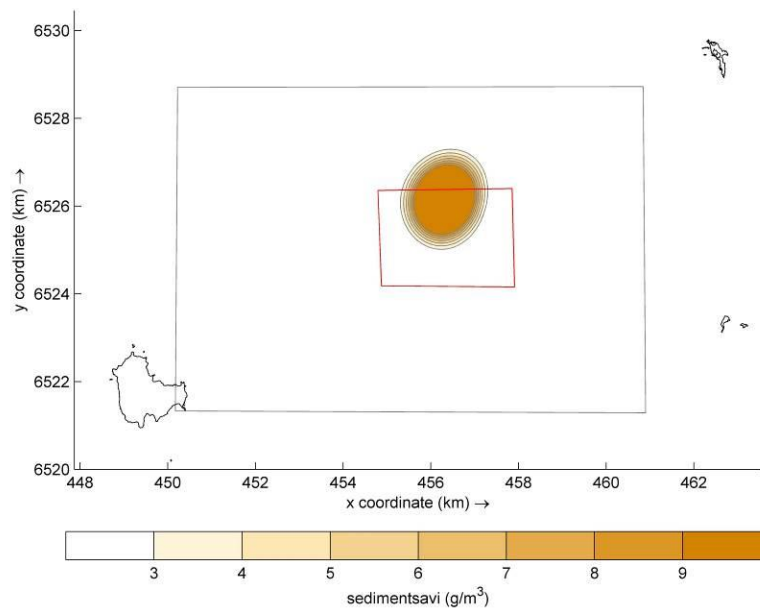
Joonis 3.9. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 5 m/s edelatuulega (225°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



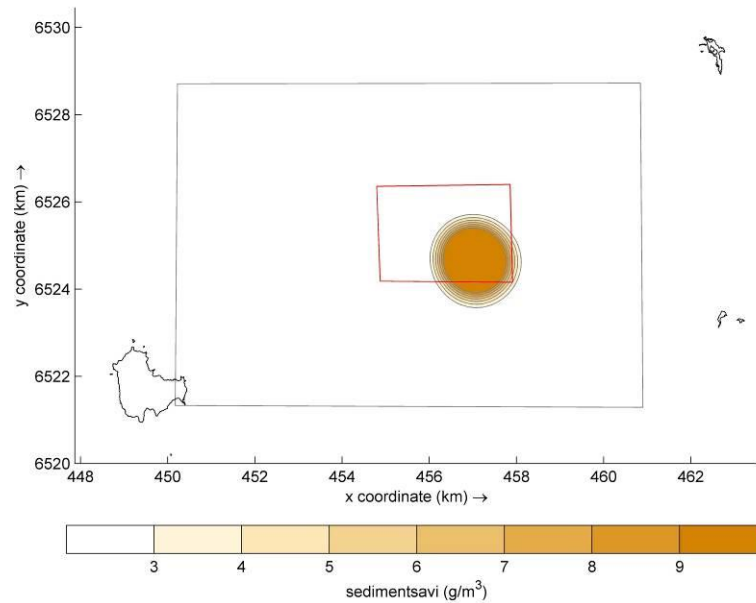
Joonis 3.10. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 5 m/s loodetuulega (315°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



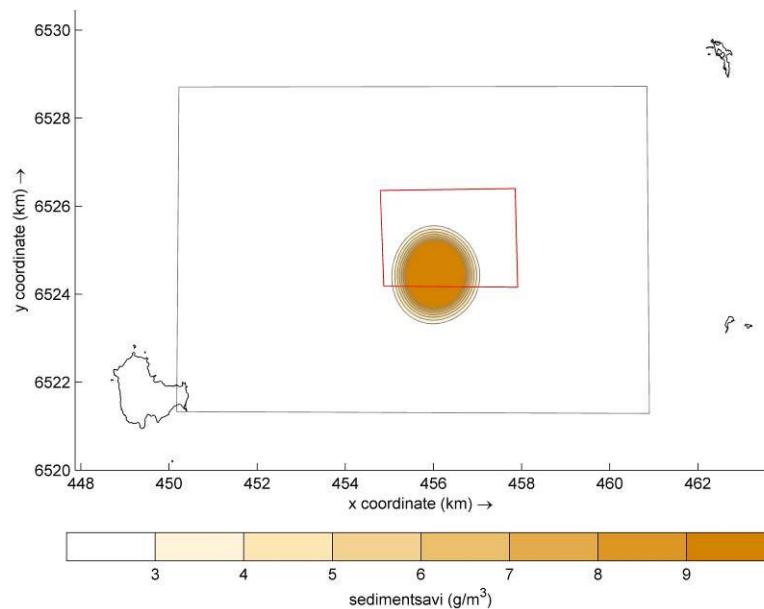
Joonis 3.11. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 7,3 m/s kirdetuulega (45°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



Joonis 3.12. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 7,2 m/s kagutuulega (135°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



Joonis 3.13. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 8,5 m/s edelatuulega (225°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.



Joonis 3.14. Heljumi levik 2 tundi pärast pargaselt kaadamist 7,4 m/s loodetuulega (315°). Punane kast näitab kaadamisala ning hall kast arvutusala piire. Musta joonega on tähistatud saared ja laiud.

KASUTATUD KIRJANDUS

Alkranel OÜ, Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituut, Artes Terrae OÜ. 2015. Hiiu maakonnaga piirneva mereala maakonnaplaneeringu keskkonnamõju strateegiline hindamine. Aruanne.

Orviku, K. 2018. Rannad ja rannikud. TLÜ Kirjastus.

Raag, L. 2014. Süvendustööde mõju heljumi kontsentratsiooni ruumilisele jaotusele, hinnatuna kaugseire andmetest. Magistritöö. *Tallinna Tehnikaülikool*.