



EstKONSULT OÜ

Registrikood 10410360
Sõpruse pst 151A, 13417 Tallinn
telefon: 664 6730
e-post admin@estkonsult.ee



MTR EP10410360-0001	20.02.2003	Projekteerimine
MTR EK10410360-0001	20.02.2003	Ehitusekspertiis
MTR TGP000251	21.10.2011	Gaasipaigaldise ehitamine
MTR EEP003323	29.06.2015	Sildade ja teede projekteerimine
MTR ELK000025	05.08.2015	Liikluskorralduse projekteerimine
MTR EPE001031	29.06.2015	Silla- ja teeprojektide ekspertiis
MTR EEP003405	26.08.2014	Raudteerajatiste projekteerimine
MTR EPE001102	26.08.2014	Raudteerajatiste projektide ekspertiis

Töö nr **B776**

Projekti tellija:
Ehitise aadress:

Viimsi Vallavalitsus
Leppneeme sadam, Leppneeme küla, Viimsi vald,
Harju maakond

EstKONSULT



LEPPNEEME SADAMA HÜDRODÜNAAMILINE MODELLEERIMINE

Heiki Meos
Juhataja

Rain Männikus
Projektijuht

Tallinn
detsember 2017

ÜLDANDMED

TELLIJA

Viimsi Vallavalitsus

Registrikood: 75021250

Nelgi tee 1, 74001, Viimsi alevik, Viimsi vald, Harju maakond

Tel: 606 6800

E-post: info@viimsivv.ee

KONSULTANT

OÜ EstKONSULT

Registrikood: 10410360

Sõpruse pst 151A, 13417 Tallinn

Tel: 6646 730

E-post: admin@estkonsult.ee

Projektijuht Rain Männikus diplomeeritud ehitusinsener, tase 7 Kutsetunnistus nr 106088

ALLTÖÖVÕTJA

Lainetuse analüüs

OÜ Lainemudel

Registrikood 14075763

Tamme-põik 11, 76607, Keila

Tel: 58 400 274

E-post: lainemudel@gmail.com

Projektijuht Rain Männikus

OÜ Lainemudel

Registrikood: 14075763

e-post: lainemudel@gmail.com

Töö nr 1706

Töö tellija: OÜ EstKONSULT

Registrikood: 10410360

e-post: admin@estkonsult.ee

LEPPNEEME SADAMA HÜDRODÜNAAMILINE MODELLEERIMINE

Töö autor:

RAIN MÄNNIKUS

Tallinn

Detsember 2017

SISUKORD

1. LÄHTEÜLESANNE	2
1.1. Eesmärk	2
1.2. Sisu	2
1.3. Lähtematerjalid	2
2. LEPPNEEME SADAM	3
2.1. Olemasolev olukord	3
2.2. Sadama planeeritav laiendus	5
3. LAINETUSE UURING	6
3.1. Lähteandmed modelleerimiseks	6
3.2. Lainemudeli seadistus	6
3.3. Simulatsioonide tulemused	7
4. ÜKSIKLAINE LEVIK AKVATOORIUMIS	9
4.1. Lainemudeli seadistus	9
4.2. Tulemused	10
5. LAINEKÕRGUSTE KASV	12
6. SETETE LIIKUMINE MUULI OTSTE VAHEL	14
6.1. Mudel Delft3D	14
6.2. Mudeli seadistus	14
6.3. Tulemused	15
7. EBITUSAEGSE HELJUMI LEVIK	17
7.1. Mudeli seadistus	17
7.2. Heljumi levik	18
VIIDATUD KIRJANDUS	21

1. LÄHTEÜLESANNE

1.1. Eesmärk

Käesoleva töö eesmärk on leida lainetuse parameetrid ning teostada hüdrodünaamiline modelleerimine Leppneeme sadamas.

1.2. Sisu

- Teostatakse lainetuse uuring kirde- ja põhjakaartest puhuva tuule jaoks. Määratakse olulised lainekõrgused, perioodid ning laine suunad muulide ees nii põhja- kui ka idamuulil. Samuti antakse väärtused akvatooriumis.
- Hinnatakse üksiklaine levikut ja sumbumist erinevate idamuuli lahenduste korral.
- Uuritakse lainekõrguste kasvu konstruktsioonidelt peegeldumise tulemusena.
- Kontrollitakse setete liikumist muulide otste vahel.
- Hinnatakse ehitusaegse heljumi levikut mõlema tuule korral.

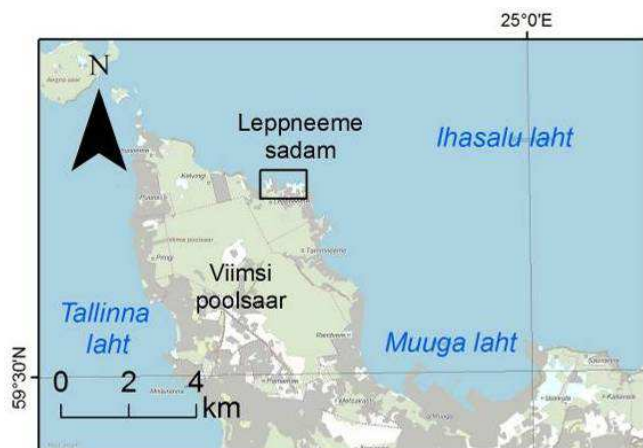
1.3. Lähtematerjalid

1. Leping B776 ja selle lisad.
2. OÜ Meremõõdukeskus. 2017. Töö nr M17076. Leppneeme sadama batümeetria.
3. OÜ Corson. 2017. Leppneeme sadama asendiplaan. (1713_ES_AS-3-01_v01_asendiplaan.dwg).
4. OÜ GEO S.T. Töö nr 21M7111. Leppneeme sadama ja lähiümbruse maa-ala geodeetilised uurimistööd.
5. OÜ REI Geotehnika. 2005. Töö nr 1423-05. Leppneeme sadam. Ehitusgeoloogilise uuringu aruanne.
6. OÜ IPT Projektijuhtimine. 2017. Töö nr 17-09-1361. Leppneeme sadama geoloogilised ja geotehnilised uuringud.
7. Veeteede Ameti andmed merepõhja sügavuste kohta.

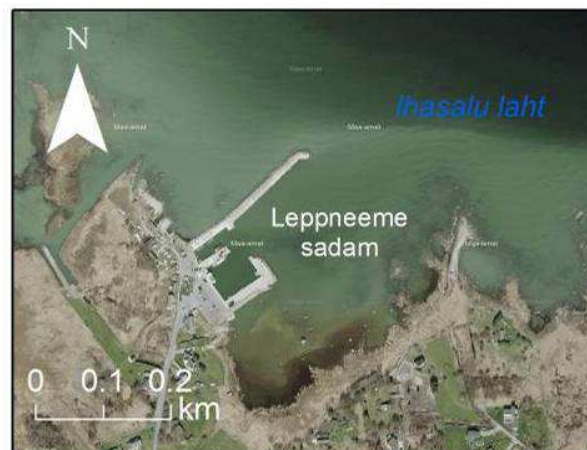
2. LEPPNEEME SADAM

2.1. Olemasolev olukord

Leppneeme sadam asub Harju maakonnas Viimsi vallas Leppneeme külas (Joonis 2.1 ja Joonis 2.2). Sadamast väljuvad laevad Prangli saarele.



Joonis 2.1. Leppneeme sadama asukoht



Joonis 2.2. Leppneeme sadama ala

Olemasoleva sadama akvatoorium avaneb kirdesse. Põhjast kaitseb akvatooriumi sadama põhiosast hiljem (umbes 2003. aastal) rajatud põhjamuul (Foto 2.1), mis on kirde pool 3 meetrit kõrge. Akvatooriumi kaid on vertikaalsed, pealmise kõrgusega +1,00...+1,50 m. (Foto 2.2).



Foto 2.1. Põhjamuul koos madalama põhjakaiga (26.09.2017).

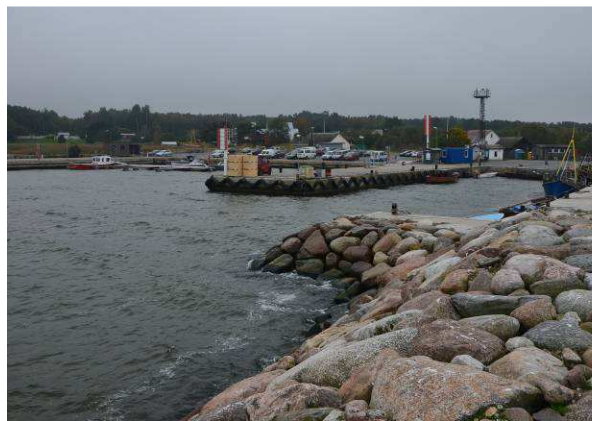


Foto 2.2. Vaade põhjamuulilt sadamale (26.09.2017).

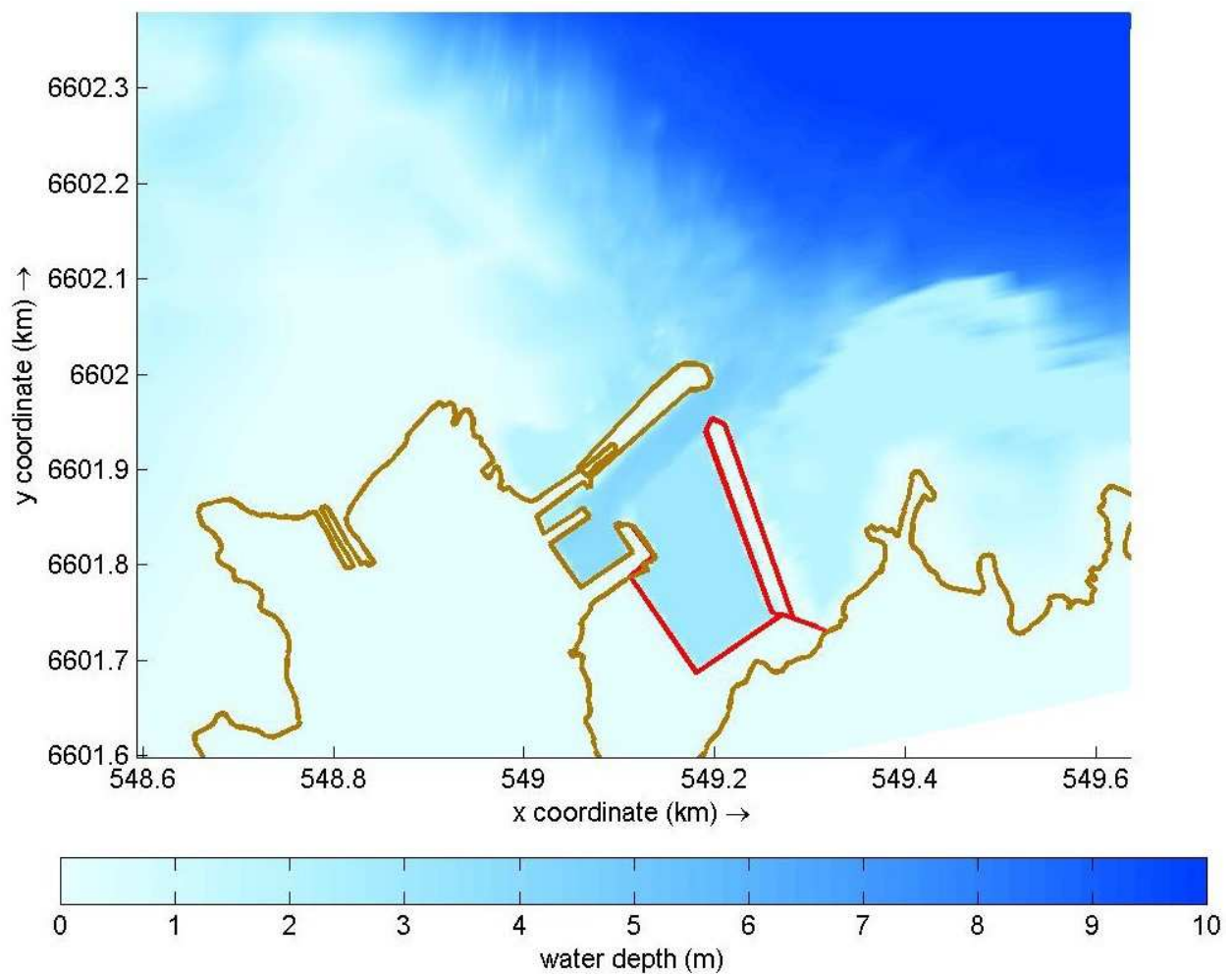
Sadamat ümbritsevad alad on lauged, ilma järskude kallasteta. Sadamast loode pool on suurem madal ala, mis kaitseb mingil määral sadamat lainetuse eest (Foto 2.3). Merepõhja batümeetria on näidatud joonisel 2.3. Merepõhi on kaetud osaliselt liiva ja kruusaga. Madalas vees on kohati graniitkive ja rändrahne (Foto 2.4).



Foto 2.3. Vaade põhjamuulilt loodesse (26.09.2017).



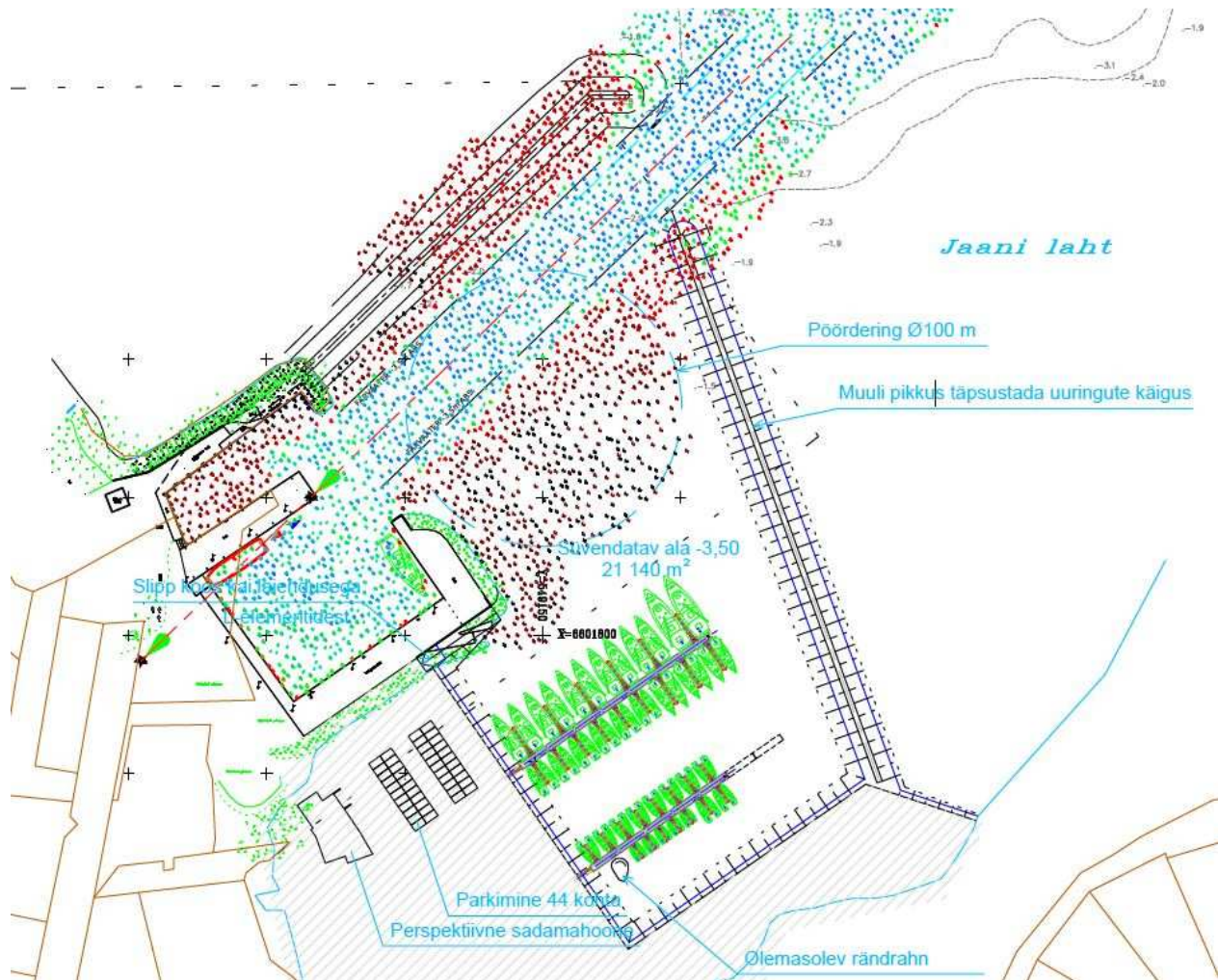
Foto 2.4. Vaade põhjamuulilt loodesse (26.09.2017).



Joonis 2.3. Leppneeme sadama ala batümeetria. Pruunid jooned tähistavad olemasolevat rannajoont ning punased osundavad kavandatavaid rajatisi (idamuul, täiteala piir). Koostatud Veeteede Ameti ja OÜ Meremõõdukeskuse andmete põhjal.

2.2. Sadama planeeritav laiendus

OÜ Corson on koostanud Viimsi valla soovide põhjal Leppneeme sadama laiendusprojekti eskiisi, mis näeb ette akvatooriumi laiendamist, idamuuli ehitamist ning kagusse täiteala rajamist (Joonis 2.4). Tekkiva akvatooriumi projektne sügavus on esialgsete plaanide kohasel -3,5 m. Idamuuli kõrgust ei ole projekti varajases staadiumis määratud. See ehitatakse eeldatavasti graniitkividest nõlvakindlustusega, mille kalle jääb vahemikku 1:1,5 kuni 1:2 ning kõrgus +1,50 kuni +2,50 m. Täiteala kaldakindlustused tulevad samuti graniitkividest ning on arvatavasti nõlvaga 1:1,5.



Joonis 2.4. OÜ Corsoni poolt kavandatud Leppneeme sadama eskiis.

3. LAINETUSE UURING

3.1. Lähteandmed modelleerimiseks

Soome lahe lõunaranniku lahed on varjatud lõunakaarest puhuvate tormide poolt tekitatud lainete eest, mida esineb Läänemeresel kõige sagedamini (edelatuuled). Sellest tulenevalt on Ihasalu lahe lainekliima tagasihoidlik ning keskmine lainekõrgus selles piirkonnas suhteliselt madal. Seevastu on laht avatud põhjaloode suunale, kust ligikaudu kord 50 aasta jooksul võivad saabuda väga tugevad tormid. Nende mõju sadamale on määratud lokaalsete veetasemete poolt. Madala veetasemega ei jõua kõrged lained rajatisteni, vaid murduvad varem ära. Kui aga veetase on tugevate tormide ajal kõrge, siis on randa jõudvate lainete purustusjõud maksimaalne. Seepärast tuleb sadamarajatisi projekteerides arvesse võtta lainetust ja veetaset üheaegselt. Et Eesti põhjarannikul ei esine kõrged veetasemed ja tugevad põhjatormid üldjuhul samaaegselt, siis tuleb analüüsida veetasemete ja tuule (või lainetuse) ühisjaotust.

Käesolevas töö raames telliti tuule ja veetasemete analüüs Tallinna Tehnikaülikooli Lainetuse dünaamika laboratooriumist. Nende töös analüüsiti eraldi tuuli ja veetasemeid ning vaadeldi nende ühisjaotust Leppneeme sadama jaoks relevantsete suundade põhjal. Järgnevas tabelis (Tabel 3.1) on toodud töö peamised tulemused, mis on lähteandmeteks modelleerimisel.

Tabel 3.1. Sisendparameetrid Leppneeme sadama hüdrodünaamiliseks modelleerimiseks.

Korduvusperioodid, aastad	0°–30°		30°–60°		330°–360°	
	u, m/s	wl, m	u, m/s	wl, m	u, m/s	wl, m
2	14	0,6	18	0,45	19	0,4
50	15	1,0	22	0,5	21	0,8

3.2. Lainemudeli seadistus

SWAN mudel (Simulating WAVes Nearshore) on kolmanda põlvkonna spektraalne lainemudel, mis võimaldab arvutada tuulelainete parameetreid madalas rannikumeres ja sisevetes. Mudel baseerub kahemõõtmelise spektraalse lainemõju bilansi võrrandil. SWAN mudelit on edukalt verifitseeritud välimõõtmiste põhjal ja paljudes laboratoorsetes eksperimentides.

SWANi mudelarvutustes kasutati kolmeastmelist skeemi. Esimese astmena arvutati lainetuse parameetrid Soome lahel suhteliselt tagasihoidliku lahutusvõimega (mudeli võrgu samm varieerus 500 ja 1500 m vahel). Teise astmena arvutati lainetust Ihasalu lahes (võrk kattis 7×10 km suurust ala ja lahutusvõime oli 30 ja 100 m vahel). Kolmandas astmes leiti otsitavad väärtused Leppneeme sadamas ja selle läheduses (võrk kattis $1,7 \times 1,3$ km suurust ala ja lahutusvõime oli 3 ja 20 m vahel, suurenedes ühtlaselt avamere suunas). Teise ja kolmanda astme arvutused tuginesid mudeli kõrgemas astmes leitud lainetuse parameetritel.

Mudelile rakendati ühest suunast pidevalt puhuvat tuult ning tervet ala katvat ühtlast veetaset. Simulatsioonides kasutati 6 tundi (piisav aeg Soome lahel lainetuse küllastumiseks) pidevalt ühest suunast ja kiirusega puhuvaid erinevate korduvusperioodidega tuuli, millega samaaegselt rakendati samade korduvusperioodidega veetasemeid. Batümeetria alusandmed saadi OÜ

Meremõõdukeskuse ja Veeteede Ameti mõõdistustest ning Balti mere batümeetria andmebaasist (BSHC, 2013). Need interpoleeriti kasutatud arvutusvõrgule Delft3D sisseehitatud tarkvara abil. Rannik esitati mudelis tasapinnana, mis tõusis veetasemest kuni 2 m kõrgusele. Põhjamuuli harja kõrguseks valiti 3,0 m ning idamuuli jaoks eelduslikult jaoks 2,0 m. Kasutatud mõõtmed saadi OÜ Corsoni eskiisilt.

3.3. Simulatsioonide tulemused

Idamuuli dimensioneerimiseks vajalike parameetrite saamiseks viidi simulatsioonid läbi kolme erineva tuule suuna puhul: alates 330° kuni 60°, 30-kraadise sammuga, korduvusperioodidega 2 ja 50 aastat. Olukordi analüüsiti aastaringselt valitsetavates oludes. Mõõtepunktide asukohad on toodud joonisel 3.1 ning nendele vastavad tulemused (oluline lainekõrgus, tipp-periood, keskmine periood ja lainete keskmine suund) tabelites 3.1 ja 3.2. Käesolevas raportis on esitatud tulemused vaid suurimate 2- ja 50-aastase korduvusperioodidega laine parameetrite kohta. Selliste ühekordsete sündmuste tõenäosus on igal aastal vastavalt 50% ja 2%. Mitmekordsete sündmuste tõenäosus on väiksem. Joonisel 3.2. on esitatud oluline lainekõrgus ja lainete keskmine suund 2-aastase korduvusperioodi puhul.



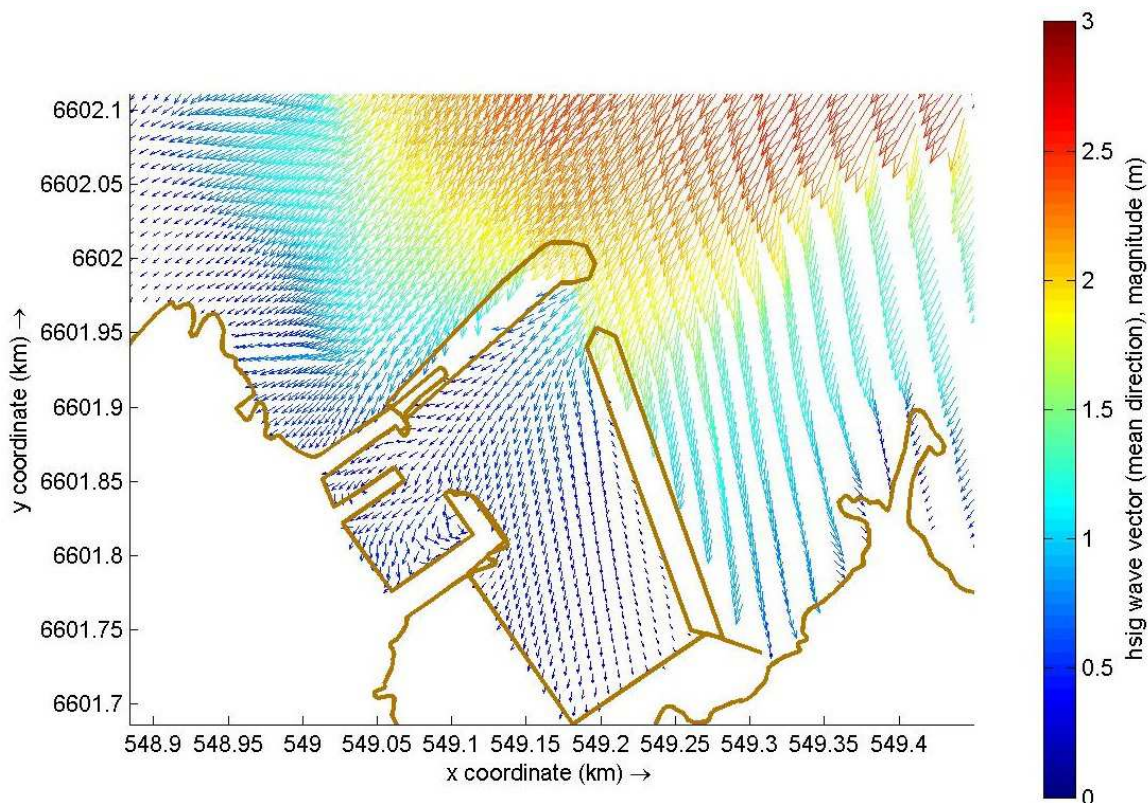
Joonis 3.1. Mõõtepunktid Leppneeme sadamas ja selle lähistel.

Tabel 3.1. Simulatsioonide tulemused sadamast väljas

T_R	#1				#2				#3				#4			
	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir, °	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir, °	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir, °	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir, °
2	2,3	7,4	5,3	38	2,1	7,4	5,3	34	1,6	8,3	5,6	8	1,1	8,3	5,7	11
50	2,7	8,3	6,0	36	2,4	8,3	6,1	33	1,8	8,3	6,2	9	1,2	8,3	5,9	12

Tabel 3.2. Simulatsioonide tulemused akvatooriumis

T_R	#5				#6				#7				#8			
	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir , °	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir , °	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir , °	H_s , m	T_p , m	T_m , m	dir , °
2	1,5	8,3	5,2	32	0,5	8,3	3,1	49	0,5	8,3	3,5	23	0,4	8,3	2,8	5
50	1,6	8,3	5,8	31	0,5	9,5	3,3	50	0,6	9,5	3,3	23	0,4	8,3	2,8	10

**Joonis 3.2.** 2-aastase korduvusperioodiga olulised lainekõrgused Leppneeme sadama lähisel. Tuule suund on NE (45°).

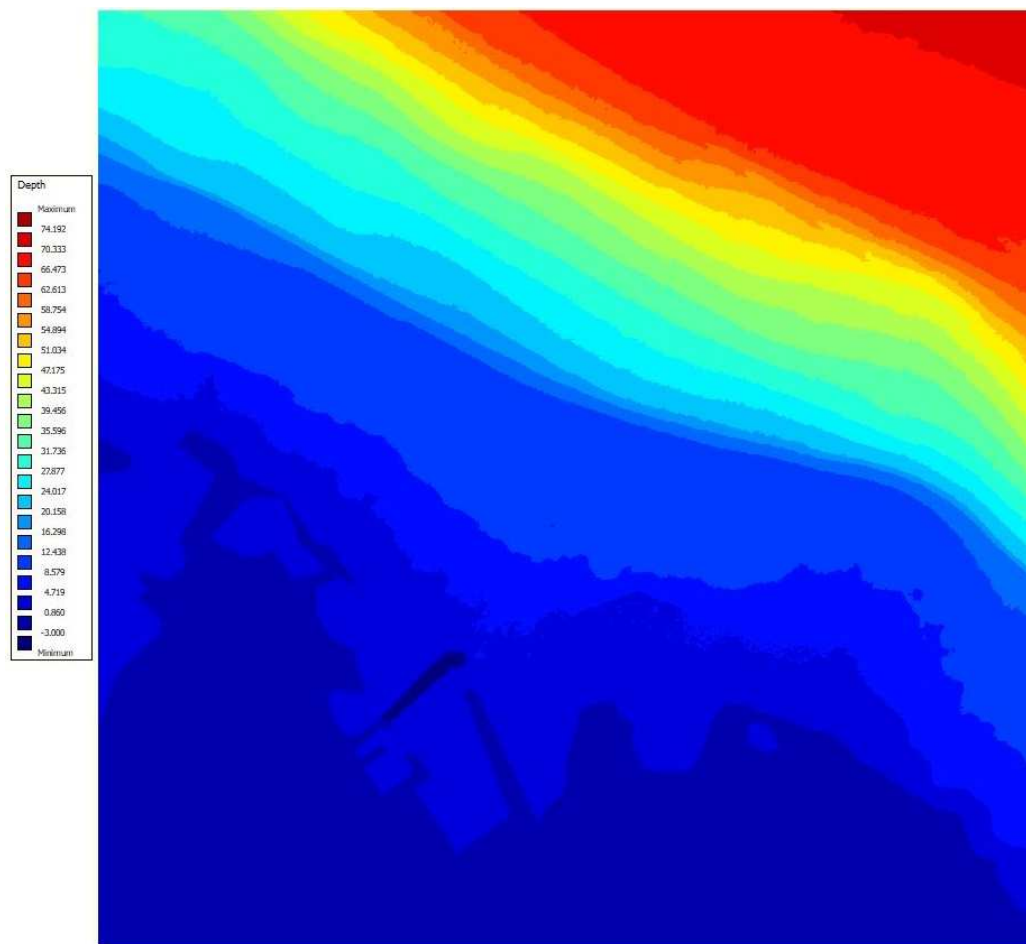
Tabelitest 3.1 ja 3.2 nähtub, et idamuuli kivide ja harja kõrguseks oleks mõistlik kasutada erinevas lõikes erinevaid parameetreid, sest kaldalähedasemas osas on lained oluliselt väiksemad. Eskiisis valitud sadama rajatiste konfiguratsiooni ja sissepääsukanali laiuse korral jäävad olulised lainekõrgused akvatooriumis üldjuhul alla 0,5 m, mis on sobilik ujuvkaide paigaldamiseks ning ka jahtide varjamiseks tormi eest.

4. ÜSIKLAINE LEVIK AKVATOORIUMIS

4.1. Lainemudeli seadistus

Üksiklaine levimist Leppneeme sadama idamuuli erinevate pikkust korral analüüsiti lainemudelis COULWAVE. See on faasilahetusega lainemudel, mis põhineb Boussinesqi tüüpi võrranditel. Need võrrandid kirjeldavad laineväljale iseloomulikke füüsikalisi protsesse rannalähedases madalas ja keskmise sügavusega vees. Baseerudes nimetatud võrrandite tüübil võimaldavad mittedispersioonilised lainemudelid, arvestades laine faaside määratust, modelleerida individuaalse laine evolutsiooni.

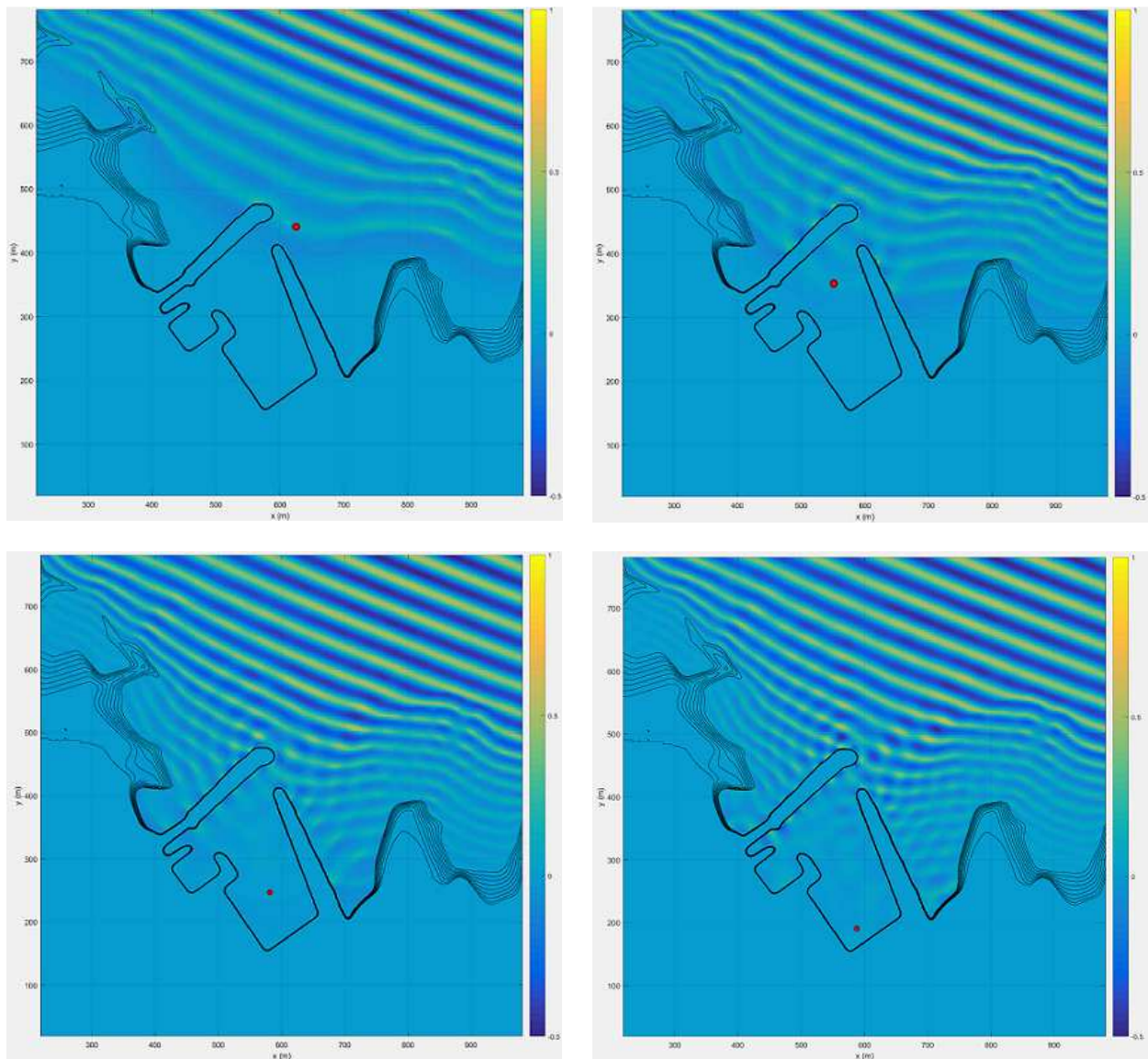
Simulatsioonides kasutatud arvutusala suurus oli $1,5 \text{ km} \times 1,5 \text{ km}$ (Joonis 4.1). Leppneeme sadam asus selles all vasakus nurgas. Ristkülikukujulise võrgu silma suurus oli $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$. Maapind ja kaid olid mudelis tõstetud absoluutsele kõrgusele 2 m. Lainemurdjaid modelleeriti läbimatu nõlvadega objektidena. Et sadamasse saabuval üksikul lainel väga harva, siis modelleeriti mudelis algse häiritusena sinusoidaalseid laineid. Tekkinud häirituse asukoht oli sadamast 1 km kaugusel. Laine kõrgus oli 2 m ja periood 6 s. Saabumissuund oli 30° (NEE).



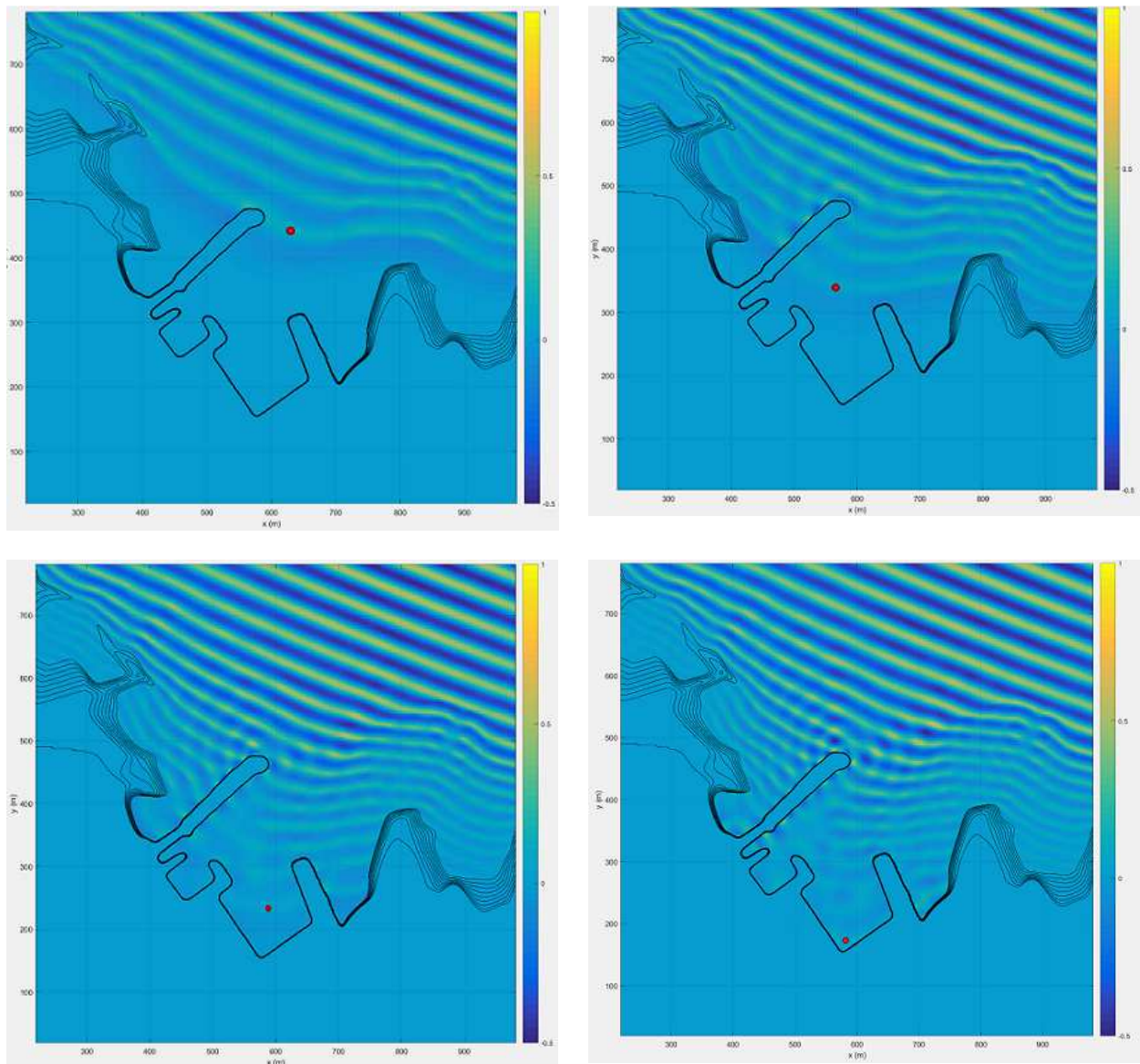
Joonis 4.1. Arvutusala.

4.2. Tulemused

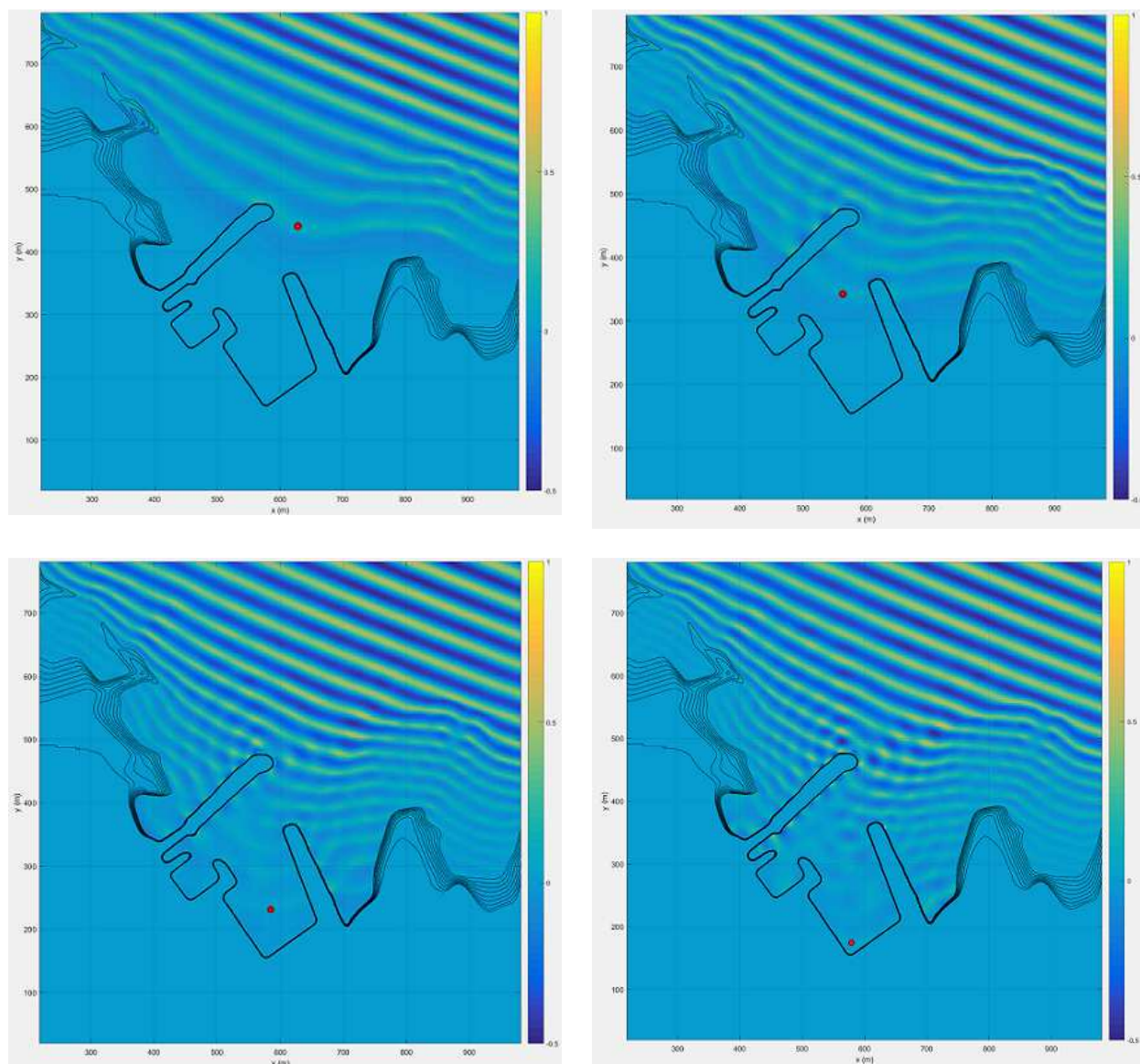
Üksiklainete levikut ja sumbumist analüüsiti projektse idamuuli pikkuse, pooliku pikkuse ning kolmveerand pikkuse korral. Lainete levikud on näidatud joonistel 4.2 kuni 4.13.



Joonised 4.2. kuni 4.5. Üksiklainete levik projektse lahenduse korral.



Joonised 4.6. kuni 4.9. Üksiklainete levik pooliku idamuuli korral.



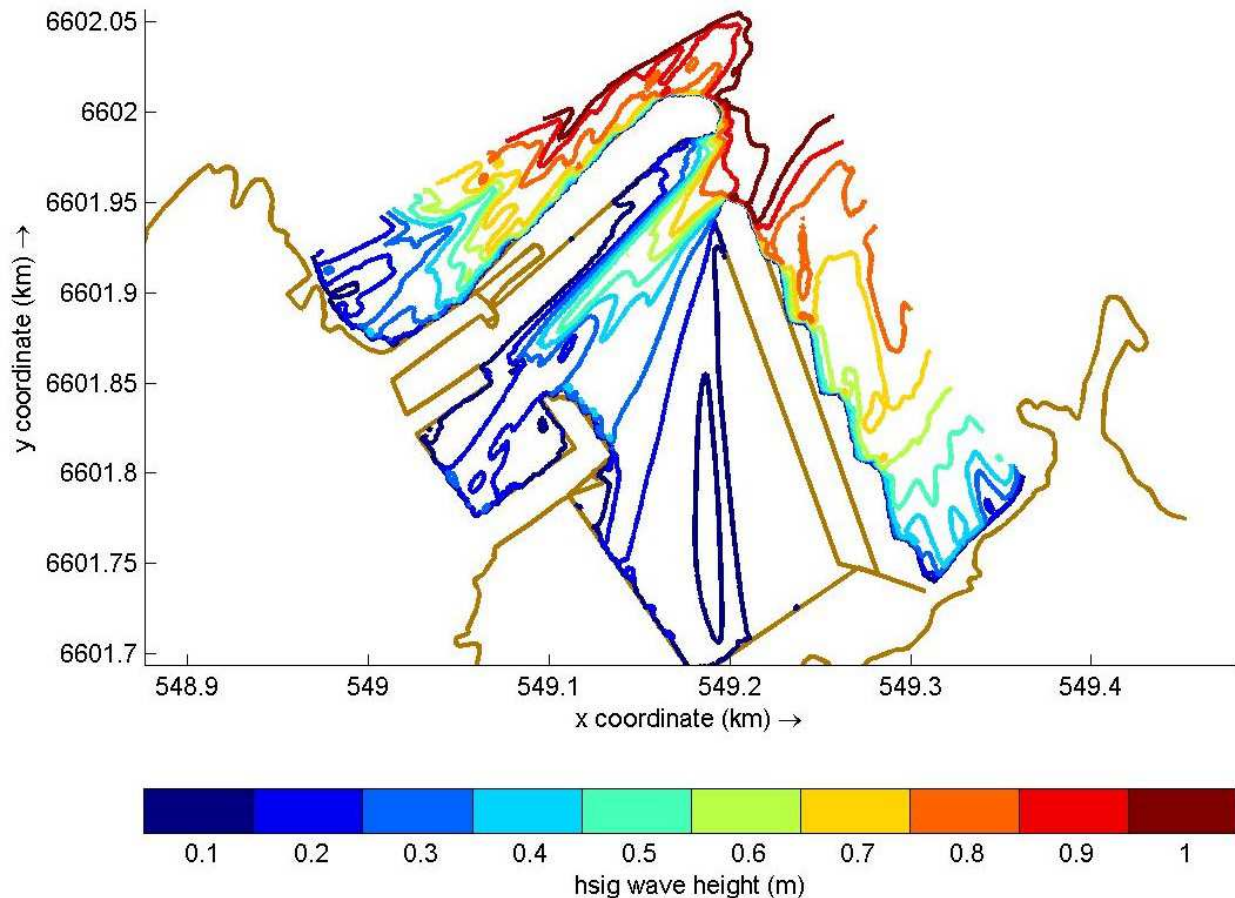
Joonised 4.10. kuni 4.13. Üksiklainete levik kolmveerand pikkuse korral.

Tulemustest selgub, et akvatooriumis on kõige madalamad lained idamuuli projektse pikkuse korral. See on ka optimaalseks pikkuseks.

5. LAINEKÕRGUSTE KASV

Lainekõrguste kasvu sadamakonstruktsioonidel peegeldumise tulemusena uuriti kahe mudeli (SWAN ja COULWAVE) abil. SWANi mudelarvutustes kasutati kaheastmelist skeemi. Esimese astmena arvutati lainetuse parameetrid Leppneeme sadamas ja selle läheduses (võrk kattis $1,7 \times 1,3$ km suurust ala ja lahutusvõime oli 3 ja 20 m vahel, suurenedes ühtlaselt avamere suunas). Teise astmena arvutati lainetuse parameetreid Leppneeme sadamas, kus võrk kattis 320×380 m suurust ala, mille lahutusvõime oli $1,3 \times 1,3$ meetrit. Graniitkividega kaetud muule

modelleeriti tõketena, millede peegeldumise koefitsient oli 0,2 (CIRIA, 2007). Põhjamuuli ja idamuuli harjade (eelduslikud) kõrgused olid vastavalt 3,0 m ja 2,0 m. Olemasoleva Leppneeme sadama kaide pindu kujutati täielikult peegeldavatena (koefitsient 1,0). Mudelarvutustes arvestati lainete difraktsiooni ja refraktsiooni. Saadud arvutuste tulemusi valideeriti COULWAVEi mudeli tulemuste põhjal. Joonisel 5.1 on esitatud sadama suudmes ja akvatooriumis oleva olulise lainekõrguse suurused. Et sadama suudmes on lainekõrgus 1 m, siis võib tulemusi interpreteerida ka suhtarvudena.



Joonis 5.1. Olulised lainekõrgused sadama akvatooriumis. Pruuni joonega on näidatud rannajoon ning olemasolevate/projekteeritavate rajatiste kontuurid.

Tulemusest on näha tõsiasi, et sadama sissesõidukanalist akvatooriumisse tunginud laine levib difraktsiooni tulemusena tõkete taha ning laine kõrgus väheneb kanali pikiteljel. Seda tulemust kinnitavad ka teoreetilised graafikud (USACE, 2008) ning praktiline kogemus. Et muulide siseküljed on eelduslikult summutava graniitkivikihiga, siis on lainete peegeldumine minimaalne.

6. SETETE LIIKUMINE MUULI OTSTE VAHEL

6.1. Mudel Delft3D

Leppneeme sadama lähistel olevate setete liikumise 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. Tarkvara uuendatakse ja arendatakse pidevalt ning sellesse lisatakse regulaarselt uusimaid modelleerimise tehnikaid ja võimalusi Deltarese uurimiskeskuses Hollandis.

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. SWAN mudel (Simulating WAVes Nearshore) on kolmanda põlvkonna spektraalne lainemudel, mis võimaldab arvutada tuulelainete parameetreid madalas rannikumeres ja sisevetes. Mudel baseerub kahemõõtmelise spektraalse lainemõju bilansi võrrandil. SWAN mudelit on edukalt verifitseeritud välimõõtmiste põhjal ja paljudes laboratoorsetes eksperimentides.

Hydrodünaamiline 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.

6.2. Mudeli seadistus

Setete liikumise modelleerimiseks arvutati esmalt lainetuse parameetrid moodulis WAVE kolmeastmelise skeemina, mille ülesehitus on kirjeldatud peatükis 3. Veetasemeks valiti lihtsustatult 0 meetrit. Mooduli WAVE viimase astme tulemused olid sisendiks moodulile FLOW. Selle arvutusvõrk kattis 1800×1600 m suurust ala ja lahutusvõime oli 5 ja 70 m vahel (suurenedes sadamast välja poole). Mudelites rakendati muutuva suunaga tuult, mis alustas puhumist loodest (suund 315°) ning pöördus 12 h möödudes kirdesse (suund 45°). Teises variandis olid suunad omavahel vahetatud. Tuule kiirusteks valiti 70 ja 95%-lised kvantiilid (vt tabelit 6.1). Esimene näitab setete liikumist nõ tavaolukordades ning teine tormide korral. 95%-line kvantiil peegeldab teatud tuule kiirust, mis esineb vaid 5% juhtudest ning on seega sobilik tormide kirjeldamiseks. Simulatsioonide viis on valitud selliselt, et tekitada maksimaalset reaalsusele lähedast olukorda, kus setteid kantakse sissesõidukanalisse.

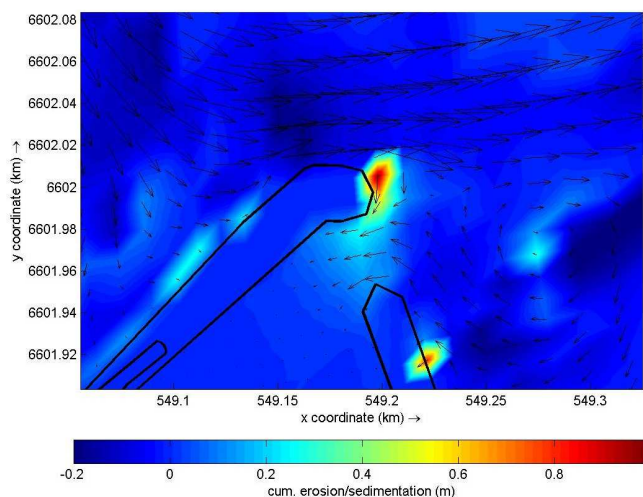
Pikaajaliste muutuste illustreerimiseks seati mudelis morfoloogilist faktoriks 3, mis näitab protsesse seega 3 korda kiiremini tegelikkusest. Sellega vähendati töös arvutuskulu. Käesoleva töö jaoks puudusid sadama akvatooriumist väljaspool lasuvate setete info (kihtide paksused, asukohad, terade suurused). Seepärast modelleeriti merepõhja mitteerodeeriva pinnana, mida katab 0,2 m paksune liivakiht, mille representatiivne diameeter oli $d_{50} = 0,1$ mm. Valitud kihi paksus on samas suurusjärgus sadama akvatooriumis oleva liiva- ja mudakihi paksusega (OÜ IPT Projektijuhtimine andmetel). Nimetatud asjaoludest tulenevalt ei ole siin analüüsitud ekstreemseid torme. Siiski annavad tulemused aimu setete liikumise mustritest ja kvalitatiivsetest suurustest, mis on sobivateks suunisteks sadama rajatiste projekteerimiseks.

Tabel 6.1. Tuule kiirused erinevate suundade jaoks

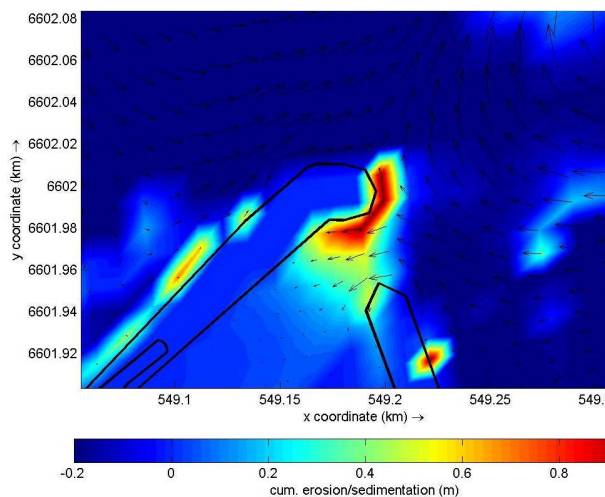
	315°	345°	15°	45°
70%-line kvantiil (m/s)	9	9	9	9
95%-line kvantiil (m/s)	14	14	13	14

6.3. Tulemused

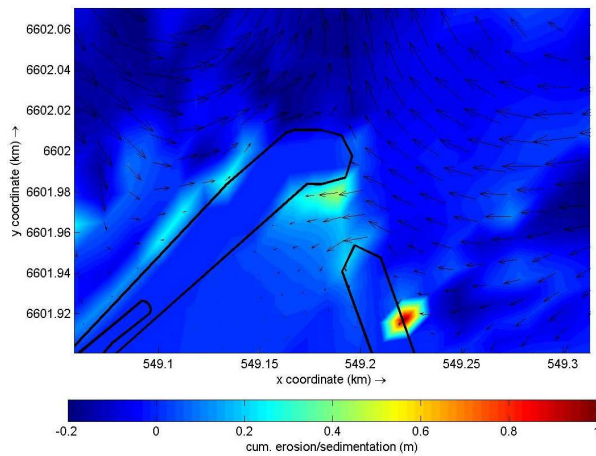
Joonistel 6.1 kuni 6.8 on esitatud tulemused, kus on näidatud setete kihi paksus (algelt 0,2 m) ning kogu transpordi (nii heljum kui põhjalähedane) suunad. Tulemused näitavad, et kui merepõhja katab ühtlane kiht liiva, siis põhjakaarte tuulte korral leiab aset setete kuhjumine sissesõidukanalisse. Võrreldes erinevate tuultekiiruste efekti, saab tõdeda, et tugevamate tuulte korral on kuhjumine oluliselt intensiivsem. Soovituslik on pärast tugevamaid torme mõõdistada sadama sissesõidukanalit käepäraste vahenditega, et olla kindel piisava süvise olemasolus.



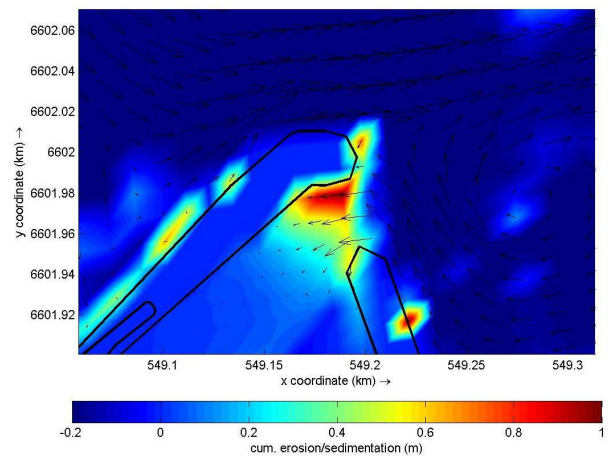
Joonis 6.1. Setete kihi paksus koos setete transpordi suunaga. Tuul alustas puhumist loodest (315°). Tuule suund on 330° ning kiirus 14 m/s.



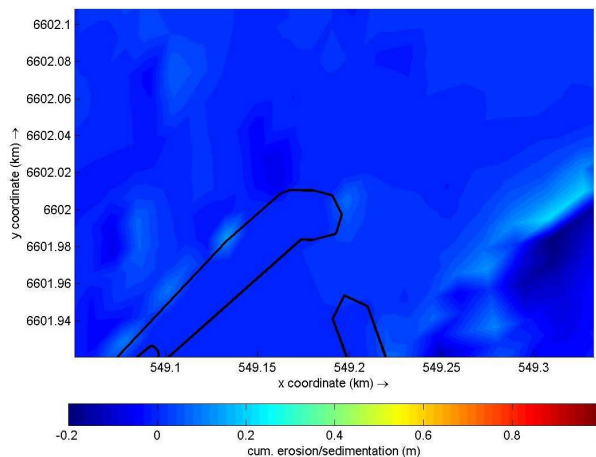
Joonis 6.2. Järg joonisele 6.1. Tuule suund on 30° ning kiirus 14 m/s.



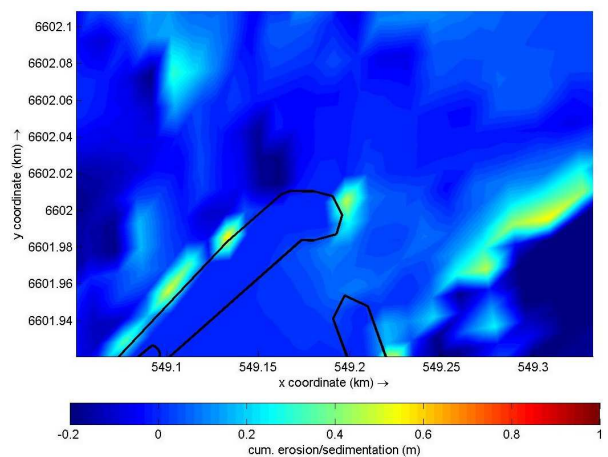
Joonis 6.3. Tuul alustas puhumist kirdest (45°).
Tuule suund on 30° ning kiirus 9 m/s.



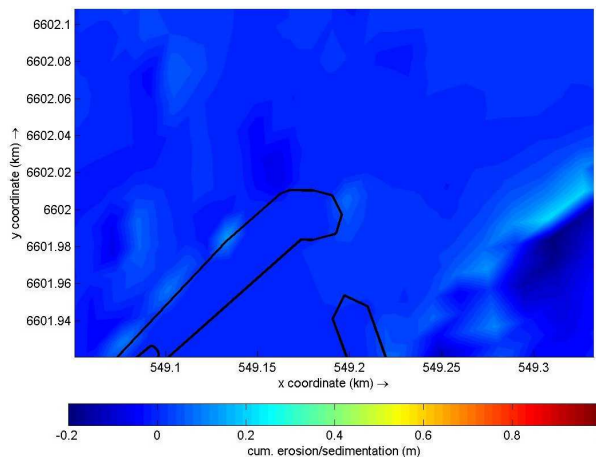
Joonis 6.4. Järg joonisele 6.3. Tuule suund on 330° ning kiirus 9 m/s.



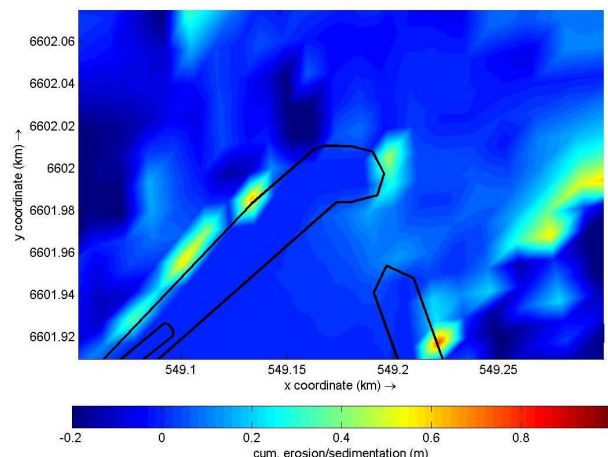
Joonis 6.5. Samad tingimused, mis joonisel 6.1,
kuid tuule kiirus 9 m/s.



Joonis 6.6. Järg joonisele 6.5. Tuule suund on 330° ning kiirus 9 m/s.



Joonis 6.7. Samad tingimused, mis joonisel 6.3,
kuid tuule kiirus 9 m/s.



Joonis 6.8. Järg joonisele 6.7. Tuule suund on 330° ning kiirus 9 m/s.

7. EHITUSAEGSE HELJUMI LEVIK

7.1. Mudeli seadistus

Süvendamisel ja idamuuli ning täiteala rajamisel tekkiva heljumi leviku modelleerimiseks kasutati programmi Delft3D. Esmalt arvutati lainetuse parameetrid moodulis WAVE kolmeastmelise skeemina, mille ülesehitus on kirjeldatud peatükis 3. Mudelites rakendati ühest suunast pidevalt puhuvat tuult ning tervet ala katvat ühtlast veetaset. Tuule kiirusteks valiti 90%-lised kvantiilid (vt tabelit 7.1), mis peegeldavad teatud tuule kiirust, mis esineb vaid 10% juhtudest ning on seega sobilik ekstreemsete tingimuste kirjeldamiseks süvendamis- ja täitmistööde ajal. Veetasemeks valiti lihtsustatult 0 meetrit. Mooduli WAVE viimase astme tulemused olid sisendiks moodulile FLOW. Selle arvutusvõrk kattis 1800×1600 m suurust ala ja lahutusvõime oli 5 ja 70 m vahel (suurenedes sadamast välja poole).

Tabel 7.1. Tuule kiirused erinevate suundade jaoks

	315°	345°	15°	45°
90%-line kvantiil	13	12	12	13

Simulatsioone teostati 18-tunnise ajavahemiku (01.–02.11.2017) vältel. Arvutuste ajaline samm oli 12 sekundit. Arvutusi ei seotud hüdroloogiliste ja meteoroloogiliste parameetritega konkreetsetel päevadel, mistõttu mudel ei peegelda situatsiooni valitud päevadel 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 seadimisprotsessid toimuda märgatavalt erinevalt tasakaalulisest situatsioonist ning nende väärtused ei ole realistlikud. Süsteemi kohanemisajaks valiti 360 minutit.

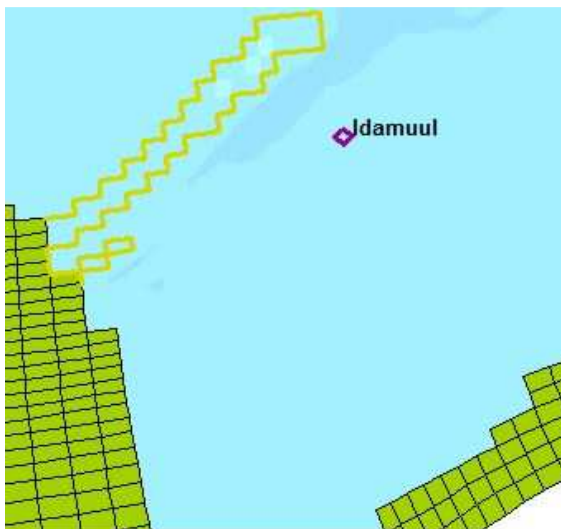
Idamuuli ja täiteala kehandi ehitamiseks kasutatakse eeldatavasti mineraalset täidet, mille suurus jääb enamjaolt 20 kuni 300 mm vahele. Täitmise ajal puhuvate tuulte ja levivate lainete mõjul kanduvad enim eemale väiksemad fraktsioonid. Konservatiivse hinnangu saamiseks on analüüsitud 0,1 mm liivaterade levikut veesambas. Peenete setete voog (10 kg/s) on valitud oletuslikult, sest ei ole teada peenosise hulk kasutatavas täites.

Süvendamisel tekkiva heljumi leviku analüüsimiseks kasutati OÜ IPT Projektijuhtimise töö andmeid. Kuna süvendusala lõikesse jäävad erinevad pinnaste kihid, siis valiti modelleeritavaks heljumiks peened mittekleepuvad saviosakesed, mis annavad arvutustes üldiselt kõige suurema leviala. Keskmine settimiskiirus on simulatsioonides 0,25 mm/s, mis vastab saviosakese settimiskiirusele seisvas vees (Dean ja Dalrymple, 2002). Setete voog (10 kg/s) on oletuslik, sest ei olnud teada kasutatav süvendustehnoloogia. Kuna peeneteraliste setete levikuala on põhiasas määratud settimiskiiruse ja hoovuse kiirusega, annab see valik adekvaatsed tulemused ning on õigustatud keskkonnamõju hindamiseks ja soovitude andmiseks.

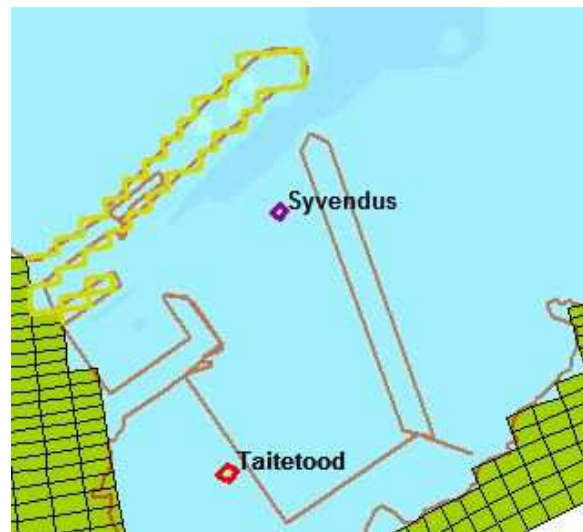
Kui süvendamis- ja täitmistehnoloogia erinevuse tõttu peaks olema tegelikult veesambasse paisatava osakeste kontsentratsioon või omadused erinevad arvutustes kasutatud suurustest, saab käesolevas aruandes esitatud tulemuste põhjal siiski hinnata tegeliku heljumi kontsentratsiooni, sest setete allika võimsus on lineaarses seoses heljumi hulga arvutusala mistahes punktis.

7.2. Heljumi levik

Ehitustegevusel tekkivat heljumi imiteeriti üksikusse võrgupunkti paigutatud konstantse intensiivsusega setete allika kaudu, mis aktiveeriti kindlaks ajavahemikuks (algus: 01.11 08:00, lõpp: 01.11 20:00). Selline lähenemine kirjeldab mõistlikul moel heljumi tekkimist ning vastab tavalisele praktikale, mille kohaselt ehitustehnika liigub tööalal edasi aeglaselt. Allika tegeliku paiknemise (nn süvenduspunktide asukoht kanali või akvatooriumi erinevates punktides) mõju heljumi leviku dünaamikale on üldiselt väike, kuid heljumi leviala on ulatuslikum siis, kui süvendustööd toimuvad võimalikult avamere pool. Vastavalt sellele määrati ka allikate asukohad (vt joonised 7.1 ja 7.2).



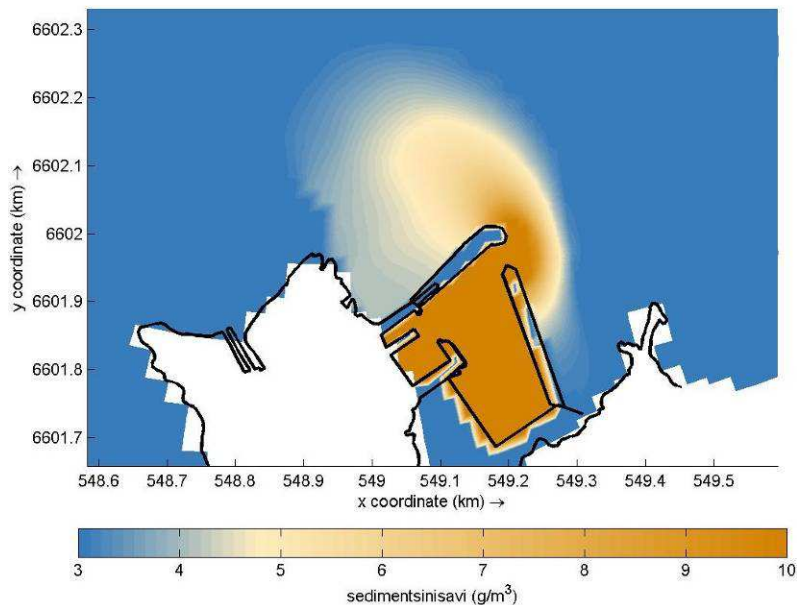
Joonis 7.1. Setete allika asukoht idamuuli rajamisel (Idamuul). Rohelisega on näidatud kuiv maapind, kollase ja pruuni joonega vastavalt põhjamuuli ja sadama kontuurid.



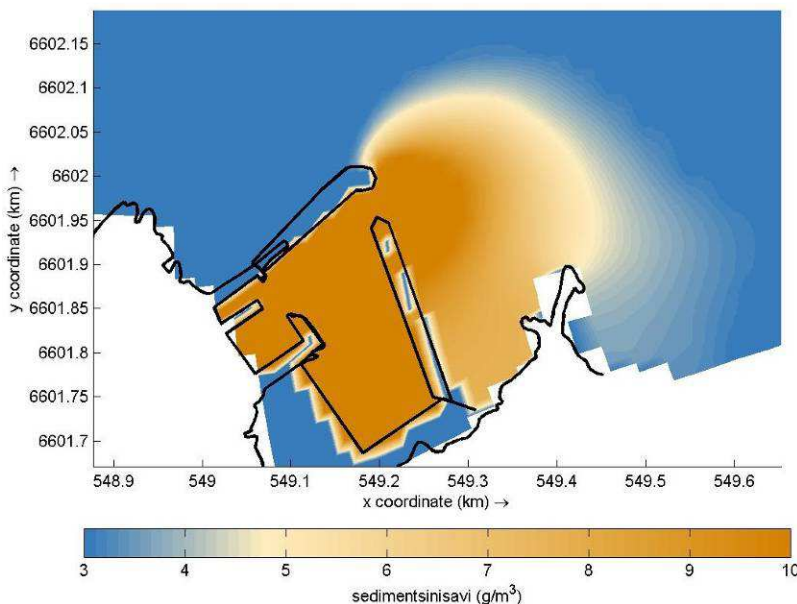
Joonis 7.2. Setete allika asukoht süvendamisel ja täiteala rajamisel (Syvendus ja Taitetood). Tingmärgid on samad, mis joonisel 7.1.

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). Kõrgeimaid kontsentratsioone on täheldatud aprillis, mil toimub fütoplanktoni kevadõitseng (Schneider jt 2006). Suurimad heljumi väärtused Ihasalu lahe avaosas esinevad aprillis ja juulis. Madalates piirkondades põhjustab kontsentratsiooni tõusu tuule poolt tekitatud resuspensioon. Raagi magistritöös välja toodud heljumi fooni kaartide ja graafikute põhjal võib valida heljumi kontsentratsiooni looduslikuks piiriks 3 g/m^3 .

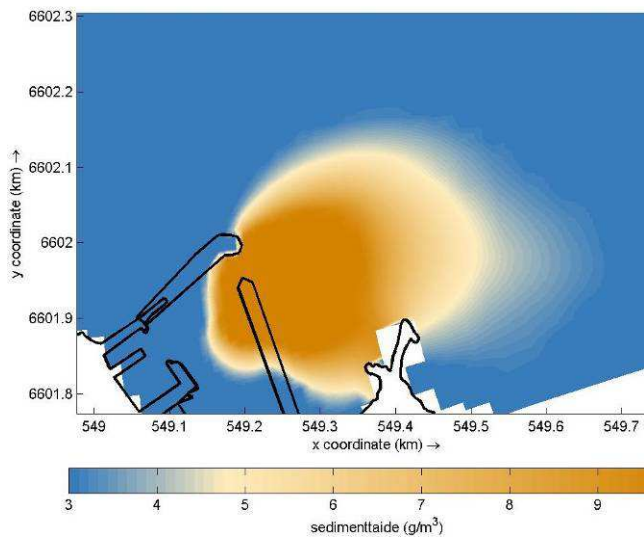
Simulatsioonide tulemused on antud joonistel 7.3 kuni 7.6. Neil on näidatud kõige ekstreemsemad juhtumid antud algtingimuste korral. Täiendav info heljumi leviku kohta on antud tabelis 7.2. Tulemustest on näha, et heljumi levimine on piiratud, kui täidetakse kavandatavat täiteala. Süvendamisel on võimalik heljumi levik sadama sissesõidukanalist välja poole. Keskkonnale see otsest ohtu ei kujuta, kuna süvendatud pinnases pole reostust.



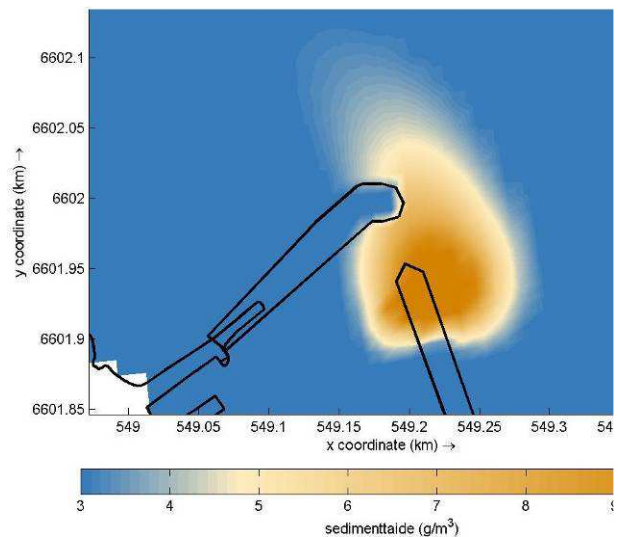
Joonis 7.3. Süvendamisel tekkiva heljumi levik idast (suund 45°) puhuva tuule korral.



Joonis 7.4. Süvendamisel tekkiva heljumi levik idast (suund 315°) puhuva tuule korral.



Joonis 7.5. Heljumi levik idamuuli täitmise ajal 2 tund pärast tööde algust. Tuule suund on 345°. Enne täiteala täitmist on rajatud idamuul, mis tagab madalad vee liikumise kiirused akvatooriumis.



Joonis 7.6. Heljumi levik täiteala täitmise ajal 1 tund pärast tööde algust. Tuule suund on 345°. Enne täiteala täitmist on rajatud idamuul, mis tagab madalad vee liikumise kiirused akvatooriumis.

Tabel 7.2. Heljumi kontsentratsiooni leviku piiri ligikaudne kaugus meetrites allikast

	315°	345°	15°	45°
Idamuul	300	450	350	300
Süvendamine	450	450	400	450
Täiteala	50	50	50	50

VIIDATUD KIRJANDUS

Baltic Sea Hydrographic Commission. 2013. Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3. Alla laetud lehelt <http://data.bshc.pro/> on 20.11.2016.

CIRIA/CUR. 2007. *The Rock Manual*. London.

Dean, R. G., Dalrymple, R. A. 2002. *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.

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

Schneider, B., Kaitala, S., Maunula, P. 2006. Identification and quantification of plankton bloom events in the Baltic Sea by continuous pCO₂ and chlorophyll a measurements on a cargo ship. *Journal of Marine Systems*, 59, pp. 238–248.

USACE. 2008. *Coastal Engineering Manual*. Part II.