

## **OÜ Lainemudel**

Registrikood: 14075763

e-post: lainemudel@gmail.com

Töö nr **1901**

Töö tellija: OÜ Skepast&Puhkim

Registrikood: 11255795

e-post: marju.kaiwapalu@skpk.ee

# **HAAPSALU LAHE RANNIKUVEEKOGUMI ANALÜÜSID**

## **IV köide**

### **Setete liikumise modelleerimine**

Töö autor:

**RAIN MÄNNIKUS**

Tallinn

Märts 2019

## SISUKORD

1. LÄHTEÜLESANNE .....	3
1.1. Eesmärk .....	3
1.2. Sisu .....	3
1.3. Lähtematerjalid .....	3
2. ALGTINGIMUSED .....	4
2.1. Haapsalu lahe setted .....	4
2.2. Veetasemed modelleerimiseks .....	4
2.3. Tuule andmestik .....	5
3. SIMULATSIOONID .....	7
3.1. Mudel Delft3D .....	7
3.2. Mudeli seadistus .....	7
3.3. Setete liikumine ja vooluhulgad püsiva tuule ja veetaseme puhul .....	12
3.4. Tulemuste analüüs ja võimalike süvendusalade valik .....	15
4. KOKKUVÕTE .....	17
VIIDATUD KIRJANDUS .....	18

# 1. LÄHTEÜLESANNE

## 1.1. Eesmärk

Setete liikumise ja võimalike süvendatud alade mõju analüüs Haapsalu lahes.

## 1.2. Sisu

- Analüüsitakse erinevate veetasemete ja lainetuse tingimustes setete liikumist olemasolevas olukorras. Andmed setete kohta on võetud 1996. aasta Eesti Geoloogiakeskuse tööst (vt ptk 1.3).
- Eemaldatakse setted 4 erinevas mahus ja kohas ning vaadeldakse vooluhulkade muutumist erinevates ristlõigetes Haapsalu lahes ning analüüsitakse setete liikumist süvendatud alal.
- Tehakse kokkuvõtted ja antakse soovitused.

## 1.3. Lähtematerjalid

- Kask., J. 1996. Haapsalu lahe, Mullutu-Suurlahe, Käina ja Voosi ravimuda leiukoha varu revisjon. I etapp. Haapsalu lahe ja Voosi ravimuda leiukoht. Eesti Geoloogiakeskus
- Veetasemete aegread Rohukülas ja Haapsalus
- Veeteede Ameti poolt edastatud sügavuste andmed Haapsalu lahes
- Vilsandi mõõtejaama tuuled

## 2. ALGTINGIMUSED

### 2.1. Haapsalu lahe setted

Haapsalu lahe rannajoon on väga liigestatud. Haapsalu lahe ümbruse pinnamood ja pinnakate on kujunenud hilisjäaja liustike kulutuse ja kuhjava tegevuse ning jääajajärgse mereliste protsesside tulemusel (Kask, 1996). Meresetted (liivad, aleuriidid) levivad väiksemas või suuremas paksuses kõikjal piki rannikut. Kuni 6 m paksune liivalasund moodustab Paralepas rohkem kui 2 km laiuse rannikutasandiku. Noarootsi poolsaare edelaosas on suures paksuses mereliivasid, milles esineb õhukesi kruusa vahekihte. Mereliivad katavad osaliselt ka Haapsalu linna idapiiril paiknevat viirsavi tasandikku.

Poolsaar, millel paikneb Haapsalu linn, jagab lahe läänepoolseks Eeslaheks ja idapoolseks Tagalaheks. Tagalahes on sügavam vaid süvendatud faarvaater (2,5 m). Läänepoolses osas on veesügavus 1–1,5 m. Idaosa sügavus on veel madalam (0,5–1,0 m). Tagalahes asub ka Haapsalu ravimuda leiukoht, mida on Eesti Geoloogiakeskus uurinud oma töös (Kask, 1996). Selle põhjal on muda mahukaal  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Haapsalu mudalasundi keskmine paksus on 0,43 m (Kask, 1996). Ravimuda ülemine kiht on hõljuvas olekus ning veega küllastunud. Mudalasundi all on peene- või keskmiseteraline liiv, millest sügavamale jääb suures paksuses (maksimaalne üle 3 m) viirsavi. Viimase lamamiks on omakorda moreen, mille paksust lahe piires ei ole teada.

Suur Holmi sadamakapteni Valdo Kivi järgi (autori personaalne informatsioon, 2019) on suur osa Tagalahe merepõhjast mudane ja kihi läbilõige võib ületada 0,5 m. Veetaseme kõikumistega tekib vee voolamine, mis põhjustab ka pindmiste setete liikumist. Viimane süvendamine toimus Haapsalu lahe laevakanalis sadamakapteni järgi nõukogude ajal ning sellest ajast saadik pole see setteid täis kandunud. Oluline roll on siin olnud mööda laevakanalit sõitvatel alustel, mis kanalit settematerjalist puhastavad.

Haapsalu lahes ei ole käesoleva aruande koostajale teadaolevalt uuritud rohkem merepõhja settekihtide paksust, lasuvust ning nende omadusi. Seetõttu kasutati edasises töös ravimuda kihi keskmist paksust 0,4 m ja füüsikalisi omadusi.

### 2.2. Veetasemed modelleerimiseks

Veetaseme kõikumised (kuni 230 cm) ja hoovused sõltuvad enim tuule suunast. Hoovuste kiirus lahtede avaosas on keskmiselt 15–25 cm/s, kuid maksimum võib ulatuda üle 60 cm/s (Martin, 2007). Tänu lahtede piiratud avatusele ei ületa lainekõrgus tavaliselt 1–1,5 meetrit, kuid juba 0,3 meetrised lained põhjustavad põhjasetete voo. Vaatamata tugevatele tuulehoovustele ei kannu need mudastunud põhjaseteid efektiivselt lahest välja ega too asemele liiva naaberaladelt (Eipre ja Pärn, 1982; Suursaar jt., 2003).

Haapsalus on meretasemeid mõõdetud aastatel 1945, 1947–1957, 1971–1987 ning automaatjaamaga alates 2010. aastast kuni tänaseni. Setete liikumise analüüsis tuleb vaadelda esmajoones

ekstreemseid olukordi, mille puhul on lainetusest ja tuulest tekitatud häiritused merepõhjas olevatele setete kõige suuremad. Seetõttu on oluline analüüsida võimalikult pikka ja pidevat aegrida. Haapsalu sadamas mõõdetud veetasemed selleks ei sobi, sest aastast 1971 kuni 2018 on kaetud vaid 25 aastat ehk veidi üle 50%. Seega rakendati käesolevas analüüsis sisendandmetena Rohuküla sadamas teostatud mõõdistusi, mis katavad järjest pikemat ajaperioodi.

Rohuküla sadamas teostati veetasemete mõõdistusi aastatel 1922, 1937–1940, 1950–1991 ning 1994–2013. Automaatjaamaga toimusid mõõtmised aastatel 2007–2013. Erinevused Rohuküla ning Haapsalu sadamates mõõdetud veetasemete vahel võivad ulatuda ligikaudu 5–15 cm-ni, lühiajaliselt võivad need ka suuremad olla (Lehte, 2010). Seetõttu on Rohuküla sadamas mõõdetud andmed sobivad iseloomustamiseks Haapsalu lahe veetaset. Analüüsiks kasutatud Rohukülas mõõdetud veetasemete aegrida katab aastaid 1950–2006, andmed on registreeritud kord 6 tunni jooksul. Aastate 1992–1993 kohta mõõtmisandmed puuduvad.

Ekstreemseid olukordi iseloomustavad käesolevas analüüsis kõrged veetasemed ning tugevad tuuled. Sõltuvalt modelleerimise viisist ja vajadustest, võib vaadelda kas maksimaalseid või teatud kvantiilidele vastavaid väärtuseid. Aegrea maksimaalsed väärtused esinevad kord aegreaga hõlmatud perioodi vältel, kuid nende teoreetiline korduvusperiood võib olla 100 või rohkem aastat. Selliseks näiteks on 2005. aasta jaanuari torm. Lahes plaanitavate süvendustööde puhul on aga mõistlikum võtta aluseks teatud kvantiilidele vastavaid väärtusi, mis oleks lähemal tavaolukorrale, kuid samas piisavad muutuste tekitamiseks. Kuna need olukorrad korduvad teoreetiliselt aastast-aastasse, siis vajavad need modelleerimisel pikemat ajamastaapi kui üks ekstreemne torm. Arvutusmahu kokkuhoiuks võimendatakse mudelis sellistes olukordades aset leidvaid muutuseid. Selline on tavapärane maailmapraktika (Roelvink ja Reniers, 2012). Käesolevas töös valiti kvantiiliksi 99%, millele vastav tuule kiirusvõib aastas korduda 30 korda. Ajaliselt teeks see 3,75 päeva (aluseks võetud Vilsandi tuuled on mõõdetud 3 tunni tagant, vt ptk 2.3).

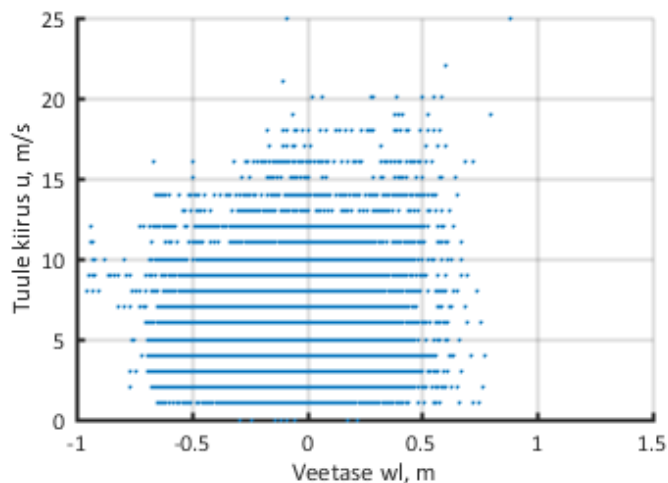
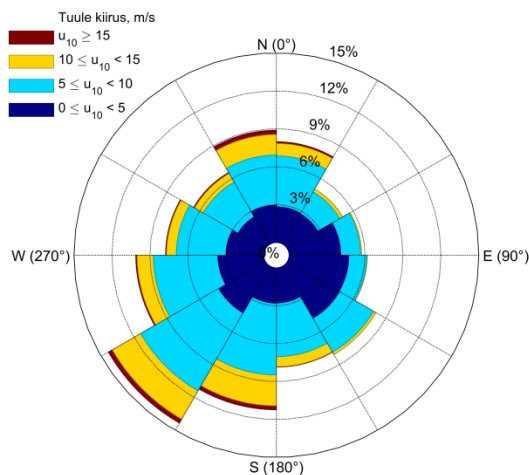
99%-lisele kvantiilile vastavaid veetaseme ja tuule olukordi kõrvutati situatsioonidega, kus veetase on muudetud 0 m peale. Väärtused arvutati 4 erineva ilmakaare jaoks. Valitud väärtused koos tuule suundade ja kiirustega on toodud tabelis 2.1.

### **2.3. Tuule andmestik**

Väinamerel ja seega ka Haapsalu lahes levivad lained on põhjustatud Läänemerel puhuvatest tuultest. Neid tuuli peegeldab üpris hästi Vilsandi mõõtejaama andmestik aastaist 1961–2015 (Joonis 2.1), mida käesolevas töös ka kasutati. Aastast 1961 kuni 1966. aastani mõõdeti tuult iga 6 tunni tagant. Pärast seda, kuni 30.09.2003, viidi mõõtmisi läbi 8 korda ööpäevas: 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 GMT +2 järgi. Hiljem mõõdeti tuule kiirust ja suunda iga tund.

Modelleerimisel tuleb vaadelda veetaset ja lainetust tekitavat tuult koos. Seega võeti aluseks periood, mil veetasemete ja tuule andmestikud kattuvad. Selleks on 1966–2003 (v.a. 1992 ja 1993). Tuule ja veetasemete ühisjaotus on toodud joonisel 2.2.

Ekstreemses situatsioonis vaadeldi 99% kvantiilile vastavat veetaset ja tuult. Neid olukordi kõrvutati situatsioonidega, mil veetase on 0 m. Valitud veetasemete väärtused koos tuule suundade ja kiirustega on toodud tabelis 2.1.



**Joonis 2.1.** Tuule suuna ja kiiruste jaotus Vilsandi mõõtejaamas.  $u_{10}$  tähistab 10 m kõrgusel mõõdetud tuule kiirust.

**Joonis 2.2.** Vilsandis mõõdetud tuule kiiruste ja Rohuküla veetasemete ühisjaotus kagutuulte ( $90^\circ$ – $180^\circ$ ) korral.

**Tabel 2.1.** Modelleerimisel aluseks võetud veetasemed ja tuulekiirused.

	$0^\circ$ - $90^\circ$		$90^\circ$ - $180^\circ$		$180^\circ$ - $270^\circ$		$270^\circ$ - $360^\circ$	
	u, m/s	wl, m	u, m/s	wl, m	u, m/s	wl, m	u, m/s	wl, m
<b>0 wl, 99% tuul</b>	14	0	14	0	17	0	17	0
<b>99% kvantiil</b>	14	0,42	14	0,46	17	0,70	17	0,72

### 3. SIMULATSIOONID

#### 3.1. Mudel Delft3D

Haapsalu lahe 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. 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.

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) geomeetria piirtingimustega piiratud võrgustikul.

#### 3.2. Mudeli seadistus

Süvendamise mõju uurimise jaoks arvutati esmalt lainetuse parameetrid moodulis WAVE. Selleks kasutati kolmeastmelist skeemi, kus esimeses arvutati lainetuse parameetrid Läänemeres suhteliselt tagasihoidliku lahutusvõimega (mudeli võrgu samm varieerus 500 ja 1500 m vahel). Teise astmena arvutati lainetust Väinamerel ning Hiiumaa ümbruses (võrk kattis  $92 \times 85$  km suurust ala ja lahutusvõime oli 1500 ja 800 m vahel). Kolmandas arvutati lainetuse parameetrid Haapsalu lahes (võrk kattis  $25 \times 10$  km suurust ala ja lahutusvõime oli 150 ja 50 m vahel teravdudes Tahu lahe suunas). Alumiste astmete arvutused tuginesid mudeli kõrgemates astmetes leitud lainetuse parameetritel. WAVE moodulis rakendati ühest suunast pidevalt puhuvat tuult ning tervet ala katvat ühtlast veetaset. Tuule kiirused saadi Vilsandi mõõtejaamast ning veetasemed Rohukülast.

Mooduli WAVE kolmanda astme tulemused olid sisendiks moodulile FLOW. Selles kasutati eraldiseisvat arvutusvõrku, mis kattis  $6100 \times 3400$  m suurust ala ja lahutusvõime oli 120 ja 15 m vahel.

Batümeetria alusandmed saadi Veeteede Ameti mõõdistustest ning Läänemere batümeetria andmebaasist (BSHC, 2013). Need interpoleeriti kasutatud arvutusvõrkudele Delft3D sisseehitatud tarkvara abil. Haapsalu linna modelleeriti käesolevas töös tõkkena, mis peegeldab 10% lainetest.

Simulatsioone teostati 24-tunnise ajavahemiku vältel. 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 kohanemisajaks valiti 720 minutit.

Modelleerimise ajakulu vähendamiseks ning tulemuste hõlpsamaks eristamiseks seati morfoloogiliseks faktoriks 10. See näitab, mitmekordselt on kiirendatud merepõhja muutumine. Sisuliselt vastab see 10-le järjestikusele tsüklile. Morfoloogilise faktori kasutamine on üldtunnustatud praktika (Roelvink ja Reniers, 2012).

Modelleeriti järgimisi stsenaariume:

0. olemasolev situatsioon
1. Tahu lahe kanal. Kujutab endast Tahu lahe põhjaosa ning Tagalahte ühendavat kanalit sügavama põhja näol (sügavus 2 m). Alamstsenaariumitena vaadeldi muutusi 0 m veetaseme puhul (1.0) ning 99% kvantiilile vastava väärtuse korral (1.1).
2. Tagalahe kanal. Kujutab endast süvendatud ala Tagalahe põhjaosas, tõhustamaks veevahetust Tagalahe idaosa ja Eeslahe vahel. Alamstsenaariumitena vaadeldi muutusi 1 m (2.1) ja 2 m (2.2) süvenduse sügavuse puhul.
3. Tagalahes 2 m süvendatud ala.

Kaks analüüsitud süvendusala (nn Tahu ja Tagalahe kanal) valiti välja võimaliku Noarootsi kanali pikenduseks. Võimalik kanal ühendaks Hara lahte Tahu lahega (vt käesoleva töö II köidet). Kolmas ala valiti laiem kui eelmised ning asetati Tagalahe keskele analüüsima süvendamise mõju lahe keskosale.

Iga stsenaariumi vaadeldi neljast erinevast suunast puhuva tuule korral. Kõikide puhul oli mudelis rakendatud 99% kvantiilile vastavaid tuule kiiruseid ja veetasemeid. Stsenaariumis 1.0 oli erandlikult rakendatud 99% kvantiilile vastavaid tuuli ning 0-veetaset. Kirjeldatud stsenaariumite merepõhjade sügavused on näidatud allolevatel joonistel (Joonis 3.1 kuni 3.4) ning süvendusala geomeetrisel näitajad on tabelis 3.1.

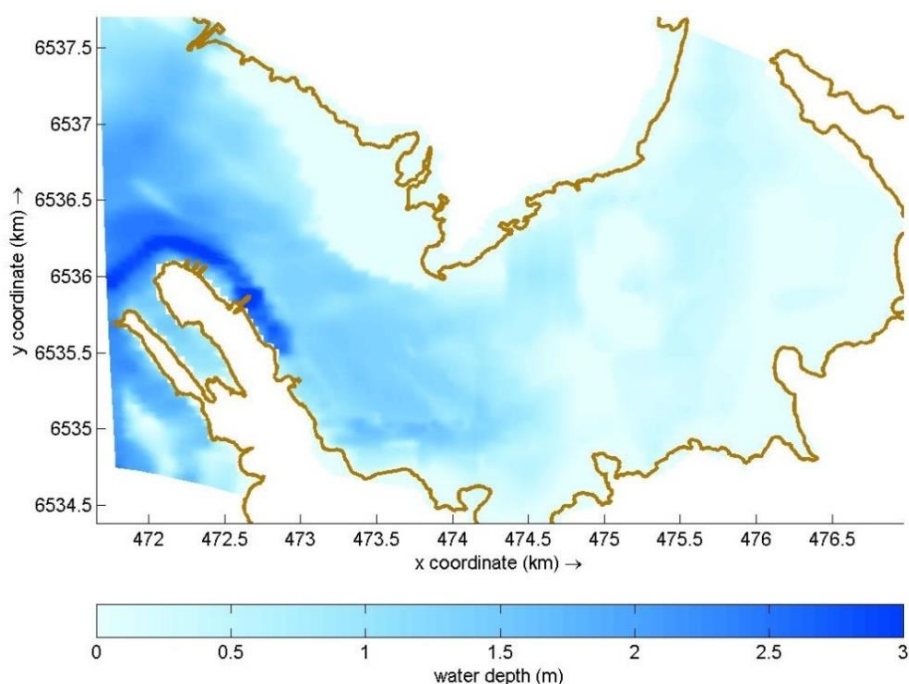
Esitatud stsenaariumite puhul uuriti nii setete liikumist kui ka seda, kuidas mõjutaks süvendamine Tagalahe veevahetust. See on kirjeldatav vooluhulga muutmisega mingis ristlõikes. Siin on vooluhulk vektoriaalne suurus, sest sellel on sõltuvalt vee voolamise suunast kas positiivne või negatiivne väärtus. Kuna tulemuseks on integraalne suurus kogu ristlõike ulatuses (üks väärtus teatud ajahetkel), siis võib reaalse vee voolamise korral olla tulemuseks ka 0, mis



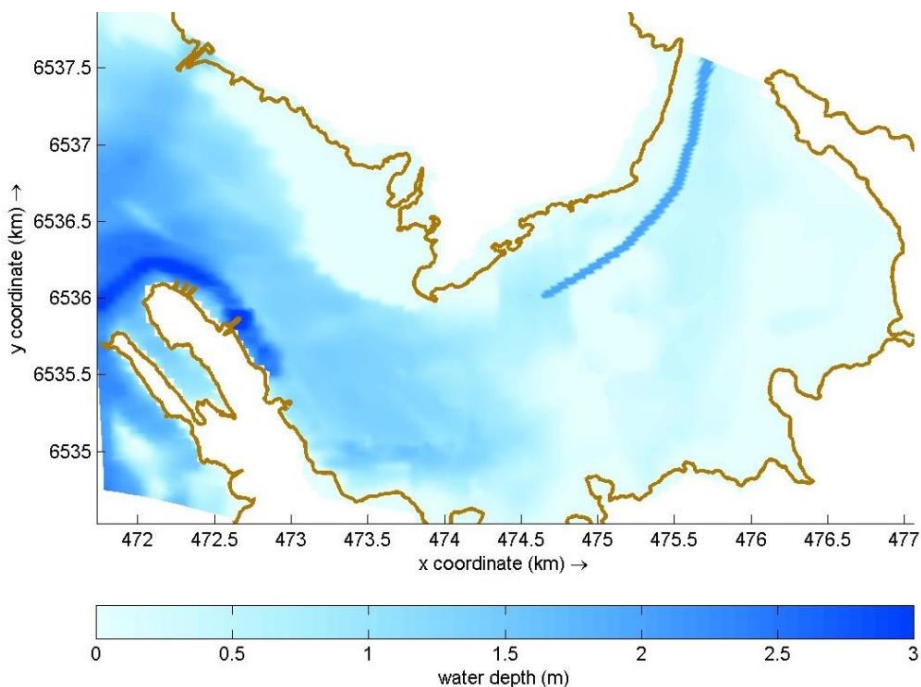
peegeldab seda, et teatud osas ristlõikes voolab vesi paremale, teises vasakule ning need tasakaalustavad teineteist. Pikemate ristlõigete korral ei ole välistatud ka mitmed suunamuutused. Käesolevas töös kasutatud ristlõiked on toodud joonisel 3.5.

**Tabel 3.1.** Süvendusalade geomeetriselised näitajad.

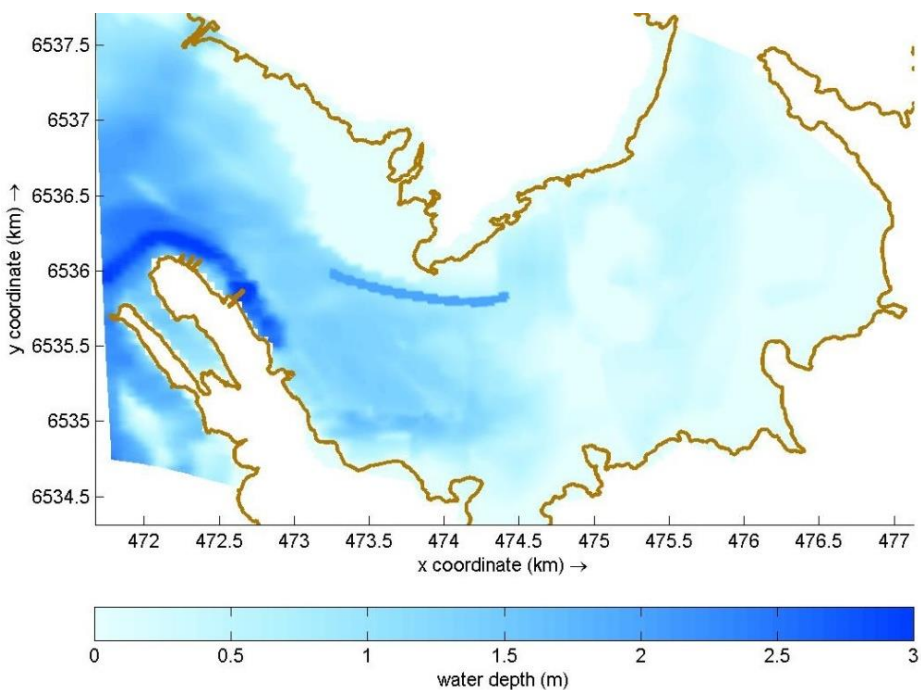
Jrk nr	Süvendusala nimi	Pindala A, m <sup>2</sup>	Sügavus d, m	Süvenduse maht V, m <sup>3</sup>
1	Tahu kanal	82000	2,0	51600
2.1	Tagalahe kanal	50500	1,0	38300
2.2	Tagalahe kanal	50580	2,0	53100
3	Tagalahe keskosa	102090	2,0	125450



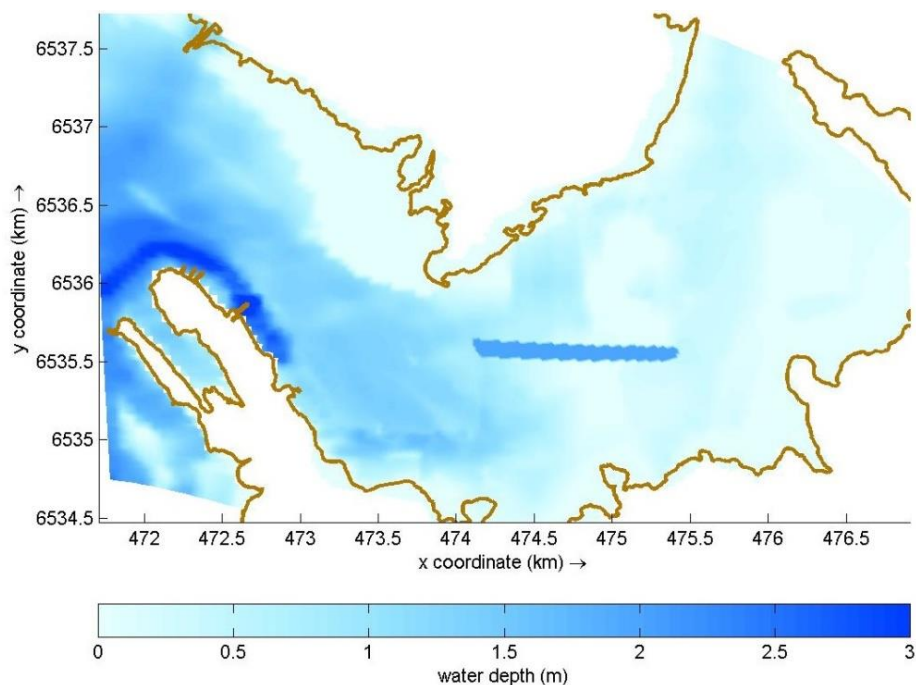
**Joonis 3.1.** Vee sügavused modelleeritava alal. Stsenarium 0 (olemasolev situatsioon).



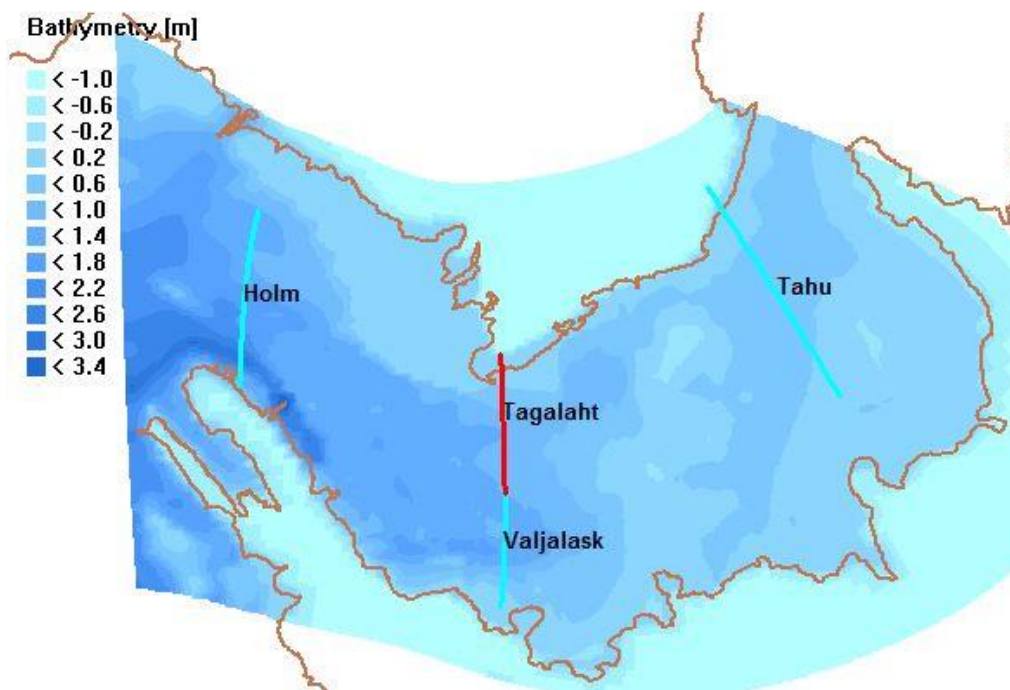
**Joonis 3.2.** Vee sügavused. Stsenariumid 1.0 ja 1.1: 2 m sügavune kanal Tahu laheni.



**Joonis 3.3.** Vee sügavused. Stsenarium 2.2: 2 m sügavune kanal Tagalahes. Stsenariumi 2.1 puhul on kanali sügavus 1 m. Muu on sama.



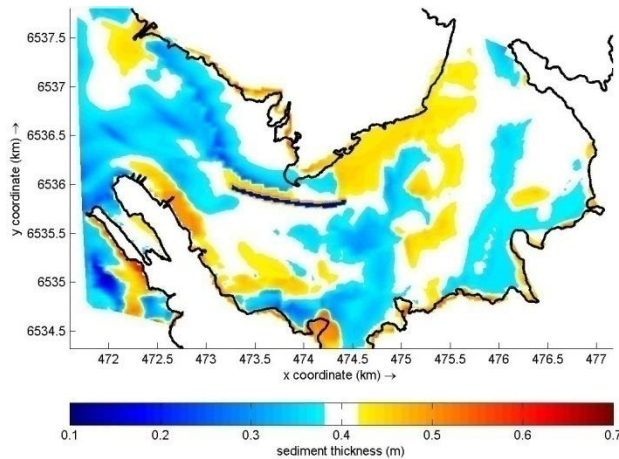
**Joonis 3.4.** Vee sügavused. Stsenarium 3: 2 m sügavune ala Tagalahe keskosas.



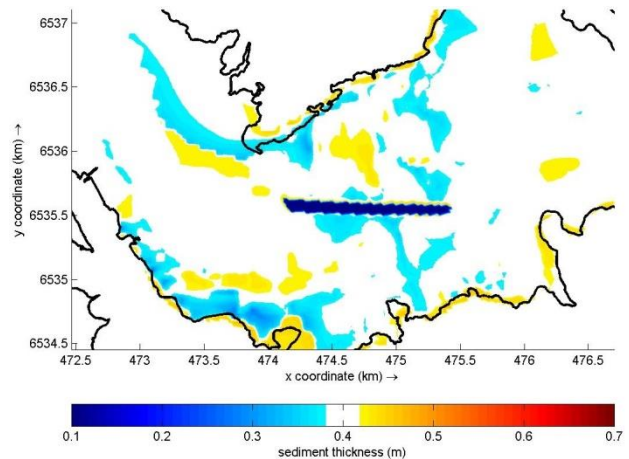
**Joonis 3.5.** Kujutletavad ristlõiked (helesinisega) Tahu lahes vee vooluhulkade mõõtmiseks. Ristlõige „Tagalaht” on ristlõikest „Valjalask” eristamiseks punasega.

### 3.3. Setete liikumine ja vooluhulgad püsiva tuule ja veetaseme puhul

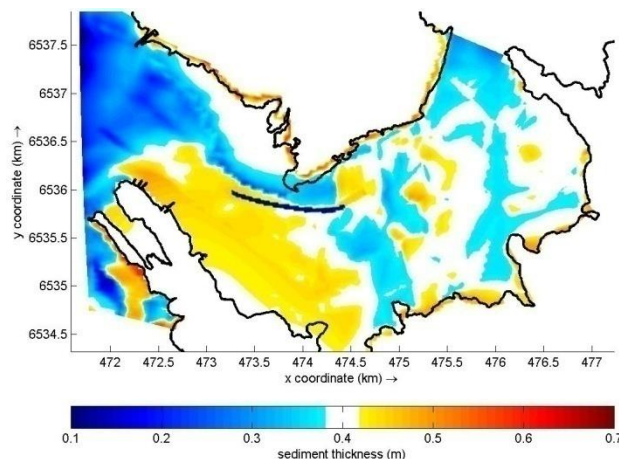
Ühest suunast puhuvate tugevate tuulte (99% kvantiilile vastav tuule kiirus) ning kõrgete veetasemete (99% kvantiilile vastav veetase) korral toimuvad muutused settekihis on näidatud joonistel 3.6 kuni 3.9. Setete liikumise iseloomustamisel tuleb meeles pidada, et tulemustes esitatav info on kvalitatiivne, kuna ei ole teada settekihtide paksused ja ulatused ega ka setete enda parameetrid. Praeguses analüüsis on need eeldatud ühe väikse ala uuringutulemustest.



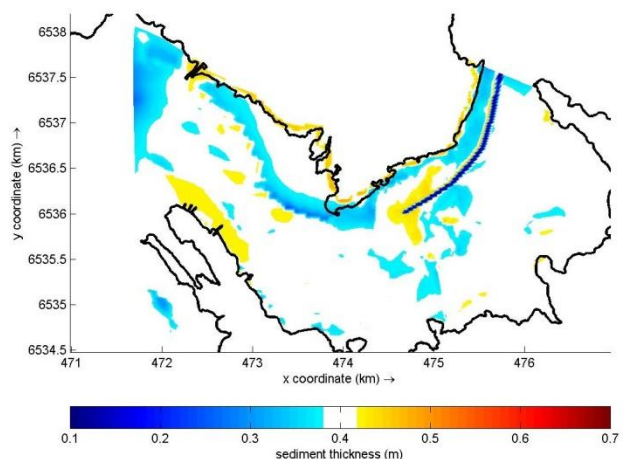
Joonis 3.6. Setete kihi paksus loodetuulega.



Joonis 3.7. Setete kihi paksus kirdetuulega.



Joonis 3.8. Setete kihi paksus edelatuulega.



Joonis 3.9. Setete kihi paksus kagutuulega.

Kõige suuremad on setete liikumised edelast puhuvate tuulte korral. Kuigi loodetuulte kiirus oli modelleerimisel sama ning veetase oli peaaegu võrdne, siis on edelatuulte korral Eeslahes setete erosioon ning Tagalahes akumulatsioon veidi suurem. See on põhjustatud ilmselt tuulelainete lähenemissuuna ja batümeetria koosmõjust, mis avaldub setete liikumise mustris. Idatuulte puhul on need liikumised vähese ulatusega, sest lühikese tuule jooksumaa tõttu Taga- ja Tahu lahe kohal on lained madalad.

Süvendatud alad pole modelleeritud andmete põhjal setetest ummistunud. Tagalahe idapoolsete osade puhul (Joonis 3.9) tuleneb see asukohast, mis on varjatud kõrgete lainete eest. Seetõttu on veosakeste liikumiskiirused madalad (üle veesamba keskmistatud vee liikumise kiirus on väiksem kui 10 cm/s, kui tuul kiirusega 17 m/s puhub edelast) ning nende erodeeriv mõju väheldane. Läänepoolsetel süvendusaladel on toimunud mõningane settimine (maksimaalselt 10 cm), kuid see on marginaalne, kuna hoovused on koondunud süvendatud kanalitesse. See on toonud kaasa vee liikumiskiiruse lokaalse suurenemise, mistõttu akumulatsioon pole võimalik. Kanalite täiskandumine toimub pikema aja jooksul kõikuva veetaseme tingimustes.

Stsenaariumite modelleerimisel leitud ristlõigete integraalsed vooluhulgad tuli teha üksteisega võrreldavaks. Mõõtmiseks kasutatud ristlõiked oli nimelt erinevate pikkustega. Seega jagati esmalt vooluhulgad ristlõigete pikkustega, misläbi saadi ühikuks L/s/m. Tulemused on toodud tabelites 3.3 kuni 3.6. Kuna tegu on väikeste integraalsete vooluhulkadega (vastassuunalised vooluhulgad tasakaalustavad teineteist), siis võib lugeda +/-15% muutused väheolulisteks.

**Tabel 3.2.** Tahu ristlõiget läbivad vooluhulgad (L/s/m) 0 stsenaariumi puhul erinevate tuulte korral ning nende muutused erinevate stsenaariumite (vt lk ) puhul.

Tahu	Stsenaariumid					
	0	1.0	1.1	2.1	2.2	3
Kirre (NE)	10 L/s/m	-69%	+20%	+0%	+0%	+0%
Kagu (SE)	9 L/s/m	-69%	+31%	+8%	+0%	+8%
Edel (SW)	11 L/s/m	-44%	+13%	-6%	-6%	-6%
Loe (NW)	4 L/s/m	-83%	-33%	-17%	+0%	-33%

Tahu ristlõikes on neljast vaadeldud ristlõikest kõige väiksemad vooluhulgad. See on seletatav ristlõike varjatud asukohaga. Veetaseme alanedes langeb tunduvalt (ligikaudu -70%) ristlõiget läbiva vee hulk (stsenaarium 1.0). Vaid edelatuultega on vooluhulga vähenemine väiksem kui pool 0-stsenaariumis arvatust (-44%). Kuna ülejäänud stsenaariumid (1.1, 2.1, 2.2, 3) on arvestatud 99% kvantiilile vastava veetasemega, siis on selge, et madalamatel veetasemetel on veevahetus oluliselt väiksem igasuguse muu pakutud süvendustöö (stsenaariumi) korral. Tagalahe põhjapoolsesse ossa kanali rajamisel (2.1 ja 2.2) on muutused väheolulised (alla 15%) pea kõikide tuule suundade korral. Seega ei mõjuta sealses asukohas mere põhja puhastamine Tagalahe idaosa ega sellest idasse jäävaid veekogusid. Pigem vähendab Tagalahe keskosa puhastamine (stsenaarium 3) vee liikumist ida pool loodetuultega.



**Tabel 3.3.** Ristlõiget „Tagalaht” läbivad vooluhulgad (L/s/m.) erinevate suundade ja stsenaariumite korral.

Tagalaht	Stsenaariumid					
	0	1.0	1.1	2.1	2.2	3
Kirre (NE)	14 L/s/m	-100%	+25%	+0%	-8%	+8%
Kagu (SE)	1 L/s/m	-100%	+300%	+300%	+300%	+400%
Edel (SW)	12 L/s/m	-90%	-20%	+0%	+20%	+0%
Loe (NW)	9 L/s/m	-38%	-13%	+0%	+25%	+13%

Ristlõikes Tagalaht on madala veetaseme korral (stsenaarium 1.0) vooluhulkade langus suur. Vaid loodetuultega on vähenemine väiksem, mis on põhjustatud teatud nurga all saabuvatest lainetest. Arvestamata võib jätta kagutuulest põhjustatud vooluhulkade muutused, kuna algse olukorra absoluutväärtus on võrreldes teistega väike. 100% langus stsenaariumis 1.0 ei pruugi tähendada vee liikumise täielikku lakkamist, vaid ristlõikes olevate voolude tasakaalustumist.

Tahu lahe kanali rajamine suurendab kirdetuulte korral veevahetust Tagalahe ristlõikes (tõus 25%), kuid edela- ja loodetuulte korral pigem vähendab. Tagalahe keskosa puhastamine ei oma mõju vooluhulkade muutusele. Positiivne mõju vooluhulkade suurendamise suunas on Tagalahe kanalil, mis läbib ka Tagalahe ristlõiget. Vee liikumise kiirus suureneb rajatatud kanalil.

**Tabel 3.4.** Ristlõiget „Valjalask” läbivad vooluhulgad (L/s/m.) erinevate suundade ja stsenaariumite korral.

Valjalask	Stsenaariumid					
	0	1.0	1.1	2.1	2.2	3
Kirre (NE)	7 L/s/m	-75%	+0%	+0%	+0%	+0%
Kagu (SE)	23 L/s/m	-75%	+13%	+6%	+6%	+13%
Edel (SW)	49 L/s/m	-76%	+3%	+0%	+6%	+6%
Loe (NW)	11 L/s/m	-50%	+0%	+0%	+13%	+50%

Ristlõikes Valjalask vähenevad vooluhulgad, kui veetase langeb (stsenaarium 1.0). Ülejäänud stsenaariumite puhul on näha, et ristlõikes ei toimu erilisi muutusi vooluhulkade suuruses (muutused alla 15%). Vaid loodetuulte korral suurendab Tagalahe keskossa rajatud süvend (stsenaarium 3) vee liikumise kiirust.

**Tabel 3.5.** Ristlõiget „Holm” läbivad vooluhulgad (L/s/m.) erinevate suundade ja stsenaariumite korral.

Holm	Stsenaariumid					
	0	1.0	1.1	2.1	2.2	3
Kirre (NE)	19 L/s/m	-83%	+15%	+0%	+0%	+10%
Kagu (SE)	21 L/s/m	-83%	-26%	+0%	+0%	+4%
Edel (SW)	35 L/s/m	-71%	+5%	-3%	+0%	-3%
Loe (NW)	1 L/s/m	-50%	+100%	-100%	+0%	+100%

Kuna Holmi ristlõige jääb Tagalahest kaugemale lääne poole, on tulemustest näha, et merepõhja puhastus- või süvendustööd mõjutavad vähe (muutused alla 15%) vooluhulkasid Holmi ristlõikes. Stsenaariumi 1.1 suurem mõju kirdetuulte korral on põhjustatud ilmselt vee liikumise kiirenemisest rajatud kanalis (tuul pressib vett Tagalahest Eeslahte). Sama efekti on näha ka teiste süvendamisalade puhul. Suured muutused loodetuulte korral (muutused ligikaudu 100%) on selgitatavad väga väikse absoluutse vooluhulgaga (1 L/s/m), mistõttu ei ole vaja neid tulemusi arvestada.

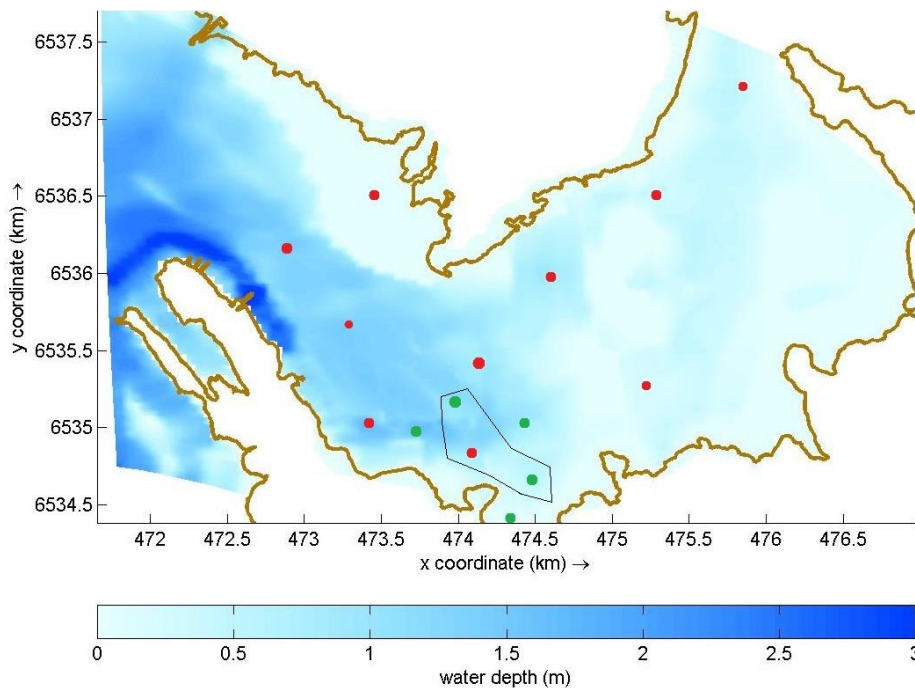
### 3.4. Tulemuste analüüs ja võimalike süvendusalade valik

Tulemustest nähtub, et kõige väiksem mõju vooluhulkade muutusele Haapsalu lahe kujutletavates ristlõigetel oli Tagalahe kanalil (stsenaarium 2). Tagalahe kanal paiknes kolmest analüüsitud süvendusvariandist kõige lääne pool ning oli osaliselt ka juba sügavamas vees. Valitud ala oli pindalalt ka kõige väiksem (Tahu kanal oli 1,62 ja Tagalahe keskosa kanal 2 korda suurem). Süvendussügavuse muutmine (1 m pealt 2 m) ei andnud Tagalahe kanali puhul efekti (võrdle stsenaariumite 2.1 ja 2.2 tulemusi). Vaid Tagalahe ristlõikes olid 2 m sügavuse süvenduse puhul edela- ja loodetuulte korral (s.t. avamerelt tulevad lained) vooluhulgad suuremad 20...25%.

Tahu kanali rajamine suurendas vooluhulki nii Tahu kui ka Tagalahe ristlõikes kõikide tuulesuundade korral (v.a. loodetuul). Valjalasu ristlõikes jäi mõju peaaegu olematuks, mis on selgitatav ristlõike asukohaga. Samas on Tahu kanali tõttu tekkinud muutused üpris väikesed suure süvendusmahu juures (51 600 m<sup>3</sup>): keskmiselt 10 L/s/m suurune algne vooluhulk suurenes 12 L/s/m-ni. Kas see viib elukeskkonna paranemiseni Tagalahes (ja ka Tahulahes), ei saa käesolevas töös selle piiratud mahu tõttu öelda, sest arvestada tuleb loomastiku ja taimestikuga, mis ei ole selle töö teema.

Tagalahe keskosa süvendamine suurendab kõige enam loodetuule korral ristlõike Valjalask juures vooluhulki. Teiste suundade puhul on mõju vaevumärgatav. Mõju on suurimast rakendatud alast (102 090 m<sup>2</sup>) hoolimata väike ka ristlõikele Tagalaht. Positiivne on ilmselt süvendusala mõju olemasoleva Haapsalu Veevärgi heitvee hajutamiseks. Kui heitvee väljalasu asukohta ei muudeta, siis oleks lokaalne merepõhja puhastamine/süvendamine tegevus, mida tuleks täpsemalt analüüsida (modelleerida) ja sobivuse korral ka rakendada. See ala peaks asuma

käesolevas töös käsitletud Tagalahe keskosa alast edelas ning hõlmama ligikaudselt sarnast mahtu/ala. Seejuures on täiendav analoogne uuring vajalik. See peab aga kindlasti põhinema täiendatud infol setete kohta, mille jaoks tuleb läbi viia ehitusgeoloogiline uuring. Selle käigus tuleks Haapsalu lahes (Suures Holmis ja sellest idas) võtta vähemalt 10 punkti. Võimalike punktide asukohad on näidatud joonisel 3.10. Planeeritaval süvendusalal tuleks punkte võtta lisaks veidi tihedamalt: vähemalt 250 m vahekaugusega. Need uuringupunktid peavad andma informatsiooni setete kihtide paksuse ja plaanilise lasuvuse kohta. Iga kihi kohta tuleb anda keskmine terasuurus ( $D_{50}$ ), mahukaal, settimiskiirus (mm/s), kriitiline pinge erosiooni algamiseks ( $N/m^2$ ) ning süvendusklass. Uuringupunktide sügavus peab olema vähemalt -2,0 m abs EH2000.



**Joonis 3.10.** Setete uuringupunktide asukohad. Punasega on näidatud uuringupunktid setete info saamiseks terve lahe kohta. Rohelisega on tähistatud täiendavad vajalikud punktid musta hulknurgaga tähistatud süvendusala uurimiseks.

Setete täpsema informatsiooni põhjal on võimalik hinnata täpsemalt süvendustööde sagedust. Praegusest rohkema info puudumisel on vajalik teostada pärast süvendamist vähemalt iga kahe aasta tagant kordumöödistust. Kui vähemalt kahe korra mõõtmised näitavad väikest muutust (alla 10 cm), siis võib pikendada intervalli kahe aasta võrra. Hinnanguliselt võib sõltuvalt asukohast toimuda kanalite täiskandumine 5 kuni 10 aasta jooksul. Maakerkega ei ole käesolevas töös arvestatud, kuna selle suurus 10 aasta jooksul (vähem kui 5 cm) on süvendustööde täpsust (rohkem kui 10 cm) arvestades väike.

Vee pealt muda süvendamistöde maksumuseks võib hinnanguliselt võtta 24 eurot/m<sup>3</sup> (kontrollida enne otsuse tegemist!). Kuupmeetri maksumus võib suureneada, kui süvendusmahtu jäävad raskesti kaevandatavad pinnased. Seega tuleb enne süvendustööde projekteerimist



kindlasti läbi viia vaadeldavatel aladel ehitusgeoloogilised uuringud, selgitamaks välja setete kihtide paksused, plaanilised ulatused, füüsikalised omadused ning süvendusklassid.

#### **4. KOKKUVÕTE**

Käesolevas töös modelleeriti Delft3D tarkvaraga setete liikumist Haapsalu lahes ning analüüsiti vee vooluhulkade muutusi erinevate süvendusstsenaariumite korral mitmes kujutletavas ristlõikes. Süvendusalade valikul lähtuti Keskkonnaameti soovitudest ning üritati analüüsida võimalikult erinevaid situatsioone. Info setete kohta võeti varem ilmunud uurimistööst Haapsalu lahe ravimuda kohta (Kask, 1996). Täiendavalt kasutati Veeteede Ameti sügavusi Haapsalu lahes, veetasemete mõõtmise aegridu Rohukülas ning Vilsandi mõõtejaama tuuli. Lähteandmed olid tööks piisavad.

Kaks analüüsitud süvendusala (nn Tahu ja Tagalahe kanal) valiti välja võimaliku Noarootsi kanali pikenduseks. Võimalik kanal ühendaks Hara lahte Tahu lahega. Kolmas ala valiti Tagalahe keskele. Perspektiivseteks osutusid Tahu kanal ning Tagalahe keskosast edelasse jääv ala. Esimest tuleks vaadelda koos võimaliku Noarootsi kanaliga (Hara lahest Tahu lahte), teist võimaliku moodusena hajutada Haapsalu Veevärgi heitvett Tagalahes. Viimase puhul on vajalikud täiendavad ehitusgeoloogilised uuringud ja setete ning vee liikumise modelleerimised.

Vee pealt muda süvendamistöõde maksumuseks võib hinnanguliselt võtta 24 eurot/m<sup>3</sup> (kontrollida enne otsuse tegemist!). Kuupmeetri maksumus võib suureneha, kui süvendusmahtu jäävad raskesti kaevandatavad pinnased. Seega tuleb enne süvendustööde projekteerimist kindlasti läbi viia vaadeldavatel aladel ehitusgeoloogilised uuringud, selgitamaks välja setete kihtide paksused, plaanilised ulatused, füüsikalised omadused ning süvendusklassid.

## VIIDATUD KIRJANDUS

Eipre, T., Pärn, M. 1982. Matsalu Riiklik Looduskaitseala ja selle ümbruse kliima ning veerežiim. Paakspuu, V. (toim.) Eesti NSV Riiklike Looduskaitsealade Teaduslikud Tööd, kd 3. Valgus, Tallinn, lk 4–42.

Kask, J. 1996. Haapsalu lahe, Mullutu-Suurlahe, Käina ja Voosi ravimuda leiukoha varu revisjon. I etapp. Haapsalu lahe ja Voosi ravimuda leiukoht. Eesti Geoloogiakeskus

Martin, G. 2007. Matsalu ja Haapsalu lahe seisundi täpsustamine ning seisundi vastavuse hindamine aastaks 2015 kehtestatud keskkonnaeesmärkidele. TÜ Eesti Mereinstituudi aruanne, 39 lk.

Roelvink, D., Reniers, A. 2012. A Guide to Modeling Coastal Morphology. Advances in Coastal and Ocean Engineering. Vol 12. World Scientific. London.

Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M. 2003. Modelling of flows, sea level variations and bottom stresses in the coastal zone of West Estonia. Brebbia, C.A., Almorza, D., Lopez-Aguayo, F. (eds.) Coastal Engineering VI Computer Modelling and Experimental Measurements of Seas and Coastal Regions. WIT Press, Southampton, pp. 43–52.