

LAINEMUDEL OÜ

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

Töö nr **2309**

Tellijä Lemma OÜ
Registrikood: 11453673
Asukoht PV3 ala Kalanast läänes, Hiiumaa

PV3 ALA KALAKASVANDUSE HÜDRODÜNAAMIKA EKSPERTARVAMUS

Autor:

Rain Männikus, PhD

Volitatud ehitusinsener tase 8. Sadamaehitus.

Aprill 2024

Tallinn

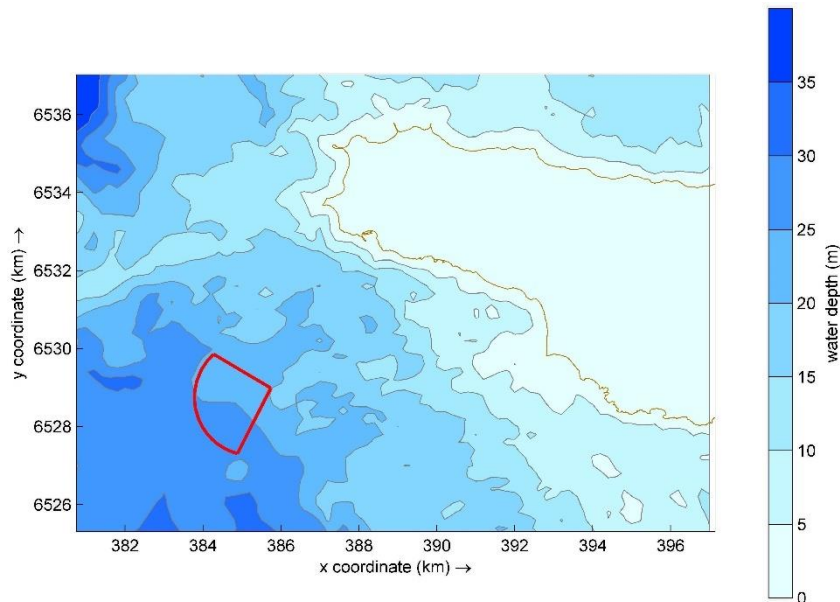
SISUKORD

1	LÄHTEÜLESANNE	3
1.1	Töö eesmärk ja sisu	3
1.2	Lähteinfo setete kohta	3
2	OLEMASOLEVA OLUKORRA KIRJELDUS.....	5
2.1	Lainekliimast üldiselt	5
2.2	Modelleeritud lainetus ja selle mõju kalakasvanduse setetele	7
3	SETETE LIIKUMISE MODELLEERIMINE.....	11
3.1	Programm Delft3D ja selle seadistus.....	11
3.2	Tulemused	12
	KOKKUVÕTE	21
	KASUTATUD KIRJANDUS	22

1 LÄHTEÜLESANNE

1.1 Töö eesmärk ja sisu

Hiiumaa rannikul, Kalana sadamast ca 4,5 km edelas, kavandatakse kalade sumbakasvandust alale PV3. Vajatakse hüdrodünaamika ekspertarvamus perspektiivse kalakasvanduse ala osas. Ala suurus on umbes 3 km² (Joonis 1.1).



Joonis 1.1. Kalakasvanduse asukoht on näidatud punase joonega, Hiiumaa (Kõpu ps) rannajoon pruuniga. Vee sügavused on erinevate sinistega. Kasutatud on Transpordiameti andmebaasi infot.

Ekspertarvamus sisaldab:

- olemasoleva olukorra kirjeldust (lainetuse ja setete liikumise vaatest)
- hinnangut lainetuse ja setete liikumise vaates kalakasvanduse poolt avaldatavate mõjude osas, sh setete kandumine rannikul paiknevatesse ujumiskohtadesse.
- vajadusel leevendavate meetmete soovitusi

1.2 Lähteinfo setete kohta

Kavas on paigaldada merre meresumbad koos ankurdussüsteemide ja muu selle juurde kuuluvaga vikerforellide/lõhe kasvatamiseks juurdekasvuga ca 2500 tonni aastas (söödakasutus 2750 tonni). Kavandatakse 12 sumpat, mis koos sumbaraamidega hõivavad mereala suurusega 1 x 1,5 km.

Kala tiheduseks on ühes sumbas arvestatud orienteeruvalt 10 kg/m³, seega on ühes sumbas kalade kogus ligikaudu 200 tonni ning seega maksimaalne kogus kalu kõikides sumpades kokku orienteeruvalt 2400 tonni. Aastane eeldatav kalade juurdekasv sumpades on ca 2500 tonni. Sööda kogus juurdekasvukordaja 1,1 korral on 2750 tonni aastas.

Arendaja esitatud andmete kohaselt lisandub eeldatavalt aastas vette keskmise toodangumahu korral lämmastikku:

$$N = \frac{(5,82 \times 2750) - (2,75 \times 2500)}{100\%} = 91,3 \text{ tonni}$$

ning üldfosforit:

$$P = \frac{(0,6 \times 2750) - (0,4 \times 2500)}{100\%} = 6,5 \text{ tonni.}$$

Sõltuvalt konkreetse aasta tingimustest võib lisanduv juurdekasv ning vette lisanduvate toitainete määr varieeruda 5–8%.

Kalakasvandused lisavad merekeskkonda toitaineid nii vees lahustunud kujul kui ka tahkete osakestena (settena). Lämmastikust u 80 % esineb lahustunud kujul ja 20% settib väiksemate osakeste näol merepõhja. Valdav osa fosforiemissioonist (96%) settib hüdroksüapatiidi, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, osakeste näol merepõhja. Hüdroksüapatiidi väljub toitainete ringlusest, kuna tegemist ei ole bioloogiliselt omastatava fosfori fraktsiooniga. Kalakasvatusest merepõhja settinud ülejäänud lämmastiku- ja fosforiühendite vormid kasutatakse normaalsete hapnikutingimuste esinemisel ära pikaealiste põhjaorganismide (nt. merekarpide) poolt (Kotta jt., 2022).

Kalakasvatases tekkiva sette (lahustumatu osa toitainetest ja orgaanilisest ainest) kogus on umbes $0,2 \text{ m}^3/\text{sööda tonni kohta}$ ehk kavandatava kalakasvanduse puhul 550 m^3 kasvatusperioodi jooksul (Lember, 2019).

Kalakasvanduste tahked heitmed tekivad söömata jäänud söödast ja kalade seedetrakti läbinud söödast. Sette osas on lisaks toitainete koormusele oluliseks aspektiks see, kas need võivad kuhjudes ohustada kõrge väärtusega elupaigatüüpe (juhul kui neid alal esineb), mida need võiksid enda alla matta. Kirjanduse alusel ei ole oodata setete olulist kuhjumist sumpade alusele alale juhul kui põhjalähedase kihi voolukiirused ületavad $0,08 \text{ m/s}$ (Yokohama jt, 2006).

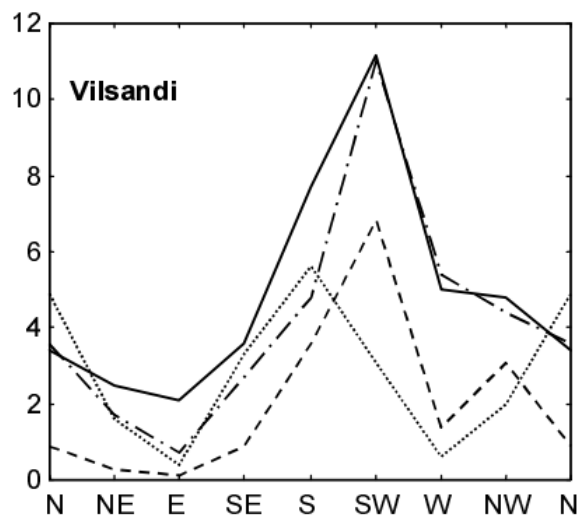
Tartu Ülikool uuris setete kuhjumist 2021 aastal Tagalahes. Mõõdeti kasvanduses tekkivate setete hulka ja keemilist koostist igakuiselt ning selle uuringu alusel on setete levimiseala ca 15–20 m sumba perimeetrist ning setete kihi paksus 2–4 mm, nende keemilise koostise analüüsimisel ei tuvastatud olulist mõju merepõhjale ja merepõhja elustikule. Kalakasvandus Läänemeres erineb Norra kalakasvandusest kuna kala on kõiguseojane ja Läänemeres on kalade intensiivne kasvatamine võimalik ainult 6–7 kuud aastas, mis tähendab et iga kasvatuse tsükli järel on merepõhja taastumisfaas 5–6 kuud ning Tagalahe kalakasvanduse uuringute põhjal võib väita, et merepõhi puhastub täielikult selle vaheperioodi jooksul (Kotta jt., 2022).

2 OLEMASOLEVA OLUKORRA KIRJELDUS

2.1 Lainekliimast üldiselt

Hiiumaa lääneosas on lainevälja kujunemine limiteeritud vaba veela olemasoluga (tuulejooksumaa), mida on ligikaudu 200 km loodetuulte (lainevälja küllastumisaeg ca 6–8 h), 300 km läänetuulte ja 550 km edelatuulte jaoks. Ekstreemsete lainete omadused Saaremaa läänerannikul on limiteeritud tuule suuna ning maksimaalse kiirusega (vähemalt 6 tundi kestev püsivast suunast puhuv tuul; Soomere, 2003).

Tugevad tuuled (rohkem kui 10 m/s) uuringualal puhuvad kõige sagedamini edelast ning kõige tugevamad tuuled, mida esineb suhteliselt harva, loodesuunast (Soomere ja Keevallik, 2001). Tugevate ning mõõduka tugevusega (rohkem kui 6 m/s) tuulte kaheharuline (edela- ning loodesuunaline) jaotus esineb Vilsandi mõõtejaama andmetel teostatud analüüsi põhjal kõikidel aastaegadel, ka suveperioodil (Joonis 2.2). Kuid kevade ja suveperioodidel esineb mõõdukaid ning tugevaid torme vähem kui sügisel ning talvisel ajal (Joonis 2.2, Soomere ja Keevallik, 2001).



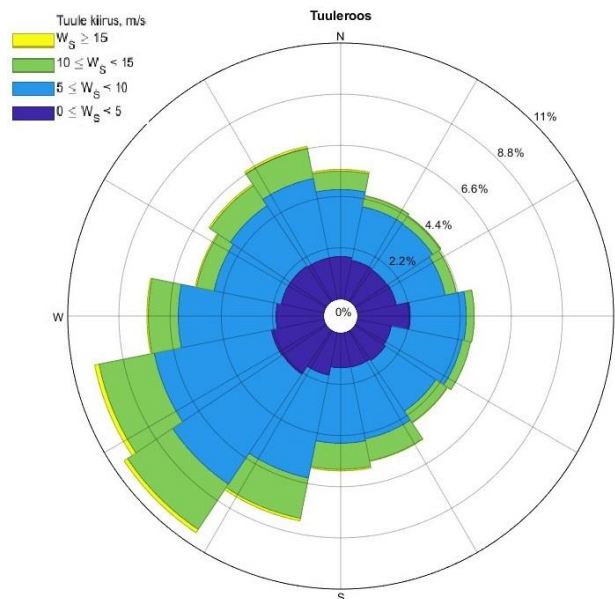
Joonis 2.1. Tugevate tuulte jaotus kõikide erinevatel aastaegadel suundade järgi Vilsandil 1977–1991 mõõdetud andmestiku põhjal. Pidevjoon: jaanuarikuu tuuled, täppidega punktiirjoon: tuulte jaotus aprillis, kriipsudega punktiirjoon: juuli ning kriipsude ja täppide kombinatsioon: oktoober. Jaotus on esitatud kõikide antud ajavahemikul tugevate tuulena (> kui 10 m/s) tähistatud sündmuste suhtes protsentuaalselt. Joonis ja analüüs on pärit artiklist Soomere ja Keevallik, 2001.

Soomere (2003) poolt teostatud analüüsi andmetel ulatub Saaremaa ning Hiiumaa vahele jäävas piirkonnas tuule kiirus tüüpilises tormis 15 m/s ja ekstreemses tormis 25 m/s. Tuulekiirusega 15 m/s (esineb tõenäosusega 2%) võivad tulemuseks olla 3 meetrise (või kõrgemad) olulise lainekõrgusega lained. Tuuli, mille kiirus ületab 15 m/s, esineb 10–20 korda aastas ehk ligikaudu korra kuus. Tuulekiirusega üle 20 m/s tekivad üle 5 meetri kõrgused lained. Maksimaalne Vilsandil mõõdetud (mõõtmisperiood 1977–1991) tuulekiirus on 25 m/s. Hinnanguliselt esineb selliseid tuuli kord 20 aasta jooksul, 26 m/s puhuvad tuuli kord 50 aasta jooksul ning korra sajandis

esineb tuuli kiirusega 27 m/s. Need andmed kirjeldavad tuule kiiruste keskmist mõne tunni ulatuses mitte maksimaalset puhangulisust.

Läänemere avaosa tuulerežiim on tugevalt anisotroopne, erinevatest suundadest saabuvate ekstreemsete tuulte kiiruste väärtused võivad üle kahe korra erineda, seetõttu on ka lainerežiim kõnealusel piirkonnas tugevalt anisotroopne (Soomere, 2003; Alari jt., 2008). Kõpu poolsaarel asub Ristna rannikujaam, kus mõõdetakse tuule kiirust ja suunda. Et see on põhja poolt osaliselt metsaga mõjutatud, siis kasutatakse käesolevas töös modelleeritud ERA-5 tuuli aastail 1991–2021 tuuleroosi koostamiseks (Joonis 2.2) ning ka lainetuse modelleerimiseks.

Soomere (2003) analüüsi andmetel on maksimaalne kagutuul (NNW) kiirusega 27 m/s ning esineb kord sajandis, samal ajal kui maksimaalne idatuul on ainult 11 m/s. Erinevatest suundadest saabuvate lainete kõrguste erinevus kõige ekstreemsemate tuulte korral on marginaalne. Kõige kõrgemad lained esinevad loodetormidega (Soomere, 2003; Alari jt., 2008), kus esinevad tuuled võivad genereerida Läänemere avaosas 10 m kõrguseid laineid, samal ajal kui idast saabuvad lained ei ületa 1,5 meetrit.



Joonis 2.2. Tuuleroos modelleeritud ERA-5 tuulte põhjal aastail 1990–2021.

Planeeritava kalakasvanduse piirkonnas esinevad hoovused peegeldavad üldjuhul suuremastaabilisi protsesse Läänemere avaosas ja Väinameres, kuid samuti keerukaid võnkumisi Liivi lahe ning Väinamere vahelistes süsteemides (Otsmann jt., 2001). Saaremaa looderannikul on keskmine pinnahoovuste liikumiskiirus vahemikus 4–10 cm/s, sealjuures on hoovused äärmiselt muutlikud ning sõltuvad lokaalsetest tuuletingimustest. Kiirusega üle 1 m/s hoovusi on registreeritud Suures väinas (Lips ja Liblik, 2012). Selliseid hoovusi kujundab peamiselt tuulepinge ja veetasemete erinevus Läänemere avaosa ning Väinamere vahel (Otsmann jt., 2001). Sügavas vees on hoovuste liikumiskiirused üldiselt väiksemad. Leppäranta ja Myrberg (2009) toovad välja, et Ahvenamaa juures oli 2002. aasta sügisel tuulest põhjustatud pinnahoovuste kiirus 5–15 cm/s, kuid 41 m sügavusel (põhja läheduses) 2–5 cm/s. Seega on alust uskuda, et hoovuste liikumiskiirused põhja läheduses on sarnased ka Kalana lähistel. Et

need on väiksemad kui Yokohama (2009) poolt esitatud piirkiirus sumpades tekkinud setete liigutamiseks, siis hoovuseid käesolevas töös ei analüüsita.

Läänemere avaosa veetase sõltub teguritest, mis mõjutavad merevee tihedust, veetaseme pikaajalist horisontaalset kõikumist ja lokaalset veetaset. Sellisteks teguriteks on veevahetus Põhjamerega, sissevool jõgedest, sademed, aurumine, energiavahetus vee ja atmosfääri vahel, atmosfäärirõhu ja tuulte mõju (Meier ja Höglund., 2013). Veetaset modifitseerivad ka baromeetiline tõus (tingitud veemasside liikumisest kõrgema õhurõhuga piirkondadest madalamate suunas) ja pikkade lainete levimine (Läänemere seišid). Tõusu-mõõna osakaal on Läänemeres minimaalne ning ulatub vaid mõne sentimeetriini.

2.2 Modelleeritud lainetus ja selle mõju kalakasvanduse setetele

Lainetuse modelleerimiseks on vaja tuule infot (kiirus ja suund eri ajahetkedel ja asukohtades). Pahatihti jääb mõõdetud tuulest selleks väheks, kuna mõõtejaamad ei ole paigutatud korrapäraselt, on erineva mõõtesagedusega jne. Seetõttu kasutatakse modelleeritud tuuli, mida on valideeritud mõõtejaamade suhtes. Käesolevas töös kasutatakse tuult ERA-5 andmebaasist, mille lühinimi on siin ERA-5.

ERA-5 on viienda põlvkonna globaalse atmosfääri analüüsil saadud tuul. Seda modelleerib European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ning mudeli tulemused on alates aastast 1979 kuni tänaseni (kirjutamise hetkel 2023. aasta keskpaigani). Tulemusi uuendatakse kolm korda aastas. Võrreldes oma eelkäijatega, kasutab ERA-5 kõige uuemat versiooni ECMWF Integrated Forecast System mudelist (IFS 41r2), millel on parem lahutusvõime ajas ja ruumis (vastavalt 1 tund, 0,25° ja 137 vertikaalset kihti) ning muud täiendused (vt lisaks Giudici jt., 2023). Käesolevas töös on tuul võetud 10 m kõrguselt merepinnast.

Modelleeritud tuult rakendati lainemudelis SWAN. Batümeetria saadi Balti mere (BSHC, 2013), ja Transpordiameti andmebaasidest. Mudelarvutustes kasutati kolmeastmelist skeemi, mille iga kõrgema järgu mudel kasutas madalama järgu mudeli tulemusi. Esimene võrk kattis tervet Läänemerd ning selle lahutusvõime oli 5000 m. Teine võrk kattis Liivi lahte ning selle lahutusvõime oli 1700 m. Kolmas võrk kattis muu hulgas Kõpu poolsaart ja selle lõunapoolset ümbrust ning selle lahutusvõime oli ca 260 m. Mudeli ülesehitusest ja valideerimisest vaata lähemalt töödest Giudici jt. (2023) ning Najafzadeh et al (2024). Mudelit jooksutati 1990–2021 andmetega (kokku 32 aastat). Allpool on viidatud mudelile kui „ERA-5“.

Modelleeritud lainetuse andmebaasist saadi lainetuse parameetrid punktis koordinaatidega 58,8798N ja 21,9216E. Vee sügavus oli seal $h_0 = 23,8$ m. Käesolevas töös leiti sellest andmejadast erinevatele protsentiilidele vastavad olulised lainekõrgused erinevate suundade korral. Neile leiti omakorda vastavad tipp-perioodid. Selleks vaadeldi konkreetse protsentiilist 20% suuremaid ja väiksemaid olulisi lainekõrgusi ning arvutati nendele vastavate tipp-perioodide keskmine.

Tabel 2.1. Erinevatele protsentiilidele vastavad olulised lainekõrgused (meetrites) eri suundades.

Protsentiilid / suunavahemik (kraadides)	0°–45°	45°–90°	90°–135°	135°–180°	180°–225°	225°–270°	270°–315°	315°–360°
70%	0,83	0,71	0,72	0,80	1,31	1,51	1,31	1,25
90%	1,38	1,13	1,03	1,25	2,01	2,34	2,10	2,08

95%	1,66	1,36	1,18	1,51	2,36	2,78	2,59	2,53
99%	2,10	1,82	1,62	2,00	3,14	3,68	3,60	3,41
99,863%	2,49	2,13	1,96	2,51	3,85	4,50	4,54	4,39

Olulise lainekõrguse H_s ja laine perioodi T_p põhjal on võimalik välja arvutada laine osakese põhjalähedane kiirus. Yokohama jt (2006) alusel ei ole oodata setete olulist kuhjumist sumpade alusele alale juhul kui põhjalähedase kihi voolukiirused ületavad 0,08 m/s. Viidatud artiklis vaadeldi sumpasid, mis asetsevad 18 m sügavuses vees.

Põhjalähedast kiirust arvutatakse järgmiselt ning Tabel 2.2 esitab need tulemused:

$$u_b = \omega a_b$$

, kus laine radiaalsagedus: $\omega = \frac{2\pi}{T_p}$

laineosakese orbitaalampliituud: $a_b = \frac{H_s}{2 \sinh(kh_0)}$

laine arv: $k = \frac{2\pi}{L_p}$

laine pikkus: $L_p = \left(\frac{gT_p^2}{2\pi} \right) \left[\tanh(2\pi\sqrt{h_0/g}/T_p)^{1,5} \right]^{2/3}$

Tabel 2.2. Erinevatele oluliste lainekõrguste protsentiilidele vastavad põhjalähedased vee liikumise kiirused (m/s) erinevates suundades. Punasega on näidatud olukorrad, kus Yokohama jt (2006) järgi on oodata setete olulist uhtumist sumpade alusel alal.

Protsentiilid / suunavahe (kraadides)	0°–45°	45°–90°	90°–135°	135°–180°	180°–225°	225°–270°	270°–315°	315°–360°
70%	0	0	0	0	0,05	0,06	0,02	0,02
90%	0,01	0	0	0	0,07	0,10	0,05	0,04
95%	0,01	0	0	0	0,09	0,12	0,07	0,05
99%	0,01	0,01	0	0,01	0,15	0,15	0,06	0,08
99.863%	0,01	0,02	0	0,02	0,17	0,22	0,24	0,18

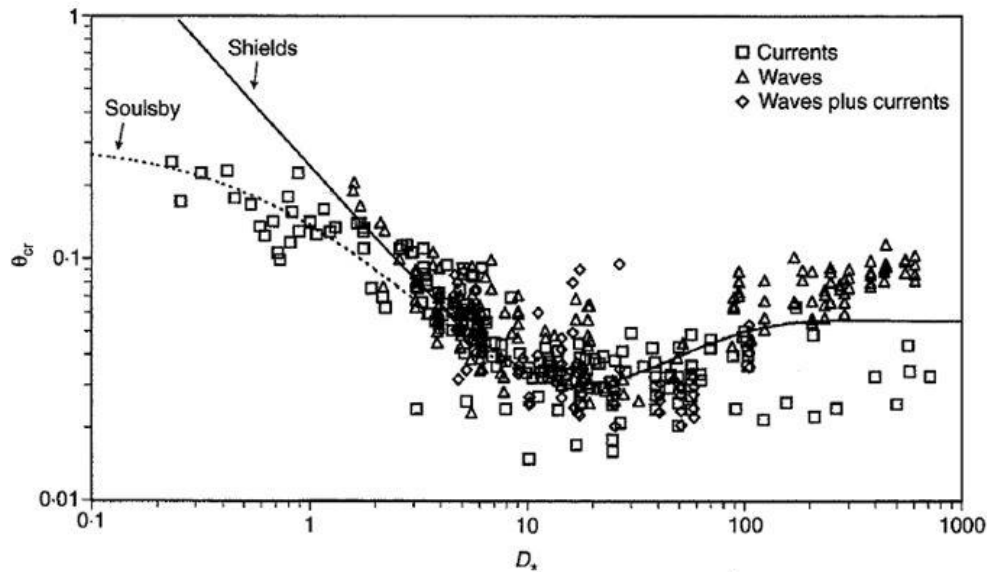
Teine võimalus setete liikumise võimalikkuse tõenäosuse hindamiseks on võrrelda lainetusest tingitud põhjahõõret setete liikumise läve diagrammiga. Eeldades keskmiseks terasuureks $d_{50}=0,1$ mm, saab arvutada tera suhtelise läbimõõdu järgmise valemiga

$$D_* = \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} d_{50}$$

, kus ν on vee kinemaatiline viskoossus 10° juures ning Δ tera ja vee tiheduse suhe. $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) = 1,65.$$

Sellele suhtelisele läbimõõdule vastav Shieldsi kriitiline parameeter (Joonis 2.3): $\theta_{cr} = 0,1$



Joonis 2.3. Setete liikumise läve diagramm lainete ja/või hoovuse puhul (Soulsby, 1997).

Lainetusest tingitud põhjahõõre leitakse järgmiselt: $\tau_w = 0,5\rho_w c_f u_b^2$

, kus c_f on hõõrdumise koefitsient: $c_f = 0,237 \cdot \left(\frac{a_b}{2d_{50}}\right)^{-0,52}$

ning a_b laineosakeste orbitaalamplituud

Põhjahõõrdele vastav Shields'i parameeter leitakse hõõrdepingest: $\theta = \frac{\tau_w}{\Delta g d_{50}}$

Kui leitud Shields'i parameeter θ ületab kriitilist Shields'i parameetrit θ_{cr} , siis järelilikult leiab aset setete liikumine.

Tabel 2.3. Erinevatele olulistele lainekõrguste protsentidele Shields'i parameetrid eri suundades. Punasega on näidatud olukorrad, kus kriitiline Shields'i parameetri väärtus ületatakse ning setted hakkavad liikuma.

Protsentid / suunavahemik (kraadides)	0°–45°	45°–90°	90°–135°	135°–180°	180°–225°	225°–270°	270°–315°	315°–360°
70%	0	0	0	0	0,13	0,18	0,04	0,04
90%	0,01	0	0	0	0,25	0,36	0,17	0,10
95%	0,01	0	0	0	0,34	0,53	0,18	0,15
99%	0,02	0,01	0	0,01	0,67	0,73	0,18	0,29
99,863%	0,03	0,04	0	0,05	0,87	1,20	1,36	0,95

Saadud tulemused näitavad erinevates suundades vastavatele protsentiilidele saadud väärtuseid. Kogutõenäosuse (juhtumi võimalikkus kogu ajaperioodil: 32 aastat) leidmiseks on toodud allolev tabel (Tabel 2.4). Näiteks 70% protsentiili ületavad juhtumid suunast 180°-225° levivate lainete korral leiavad aset tõenäosusega 5,73%.

Vaadates nüüd varasemat tabelit (Tabel 2.2) ning liites kokku iga tulba ülemise punase lahtriga numbrile vastava tõenäosuse allolevas tabelis (Tabel 2.4; $0,96+3,11+0,02+0,02=4,1$), saab öelda, et Yokohama jt (2006) poolt sätestatud põhjalähedaste osakeste piirkirrus ületatakse 4,1% tõenäosusega ehk 359 tundi (15 päeva) aastas. 0,1 mm osakese kriitilise Shields'i parameetri korral hakkavad osakesed liikuma 5,18% tõenäosusega ehk 454 tundi (19 päeva) aastas (Tabel 2.5).

Tabel 2.4. Erinevatele oluliste lainekõrguste protsentiilidele vastavad tõenäosused (%) perioodil 1990-2021 (32 aastat).

Protsentiilid / suunavahemik (kraadides)	0°–45°	45°–90°	90°–135°	135°–180°	180°–225°	225°–270°	270°–315°	315°–360°
70%	2,30	1,51	1,20	2,16	5,73	9,33	3,33	4,43
90%	0,77	0,50	0,40	0,72	1,91	3,11	1,11	1,48
95%	0,38	0,25	0,20	0,36	0,96	1,55	0,56	0,74
99%	0,08	0,05	0,04	0,07	0,19	0,31	0,11	0,15
99,863%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02

Tabel 2.5. Erinevatele oluliste lainekõrguste protsentiilidele vastavad ületamise tunnid ühes aastas.

Protsentiilid / suunavahemik (kraadides)	0°–45°	45°–90°	90°–135°	135°–180°	180°–225°	225°–270°	270°–315°	315°–360°
70	201,4	132,2	105,4	189,5	502,3	816,9	292,0	388,4
90	67,1	44,1	35,1	63,2	167,4	272,3	97,3	129,5
95	33,6	22,0	17,6	31,6	83,7	136,2	48,7	64,7
99	6,7	4,4	3,5	6,3	16,8	27,2	9,7	13,0
99,863	0,9	0,6	0,5	0,9	2,3	3,7	1,3	1,8

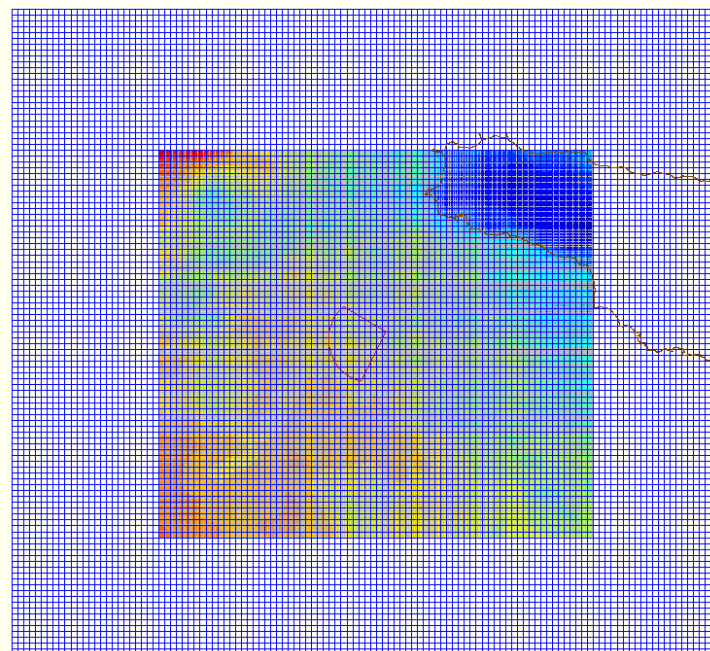
3 SETETE LIIKUMISE MODELLEERIMINE

3.1 Programm Delft3D ja selle seadistus

Käesolevas töös on setete leviku modelleerimiseks 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.

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.

Setete liikumise modelleerimiseks arvutati esmalt lainetuse parameetrid moodulis WAVE. Selleks ehitati võrk, mis kattis ala 25×22 km ning mille võrgusilma suurus oli 200 m (Joonis 3.1). Võrgu rajatingimustena kasutati lainetuse parameetreid, mis saadi modelleeritud tuulega ERA-5 lainemudelilt SWAN (vt pkt 2.2). WAVE mooduli tulemused olid sisendiks moodulis FLOW.



Joonis 3.1. Sinine ruudustik esitab WAVE võrgu ning värviline (sügavustega) taust FLOW võrgu. Pruuni joonega on näidatud Kõpu poolsaare rannajoon ning punasega keskel kalakasvanduse ala..

FLOW hüdrodünaamilise mudeli võrk kattis ala $14,8 \times 13,2$ km ning selle võrgusilma suurus varieerus 230...70 m vahel, olles tihedam Kalana kalakasvanduse ala juures (Joonis 3.1). Veesammas jagati võrdsetes osades viieks kihiks. Rajatingimustena kasutati veetaseme või Neumanni tingimusi. Batümeetria alusandmed saadi Transpordiameti mõõdistustest. Need interpoleeriti kasutatud arvutusvõrkudele Delft3D sisseehitatud tarkvara abil. FLOW võrgule rakendati muutuva suuna ja kiirusega puhuvat Vilsandi mõõtejaama tuult. Veetaset ei muudetud, see oli pidevalt keskmine. Sügavas vees (ca 23 m) ei mõjuta ca meetrised kõikumised lainetust ja selle mõju setetele.

FLOW mudeli sisendiks olid lainetuse parameetrid läbi mooduli WAVE lainemudelilt SWAN, mille radadele rakendati omakorda kolmeastmelise mudeliga SWAN arvutatud lainetuse parameetreid (oluline lainekõrgus, tipp-periood ja suund). Need parameetrid vastasid erinevatele protsentiilidele erinevates suundades. Mudeli FLOW enda põhilised parameetrid (viskoossus, põhjahõõre) jäid muutmata ehk algselt mudelis vaikimisi soovituslikeks.

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 võrreldes tasakaalulise situatsiooniga, mistõttu ei ole ka nende väärtused tihti realistlikud. Süsteemi kohanemisajaks valiti 360 minutit. Vee liikumise kiirused ja suunad arvutati mudelis 1 minutilise sammuga.

Kalasumpades tekkinud settematerjali modelleeriti erinevalt eelnevast mudana, mis katab 5-sentimeetrise ühtlase kihina osa kalakasvanduse alast, mille pindala on 26000 m². Kokku on seega setete maht 1300 m³. Kavandatavas kalakasvatuses tekkiva sette (lahustumatu osa toitainetest ja orgaanilisest ainest) kogus on umbes 0,2 m³/sööda tonni kohta ehk kavandatava kalakasvanduse puhul 550 m³ kasvatuseperioodi jooksul (Lember, 2019). Seega on modelleeritav settekogus tegelikult ca 2,3 korda suurem. See oli tahtlik, kuna sooviti analüüsida võimalikult suurelt alalt lenduva sette mõju. Uuringu koostamise ajahetkel polnud teada sumpade asend kalakasvanduse alas ning seega pandi need põhjapoolsesse ossa, et saada võimalikult konservatiivseid tulemusi.

Setete liikumise modelleerimine koosnes erinevatest simulatsioonides. Iga simulatsiooni kohta vastas üks konkreetne suund ja protsentiil. Näiteks 180°–225° tulevad lained, millede oluline lainekõrgus oli vastav 70%-le. Igal juhul modelleeriti muutumatute lainetuse parameetrite korral vee liikumist 42 tunni jooksul.

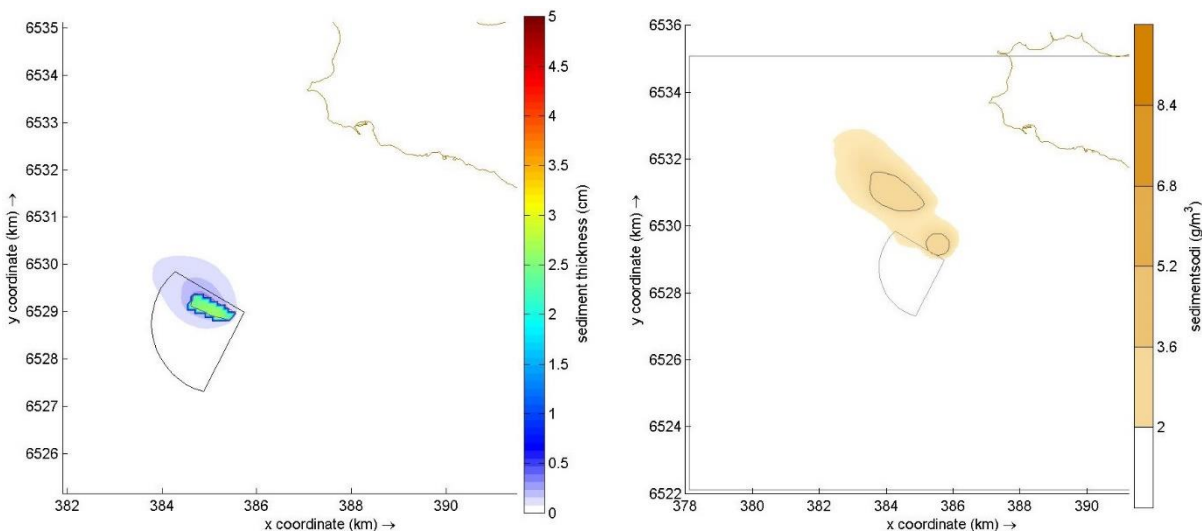
3.2 Tulemused

Allolevatel joonistel on toodud erinevate simulatsioonide korral settekihi paksus (meetrites) ning heljumi sisaldus veesambas (g/m³) simulatsioonide lõppedes. 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 kaardid kuu keskmiste kohta perioodil 2006–2011. Kalana lähistel on Raagi järgi aprillis 2, mais 1, juunis 1, juulis 2,5, augustis 1, septembris 2,5 ja oktoobris 3 g/m³. Kuna tormid leiavad aset pigem sügisel ja talvel, siis võeti alampiiriks joonistel 2 g/m³. Arvestada võib lisaks veel sellega, et mudelis on kasutatud ca 2,3 korda rohkem setteid, kui tegelikult aastas tekib ning seetõttu on ilmselt tegelik kontsentratsioon 2 korda väiksem. Seega sobib 2 g/m³ piiriks ka mais, juunis ja augustis.

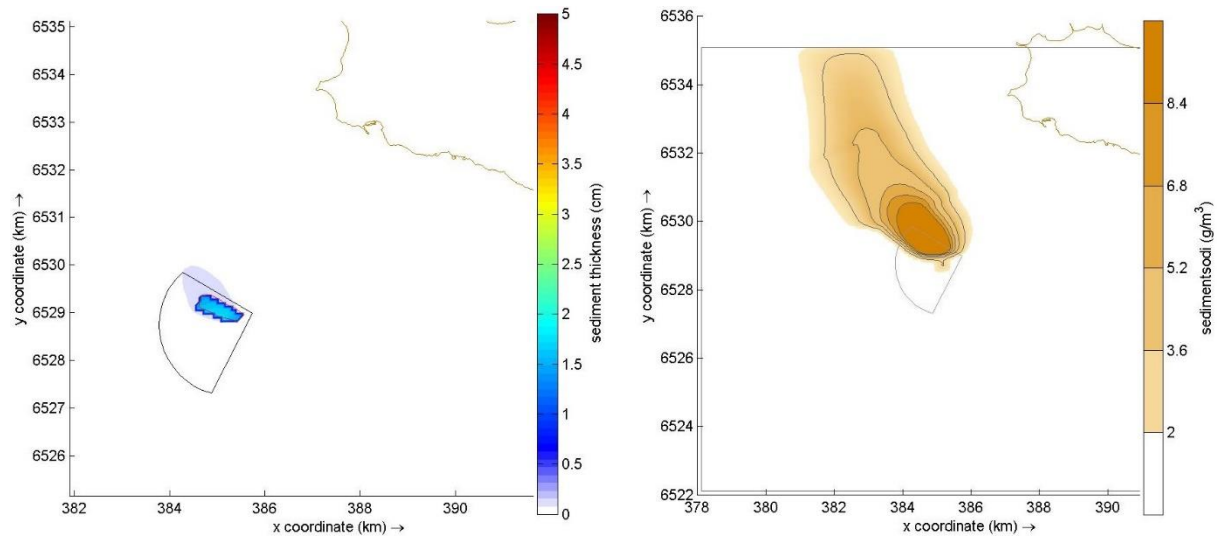
Esmalt on vaadeldud lõunast (180° – 225°) tulevaid laineid (Joonis 3.2...Joonis 3.4). Madalate lainete korral on liikumist oluliselt põhjas, kuid veepinnal on seda näha vähe (Joonis 3.2). Tugevamate tormide korral on veesambas keskosas näha setete laialdast liikumist (Joonis 3.3). Liikumine on suunatud põhja ja loodesse. Pärast 48 h on jäänud maha ca 2 cm setteid. Kuna statistiliselt võivad sellised tormid kesta kokku ca 84 tundi, siis võib eeldada, et aasta jooksul need setted sealt kaovad. Veel tugevamate tormide puhul (Joonis 3.4) on liikumine kiirem, kuid suund on sama. Ka kõige tugevama korral jääb setteid algsesse asukohta, kuid arvestades, et nõrgemad tormid liigutavad setteid juba minema, siis on alust arvata, et ka need lõpuks kaovad. Seega saab öelda, et aastaga kaovad setted kalakasvanduse alalt.

Edasi on modelleeritud läänest (225° – 270°) tulevate tormide korral heljumi liikumist (Joonis 3.5...Joonis 3.7), mis on suunatud läänest itta. Mida tugevam on torm, seda rohkem on heljumit pinnakihis. Kui lainetus levib loodest ja põhjast, siis levib heljum lõunasse (Joonis 3.8). Levik on veidi laiemal alal kui läänetuulte korral, kuid seda on vaid märgata ekstreemsete tormide korral. Heljumi leviku pildid on kooskõlast peatükis 2.2 arvatutuga.

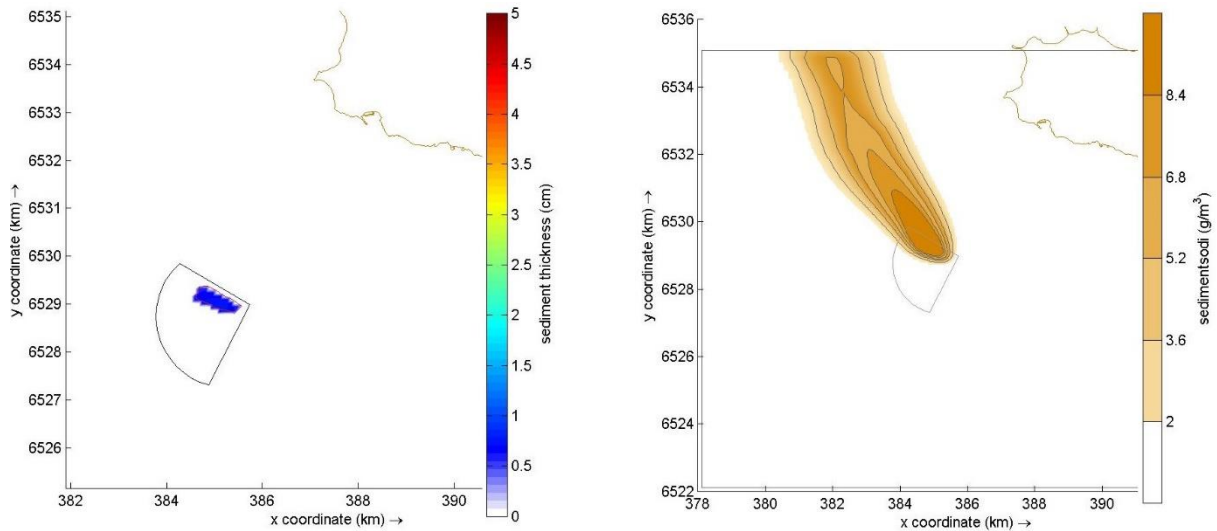
Järgmiseks on vaadeldud ekstreemset loodetormi (suunast 270° – 360° , Joonis 3.8). On näha, et sellisel juhul on heljumi liikumine suunatud lõunasse. Kuna lained on kõrged ja pikad, siis ulatub nende mõju põhjani ning setted liiguvad minema. Sellise tormi lõppedes (48 h) on järgi vähem kui 5 mm setteid. Vaadates tabelit 2.5, on näha, et sellise pikkusega torm on äärmiselt haruldane. Madalamate lainete korral on liikumine minimaalne või olematu (vt Tabel 2.2 ja Tabel 2.3). Minimaalse liikumise korral on ka see suunatud põhja.



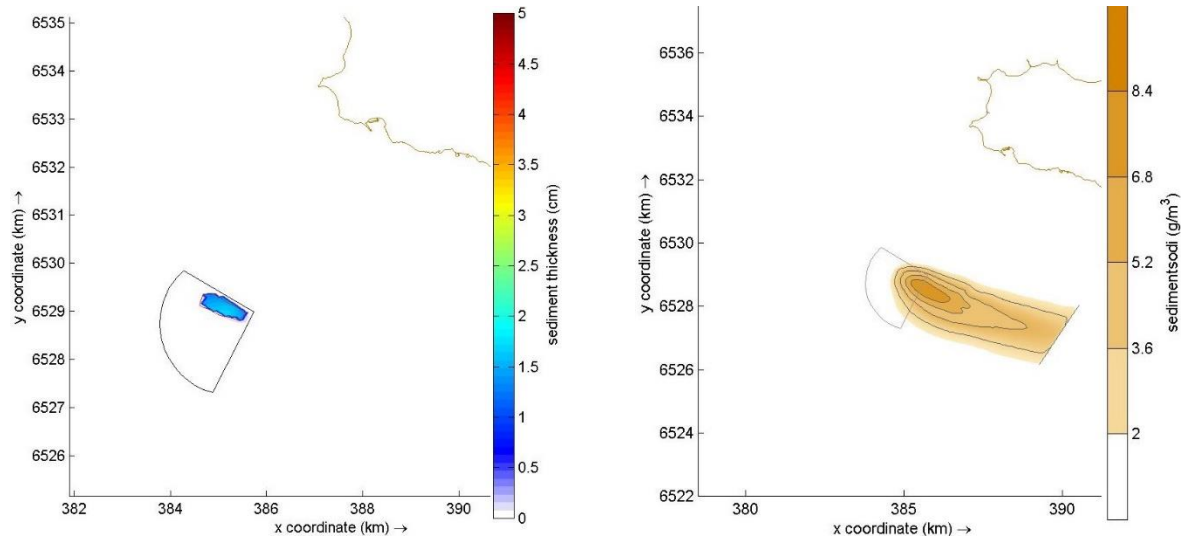
Joonis 3.2. Settekihi paksus pärast 48 h tundi lõunast (180° – 225°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesamba ülemises osas (20% paksune kiht veesambast). Lainetuse parameetrid vastavad 90%-lile ($H_s = 1,3$ m, $T_p = 5,6$ s).



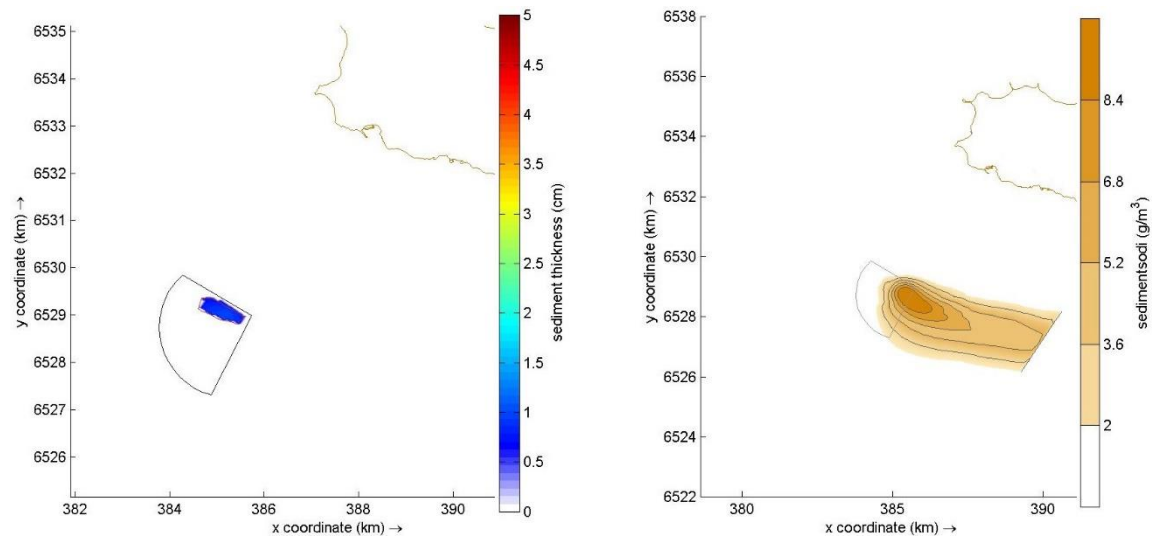
Joonis 3.3. Settekihi paksus pärast 48 h tundi lõunast (180° – 225°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesamba alumises osas. Lainetuse parameetrid vastavad 95%-lile ($H_s = 2,0$ m, $T_p = 5,9$ s).



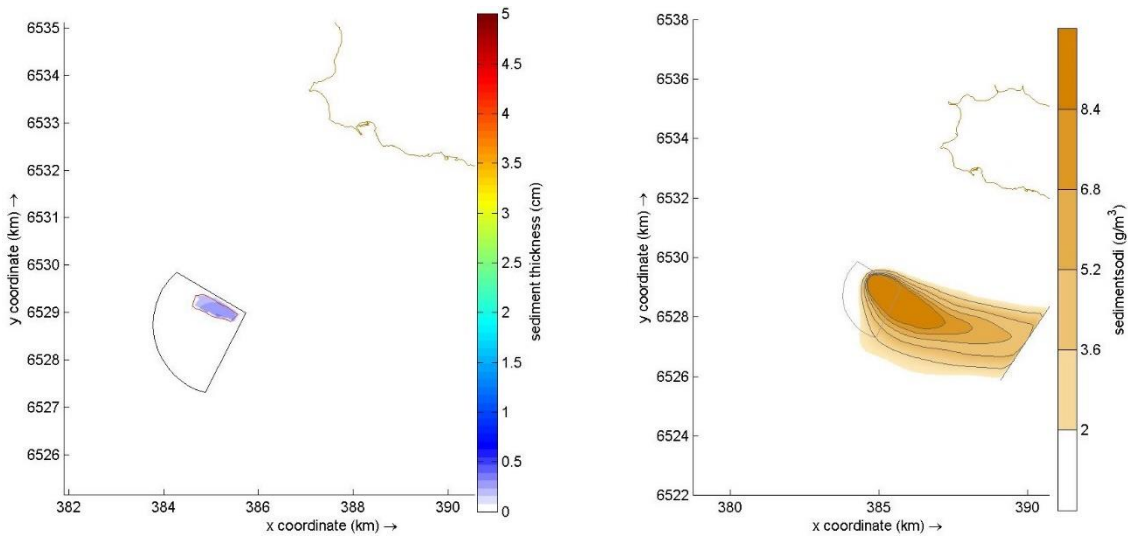
Joonis 3.4. Settekihi paksus pärast 48 h tundi lõunast (180° – 225°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesamba alumises osas. Lainetuse parameetrid vastavad 99%-lile ($H_s = 3,1$ m, $T_p = 5,9$ s).



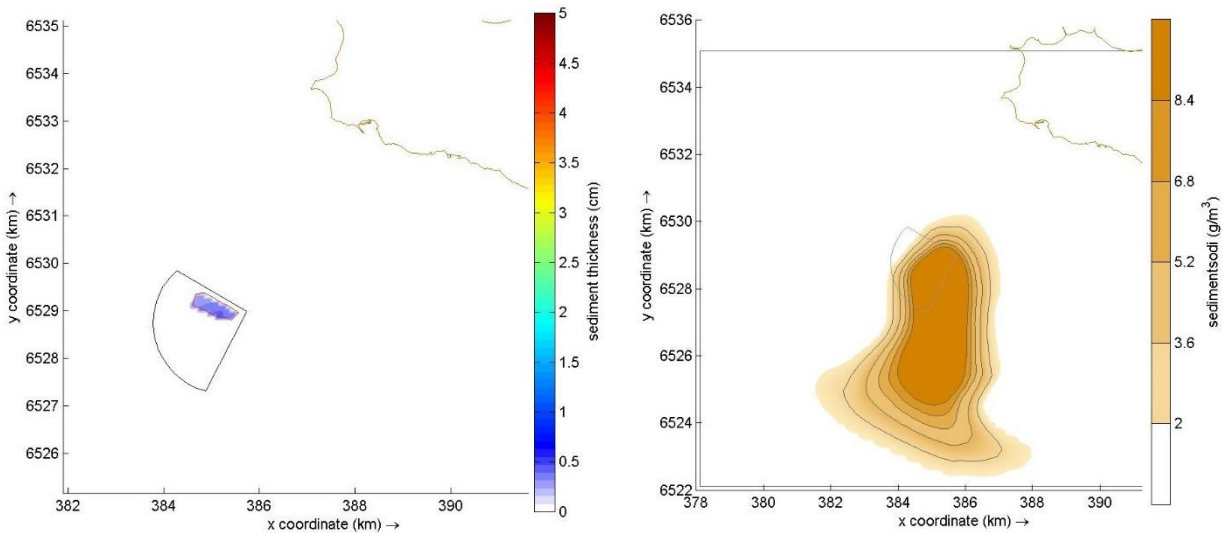
Joonis 3.5. Settekihi paksus pärast 48 h tundi läänest (225° – 270°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesambas. Lainetuse parameetrid vastavad 90%-lile ($H_s = 2,3$ m, $T_p = 5,7$ s).



Joonis 3.6. Settekihi paksus pärast 48 h tundi läänest (225° – 270°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesambas. Lainetuse parameetrid vastavad 95%-lile ($H_s = 2,8$ m, $T_p = 5,9$ s).



Joonis 3.7. Settekihi paksus pärast 48 h tundi läänest (225° – 270°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesambas. Lainetuse parameetrid vastavad 99%-lile ($H_s = 3,7$ m, $T_p = 6$ s).



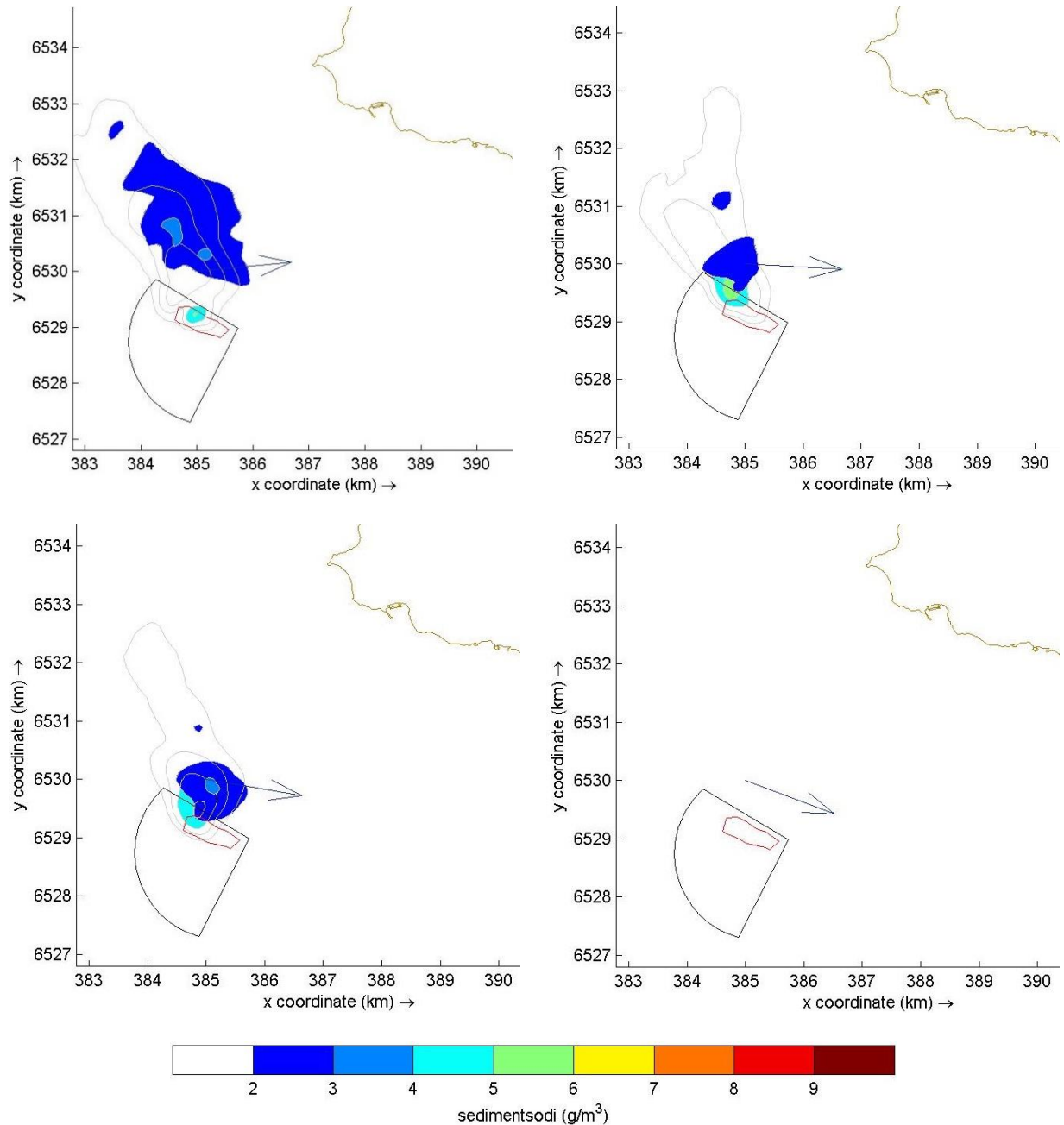
Joonis 3.8. Settekihi paksus pärast 48 h tundi loodest (270° – 315°) tulevaid laineid (vasakul). Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega. Paremalt on näidatud settekihi liikumisest tekkinud heljumi levik veesambas. Lainetuse parameetrid vastavad 99,863%-lile ($H_s = 4,54$ m, $T_p = 6,1$ s).

Lõpetuseks on vaadeldud tormide liikumise mõju. Kuigi teatud juhul saab toodud simulatsioonide mõjusid kokku liita, siis parema pildi annab muutuva lainetuse modelleerimine. Liikumise arvestamine annab juurde lisadimensiooni, mistõttu on selliste sündmuste tõenäosuse hindamine palju keerulisem. Käesoleval juhul on vaadeldud erinevate suundade arvutatud protsente ning näidatud selle sujuvat muutumist edelast loodesse 42 tunni jooksul. See annab rannalähedastele aladele kõige ebameeldivamad tulemused. Korruga vaadeldi erinevates kihtides toimuvaid heljumi liikumisi.

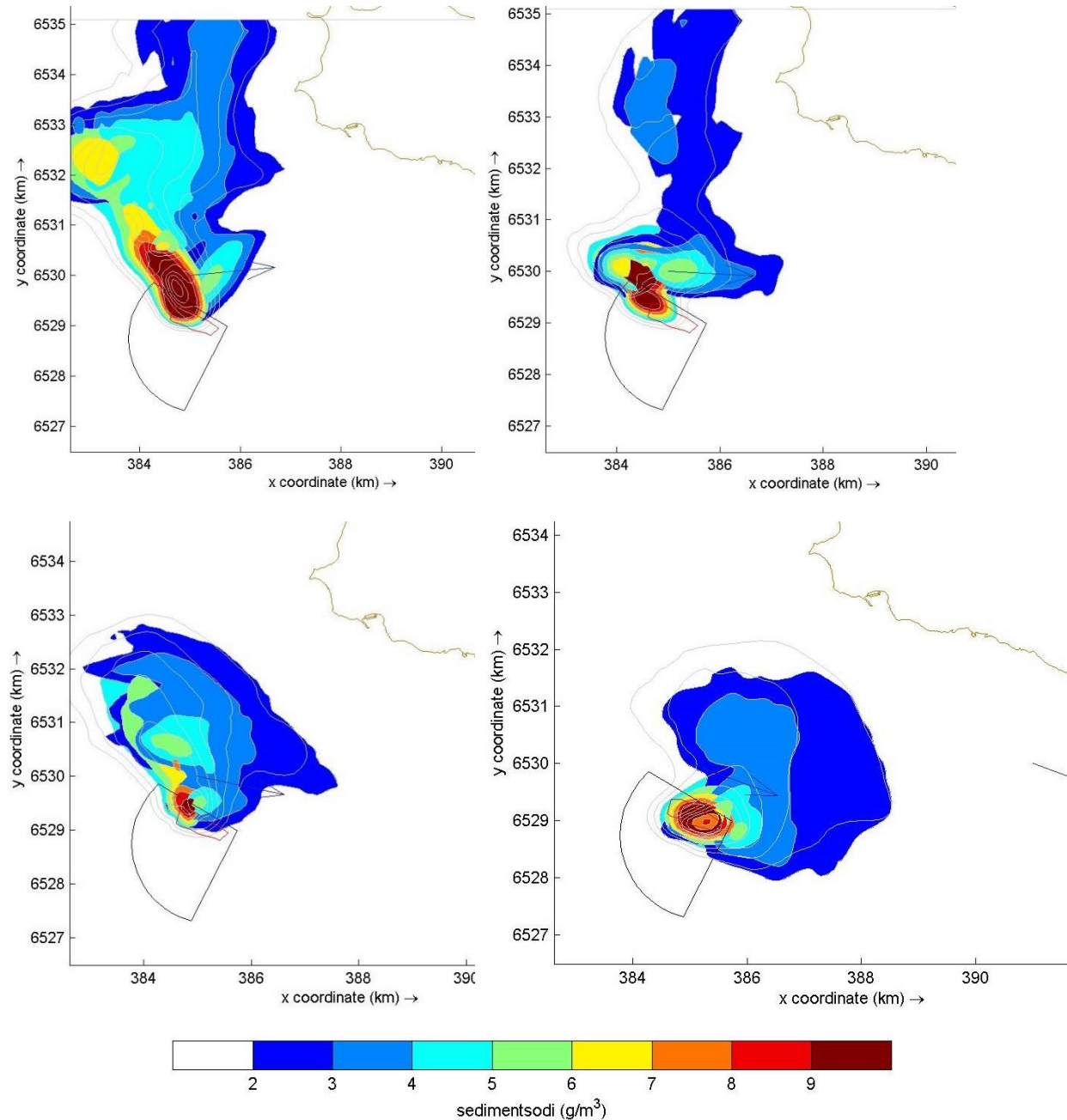
95%-iliste oluliste lainekõrguste korral on muutused üsna lokaalsed (Joonis 3.9). Pikemat settekeelt nagu muutumatutes laineoludes (Joonis 3.3 ja Joonis 3.6) ei jõua tekkida, kuna laine suund muutub pidevalt. Kui tuul on keerab põhja poole, siis heljumi levik väheneb alla piirmäära 2 g/m^3 . See on kooskõlas arvutatud liikuma hakkamise tingimustega (Tabel 2.2 ja Tabel 2.3 näitavad, et põhjapoolsete lainetega liikumist ei toimu).

Kui lainetus tugevneb (99% protsentiilile vastavad olulised lainekõrgused), siis on näha, et heljum levib oluliselt laiemal alal (Joonis 3.10). Liites kokku selliste sündmuste ületamise tunnid aastas (Tabel 2.5), saame, et see võiks juhtuda ca 50 tundi aastas. Modelleeritud ajavahemik oli simulatsioonis 42 tundi, mistõttu võib arvata, et heljum jääb 99% juhtudel rannajoonest vähemalt 1 km kaugusele.

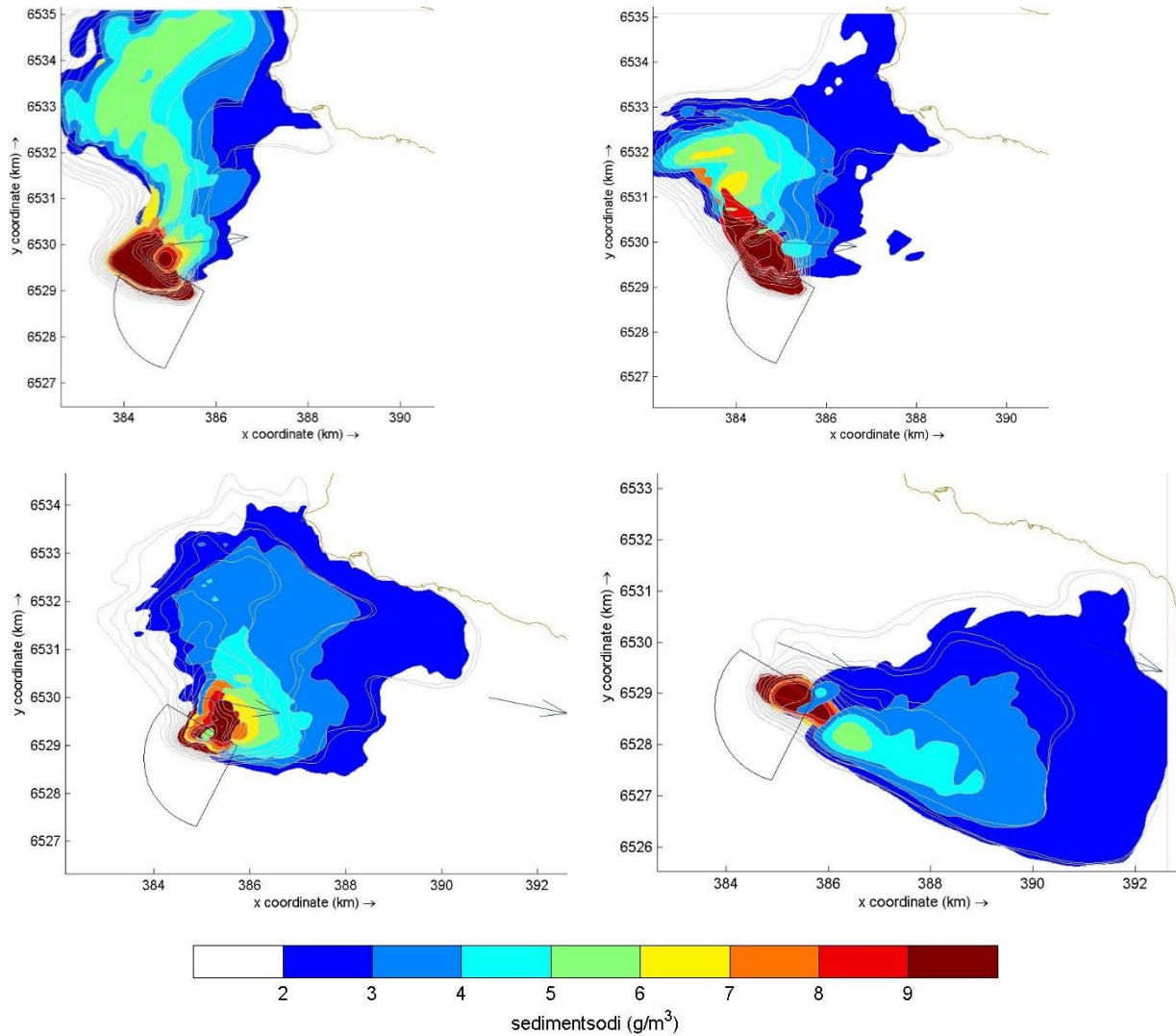
Kui aga leiavad aset ekstreemsed tormid (99,863% protsentiil; Joonis 3.11), siis levib heljum rannajoonele. Liites kokku selliste sündmuste ületamise tunnid aastas (Tabel 2.5), saame, et see võiks juhtuda ca 7 tundi aastas. Järelikult võiks statistiliselt toimuda selline olukord iga kuue aasta järel. Nende hinnangute puhul tuleb aga arvestada seda, et modelleeritud on settekihiga, mis on ekvivalentne kaheaastase kasvatamisperioodi jäätmetega, mida pole vahepeal kuhugi minema uhitud. Samuti asuvad need kõige lähemal rannale. Seega on tegu äärmisel konservatiivse hinnanguga.



Joonis 3.9. Settekihi liikumisest tekkinud heljum 8 h (üleval vasakul), 12 h (üleval paremal), 16 h (all vasakul) ja 20 h (all paremal) pärast. Kõige peal on veesamba ülemise kihi (20%) heljumi jaotus, allpool on halide joontega heljumi jaotus veesamba keskel ja alumises osas. Lainetuse parameetrid vastavad 95%-lile muutuvast suunast, liikudest 42 h jooksul edelast loodesse. Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega.



Joonis 3.10. Settekihi liikumisest tekkinud heljum 8 h (üleval vasakul), 12 h (üleval paremal), 16 h (all vasakul) ja 20 h (all paremal) pärast. Kõige peal on veesamba ülemise kihi (20%) heljumi jaotus, allpool on halide joontega heljumi jaotus veesamba keskel ja alumises osas. Lainetuse parameetrid vastavad 99%-lile muutuvast suunast, liikudest 42 h jooksul edelast loodesse. Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega.



Joonis 3.11. Settekihi liikumisest tekkinud heljum 8 h (üleval vasakul), 12 h (üleval paremal), 16 h (all vasakul) ja 20 h (all paremal) pärast. Kõige peal on veesamba ülemise kihi (20%) heljumi jaotus, allpool on halide joontega heljumi jaotus veesamba keskel ja alumises osas. Lainetuse parameetrid vastavad 99,863%-lile muutuvast suunast, liikudest 42 h jooksul edelast loodesse. Algse settekihi piirjoon on punasega. Kõpu poolsaare rannajoon on näidatud pruuni, kalakasvanduse ala musta ning arvutusala piir halli joonega.

KOKKUVÕTE

Hiiumaa rannikul, Kalana sadamast ca 4,5 km edelas, kavandatakse kalade sumbakasvandust. Vajatakse hüdrodünaamika ekspertarvamus perspektiivse kalakasvanduse ala osas. Ala suurus on umbes 3 km². Käesolevas ekspertarvamus kirjeldatakse olemasolevat lainetust ning arvutatakse kalakasvanduses tekkiva sette liikuva võimalikkust. Lisaks modelleeritakse setete liikumist kalakasvanduse alalt ümbritsevale alale ning analüüsitakse, millisel juhul on võimalik nende kandumine rannikul paiknevatesse ujumiskohtadesse. Lähteandmed saadi OÜ Lemmalt ning Transpordiameti andmebaasist. Need olid tööks piisavad.

Tugevad tuuled (rohkem kui 10 m/s) uuringualal puhuvad kõige sagedamini edelast ning kõige tugevamad tuuled, mida esineb suhteliselt harva, loodesuunast (Soomere ja Keevallik, 2001). Tugevate ning mööduka tugevusega (rohkem kui 6 m/s) tuulte kaheharuline (edela- ning loodesuunaline) jaotus esineb Vilsandi möötejaama andmetel teostatud analüüsi põhjal kõikidel aastaegadel, ka suveperioodil. Soomere (2003) poolt teostatud analüüsi andmetel ulatub Saaremaa ning Hiiumaa vahele jäävas piirkonnas tuule kiirus tüüpilises tormis 15 m/s ja ekstreemses tormis 25 m/s.

Käesolevas töös modelleeriti lainetust kolmeastmelise skeemi aastail 1990–2021 modelleeritud tuulega ERA-5. Tihedaim võrk kattis Kõpu poolsaart ja selle lõunapoolset ümbrust ning selle lahutusvõime oli ca 260 m. Saades kalakasvanduse läheduses lainetuse parameetrid, sai arvutada setete liikumise võimalikkust. Eeldades keskmiseks terasuuruseks 0,1 mm, näidati, et kõige tõenäolisemalt liiguvad setted läänest ja edelast tuleva lainetuse korral. Veel liiguvad setted ekstreemsetes loodetormides. Kokku võivad setted statistiliselt liikuda umbes 19 päeva aastas.

Tugevas tormis tõstavad lained merepõhja settinud materjali veesambasse. See kandub edasi heljumina. Seda modelleeriti programmis Delft3D mudana erinevate suundade ja lainekõrguste korral. Kalakasvatustes tekkiva sette (lahustumatu osa toitainetest ja orgaanilisest ainest) kogus on umbes 0,2 m³/sööda tonni kohta ehk kavandatava kalakasvanduse puhul 550 m³ kasvatusperioodi jooksul (Lember, 2019). Mudaga kaeti põhjapoolseimat ala kalakasvanduse alal ühtlaselt 5 cm kiht. Setete kogumaht ületas seega aastase setete tekke 2,3 kordselt.

Võrdlemaks heljumi levikut loodusliku fooniga, rakendati Laura Raagi (2014) magistritöös toodud tulemusi, mis näitasid, et sobiv kontsentratsioon on 2 g/m³. Modelleerides erinevaid laine suundi, oli näha, et setted ei kandu randa. Sama oli ka edelast loodesse pöörduva tormi puhul. Vaid ekstreemse tormi (kordumine iga 6 aasta järel) korral täheldati heljumi kandumist rannikule. Ülejäänud juhtudel hajus see merealal. Arvestades selle tekkimise tõenäosust ja kasutatud konservatiivseid eeldusi (setete maht ja nende vahepealne liikumatus), ei pea ekspert vajalikuks lisada piiranguid.

Kalakasvandused ei mõjuta mere hüdrodünaamilisi protsesse nagu lainetus, hoovused jms olulisel määral (erinevalt muulidest, kaidest jms). Tegu ei ole ehitisega, mis olulisel määral mõjutaks vee liikumist.

KASUTATUD KIRJANDUS

Alari, V., Raudsepp, U. and Kõuts, T. Wind wave measurements and modelling in Küdema Bay, Estonian Archipelago Sea. *Journal of Marine Systems*. 74 (2008) S30–S40.

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

Giudici, A., Jankowski, M. Z., Männikus, R., Najafzadeh, F., Suursaar, Ü. and Soomere, T. 2023. A comparison of Baltic Sea wave properties simulated using two modelled wind data sets. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **290**, 108401. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108401>

Kotta, J., Stechele, B., Kaasik, A., Aps, R., Orav-Kotta, H. 2022. Tõendusliku kalapüügi ja kalakasvatusega seotud toitainete voogude modelleerimine Läänemeres ning saadud mudeli valideerimine Tagalahe kalakasvatuse näitel.

Lember, E. 2019. Planeeritava Kesknõmme kalakasvanduse reostuskoormuse leidmine ja tehnoloogiliste lahenduste võrdlus reostuskoormuse vähendamiseks.

Leppäranta, M., Myrberg, K. 2009. *Physical Oceanography of the Baltic Sea*. Springer.

Lips, U. ja Liblik, T. 2012. Soolsus, tsirkulatsioon ja hoovused, apvellingud, lainetus, veetase ja jääolu. Eesti mereala keskkonnaseisundi esialgne hindamine. Tallinn.

Meier, H.E.M., Höglund, A. 2013. Studying the Baltic Sea circulation with eulerian tracers. Raamatus: T. Soomere, E. Quak (eds.), *Preventive Methods for Coastal Protection*. Springer, Cham Heidelberg, 101–129.

Otsmann, M., Suursaar, Ü., Kullas, T. 2001. The oscillatory nature of the flows in the system of straits and small semienclosed basins of the Baltic Sea. *Continental Shelf Research*, 21(15), 1577–1603.

Najafzadeh, F., Jankowski, M. Z., Giudici, A., Männikus, R., Suursaar, Ü., Viška, M. and Soomere T., 2024. Spatiotemporal variability of wave climate in the Gulf of Riga. *Oceanologia*. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2023.11.001>

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

Soomere, T. 2003. Anisotropy of wind and wave regimes in the Baltic Proper. *J. Sea Res.*, 49, 305–316.

Soomere, T., Keevallik, S. 2001. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. *Proc. Estonian Academy of Sci. Eng.*, 50, 1, 35–49.

Souslby, R. 1997. *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford.

Yokoyama, Hisashi & Abo, Katsuyuki & Ishihi, Yuka. 2006. Quantifying aquaculture-derived organic matter in the sediment in and around a coastal fish farm using stable carbon and nitrogen isotope ratios. *Aquaculture*. 254. 411-425.