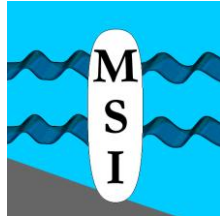


**TTÜ Meresüsteemide Instituut**  
Akadeemia tee 21, 12618, Tallinn



Tellija: OÜ Nelja Energia  
Estonia puiestee 1/3, 10143 Tallinn

# **Hiiumaa avamere tuulepargi mõju lainetuse režiimi muutusele Hiiumaa lääne –ja põhjarannikul**

**Autor: Victor Alari**

**Direktor: Prof. Jüri Elken**

**Projektijuht ja aruande toimetaja: Prof. Urmas Lips**

**Tallinn 2008**

## Sisukord

1. Sissejuhatus.....	3
2. Mõjuala piirkonnad ning modelleerimispiirkonnad.....	4
3. Meetod tuulikute mõju arvutamiseks.....	9
4. Lainemudeli kirjeldus .....	10
5. Lainemudeli lähtestamine ja verifitseerimine .....	15
6. Modelleerimise tulemused .....	16
6.1. Lainetuse režiim Kõpu poolsaare tipus.....	16
6.2. Lainetuse režiimi muutus Kõpu poolsaare tipus.....	18
6.3. Lainetuse režiim Hiiumaa looderannikul.....	21
6.4. Lainetuse režiimi muutus Hiiumaa looderannikul.....	24
7. Järeldused.....	28
9. Kokkuvõte.....	29
Kasutatud kirjandus .....	30

# 1. Sissejuhatus

Hiiumaa rannikumerre, Neupokojevi, Vinkovi, Glotovi ja Apollo madalatele on OÜ Nelja Energia eestvedamisel kavandatud avamere tuulepark enam kui 200 tuulikuga. Tuulikud paikneksid Hiiumaa rannast kuni 20 km kaugusel, paikades, kus meresügavus on alla 20 m.

Iga vette paigutatud keha mõjutab tsirkulatsiooni ja lainetuse režiimi, aga ka settetransporti. Tuuliku veesoleva konstruktsioonina on ettenähtud monoliitse kerega struktuur, mida lihtsuse huvides võib vaadata kui konstantse raadiusega silindrit. Käesoleva uurimuse eesmärgiks on välja selgitada, kui palju mõjutavad merre paigutatud tuulikud lainetuse režiimi (1) Kõpu poolsaare tipus, nn „surfi paradiisi“ piirkonnas ning (2) Tahkuna poolsaare läänerannikul ja Kõpu ps põhjarannikul.

## 2. Mõjuala piirkonnad ning modelleerimispiirkonnad

Kuigi tuulikuid planeeritakse rajada mitmetele madalikele Hiiumaa ranniku ümbruses, kvantifitseeritakse käesolevas töös kõige tähtsamate piirkondade – Neupokojevi ja Vinkovi madala – tuulikute mõju allalainet jäävatel aladel. Neupokojevi madalale paigutatud tuulikute mõju hinnatakse Kõpu poolsaare rannikumeres, kus paikneb ka „surfi paradüis“, Vinkovi madala puhul hinnatakse mõju Hiiumaa põhjaranniku läheduses. Joonisel 2.1 on kujutatud antud tuulikute asukohad ning mõjuala piirkonnad. Neupokojevi madalale on planeeritud kokku paralleelsete rividena 55 tuulikut minimaalse vahekaugusega 1000 m ning Vinkovi madalale 35 tuulikut paralleelsete rividena minimaalse vahekaugusega 1000 m. Lähim rannik Vinkovi madalal paiknevatele tuulikutele on Tahkuna poolsaare läänekülj 13 km kaugusel, samas Luidja lahest, mis asub Vinkovi madalast otse lõunas, asuvad tuulikud 20 km kaugusel. Lähimad tuulikud Neupokojevi madala piirkonnas asuvad Ristna neemest 5 km kaugusel.

Lainetuse modelleerimine on Neupokojevi madala piirkonna jaoks, ehk mõjuala piirkonna Ristna neem ja Kõpu poolsaare tipp, läbi viidud 5-astmeliselt. Esmalt modelleeriti kogu Läänemere laineväli valitud tuule suuna ja kiiruse jaoks 2000 m sammuga, seejärel, saades rajatingimused 2000 m sammuga mudelist, modelleeriti Hiiumaa ümbrus 400 m sammuga, siis edasi 100 m, 50 m ja 25 m sammuga. Suurima lahutusega (25 m sammuga) mudeli abil hinnati lainetuse parameetreid kahe variandi jaoks: esimene vastas situatsioonile, kus tuulikuid pole ning teine olukorrale, kus tuulikud on.

Sarnane skeem oli kasutusel ka Vinkovi madala tuulikute mõju modelleerimisel, aga suurima lahutusega kasutatud mudel omas võrgusammu 50 m. Joonistel 2.2 ja 2.3 on esitatud modelleerimispiirkondade alad ning tuulikute paiknemine.

Kõikide mudelite jaoks on ette valmistatud vastava mereala topograafia, milleks kasutati Seifert'i Läänemere põhjatopograafiat (Seifert, 2001) ning Eesti Veeteede Ameti väljastatud kaartide digitaliseeritud sügavusandmeid. Rannajoone paigutamiseks on kasutatud Hiiumaa rannajoone koordinaate, digitaliseeritud Google

Earth andmebaasist. Mudeli võrgud on kõik meetrilised ning esitatud koordinaatsüsteemis UTM-34. Interpoleerimisskeemina on kõikidel juhtudel kasutatud „Kriging“ meetodit, mis sobib hüdrograafiliste andmete interpoleerimiseks paremini kui lineaarne interpolatsioon. Algsete veesügavusandmete jaotus on esitatud joonisel 2.4. Nagu näha, on Neupokojevi ja Vinkovi madala algandmed suhteliselt hästi esile toodud. Joonisel ei ole esitatud Seifert'i veesügavusandmeid.

Kõikide alade topograafia massiivi loomisel on veesügavused väärtusega alla 0,1 m asendatud väärtusega 0,1 m. Samuti on 2000 m topograafia korral kunstlikult suletud mõned Läänemere lõunaosas asuvad lahed, vähendades nii mudelite arvutusaega. Sellise kunstliku maismaa lisamine ei tekita lainetuse režiimis Hiiumaa rannikul mingeid muutusi.

Tabelisse 1 on koondatud topograafia-massiivide andmed Neupokojevi madala piirkonna kohta ning tabelisse 2 Vinkovi madala piirkonna kohta.

Tabel 1. Mudelipiirkonnad ja võrgupunktide arv erineva lahutusega mudelites Neupokojevi madala piirkonnas.

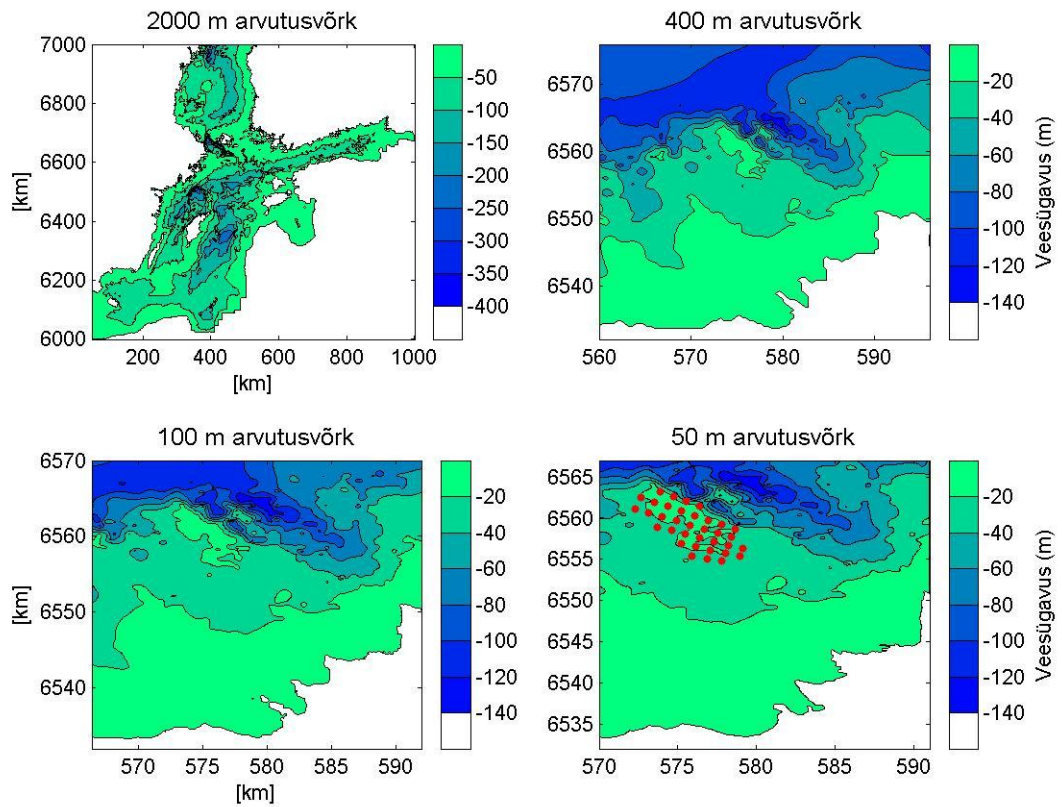
	<b>2000 m</b>	<b>400 m</b>	<b>100 m</b>	<b>50 m</b>	<b>25 m</b>
<b>X_alg [m]</b>	50000	524000	535200	541000	543000
<b>X_lõpp [m]</b>	1000000	580000	570000	562000	562000
<b>Y_alg [m]</b>	6000000	6500000	6510000	6521000	6524000
<b>Y_lõpp [m]</b>	7000000	6560000	6550000	6540000	6536000
<b>X_punkte</b>	476	141	349	421	761
<b>Y_punkte</b>	501	151	401	381	481

Tabel 2. Mudelipiirkonnad ja võrgupunktide arv erineva lahutusega mudelites Vinkovi madala piirkonnas.

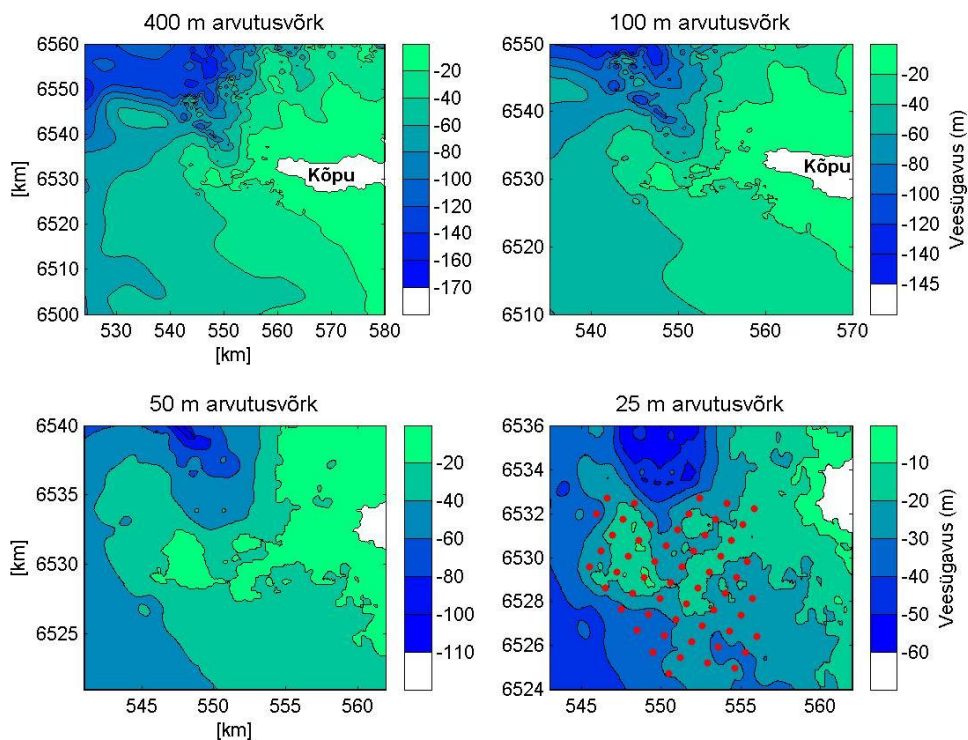
	<b>2000 m</b>	<b>400 m</b>	<b>100 m</b>	<b>50 m</b>
<b>X_alg [m]</b>	50000	560000	566400	570000
<b>X_lõpp [m]</b>	1000000	596000	592000	591000
<b>Y_alg [m]</b>	6000000	6532000	6532000	6532000
<b>Y_lõpp [m]</b>	7000000	6576000	6570000	6567000
<b>X_punkte</b>	476	91	257	421
<b>Y_punkte</b>	501	111	381	701



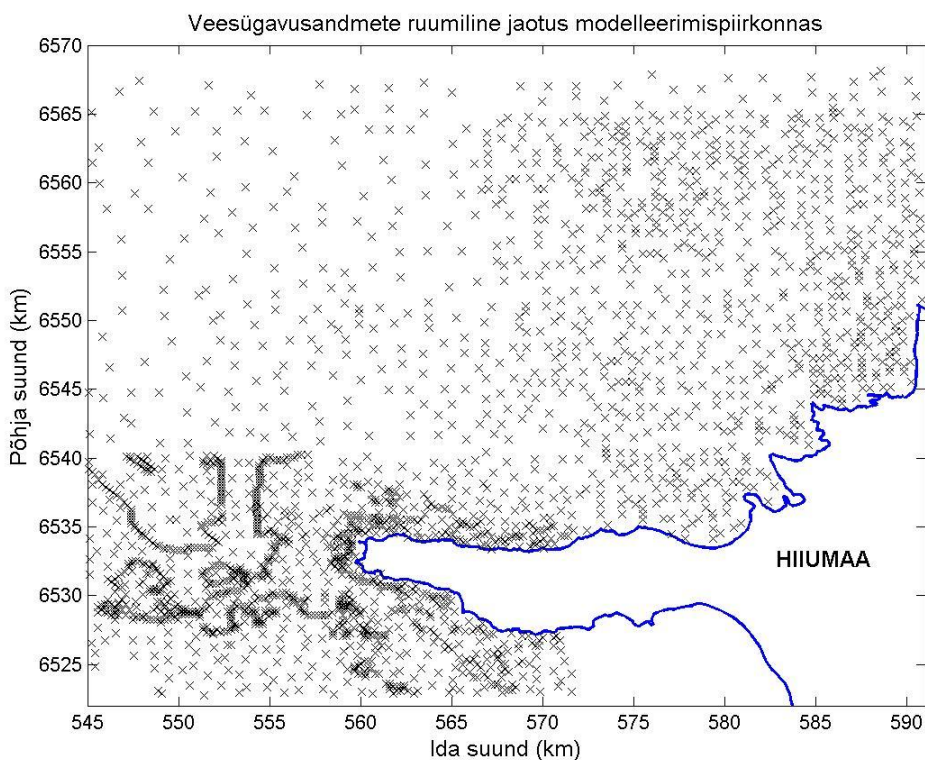
**Joonis 2.1** Mõjuala piirkonnad (punasega) ning tuulikute paiknemine.



**Joonis 2.2** Modelleerimispiirkonnad Vinkovi madala jaoks. Tuulikute asukohad on märgitud punaste ringidega.



**Joonis 2.3.** Modelleerimispiirkonnad Neupokojevi madala jaoks. Tuulikute asukohad on märgitud punaste ringidega.



**Joonis 2.4.** Topograafiamassiivide loomiseks kasutatud digitaliseeritud sügavusandmete punktide asukohad.



### 3. Meetod tuulikute mõju arvutamiseks

Iga tuule suuna kohta on tehtud vastavalt kaks arvutust: esimene juhul, kui tuulikuid pole, ning teine siis, kui tuulikud on. Käesolevas töös on mõju hindamiseks kasutatud lainemudelit SWAN, mis on spektraalne lainemudel ning nagu mainitud eelnevas peatükis, on väikseimateks võrgusammudeks Neupokojevi madala piirkonnas valitud 25 m ning Vinkovi madala arvutuste korral 50 m. Igale tuulikule leitakse mudelis lähim võrgupunkt ning asendatakse veesügavuse väärtus antud punktis 0-ga. Seejärel teostatakse arvutus. Tulemuseks saadakse olulise lainekõrguse väli. Olgu  $H_s$  esimene arvutus ilma tuulikuteta ning  $H_{s_i}$  arvutus tuulikutega, siis on mõju

$$\Delta H_s = H_{s_i} - H_s. \quad (3.1)$$

Kui  $\Delta H_s < 0$ , siis tähendab see lainekõrguse vähenemist, kui  $\Delta H_s > 0$ , siis tähendab see lainekõrguse suurenemist.

Samas on reaalse tuuliku läbimõõt umbes 4 m. Eeldades lineaarset sõltuvust lainekõrguse muutuse ja tuuliku diameetri vahel, tuleb 25 m võrgusammu korral olulise lainekõrguse muutus jagada läbi koefitsiendiga 6,25 ning 50 m võrgusammu korral olulise lainekõrguse väli läbi jagada koefitsiendiga 12,5.

## 4. Lainemudeli kirjeldus

On kasutatud kolmanda põlvkonna spektraalset lainemudelit SWAN (akronüüm sõnadest *Simulating WAVes Nearshore*), millega on võimalik arvutada realistlikke laineparameetreid rannikumere, järvede ja estuaaride jaoks etteantud tuulte, hoovuste ning põhjatopograafia korral (Booij, 1999). Mudel põhineb lainetegevuse tasakaalu võrrandil (energia tasakaalu võrrandil hoovuste puudumise korral) ning sisaldab endas lähteliikmeid.

SWAN-is on esitatud järgmised laine levikuga seotud protsessid:

- Lainete levimine geograafilises ruumis.
- Lainete refraktsioon batümeetria ning hoovuste ruumilise muutlikkuse tõttu.
- Laineharjade lühenemine ning teravamaks muutumine rannale lähenedes.
- Lainete peegeldumine vastasolevate hoovuste tõttu.
- Lainete levimine läbi takistuste ning peegeldumine tõketest.

SWAN-is on esitatud järgmised lainete genereerimise ning hajumisega seotud protsessid:

- Lainete genereerimine tuule poolt.
- Lainete hajumine *whitecapping*'u tõttu.
- Lainete hajumine põhja-indutseeritud murdumise tõttu.
- Lainete hajumine põhjahõõrdumise tõttu.
- Lainete omavaheline interaktsioon (lainetriaadide ja -nelikute vahel).

Lisaks on võimalik arvutada lainete murdumisega seonduvat veetaseme tõusu rannikualal.

SWAN-i käesolev versioon (40.51) on statsionaarne (kuid võimaldab ka mittestatsionaarset formuleeringut) ning formuleeritud Cartesiuse, kõverjoonelise ja sfäärilise koordinaatsüsteemi jaoks.

SWAN ei arvuta lainete poolt indutseeritud hoovuseid.

SWAN-i on võimalik rakendada mistahes suurusega mereala jaoks, kuigi SWAN-i rakendamine eriti suurtel merealadel (avameri ning ookean) ei ole efektiivne. WAM ja WAVEWATCH III lainemudelid on spetsiaalselt välja töötatud just eelpoolmainitud olude jaoks ning töötavad nendes oludes mõnevõrra paremini kui SWAN.

SWAN-is kirjeldab laineid kahemõõtmeline lainemõju spektraaltiheduse võrrand isegi juhul, kui mittelineaarsetel protsessidel on suur osatähtsus (nt rannikutsoonis). Loogiline põhjendus kasutamaks spektrit sellistes sügavalt mittelineaarsetes oludes on see, et isegi sellistes tingimustes on võimalik üpriski mõistliku täpsusega ennustada lainete teise momendi spektraalset jaotust. Spekter, mida vaadeldakse SWAN-is on pigem mõjutiheduse spekter  $N(\sigma, \theta)$  kui energiatiheduse spekter  $E(\sigma, \theta)$ , kuna hoovuste olemasolu korral, mõjutihedus säilitatakse kuivõrd energiatihedus mitte. Sõltumatud muutujad on suhteline sagedus  $\sigma$  (mida vaadeldakse taustsüsteemina, mis liigub hoovuse kiirusega) ja lainesuund  $\theta$  (suund, mis on risti laineharjaga iga spektraalse komponendi korral). Mõjutihedus on võrdne energiatiheduse ja suhtelise sageduse suhtega:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}. \quad (4.1)$$

SWAN-is võib see spekter muutuda nii ajas kui ruumis.

SWAN-is kirjeldab spektri evolutsiooni spektraalse mõju tasakaalu võrrand, mis Cartesiuse koordinaatide korral võtab järgmise kuju:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial x} c_x + \frac{\partial N}{\partial y} c_y + \frac{\partial N}{\partial \sigma} c_\sigma + \frac{\partial N}{\partial \theta} c_\theta = \frac{S}{\sigma}, \quad (4.2)$$

kus

$$S = S_{in} + S_{nl4} + S_{nl3} + S_{ds} + S_{bf} + S_{br}. \quad (4.3)$$

Esimene liige võrrandi (4.2) vasakul pool kirjeldab mõjutiheduse lokaalset muutust ajas, teine ja kolmas liige kirjeldavad mõju levikut geograafilises ruumis (leviku kiirustega  $c_x$  ja  $c_y$  vastavalt  $x$ - ja  $y$  ruumis). Võrrandi neljas liige kirjeldab suhtelise sageduse nihkumist seoses muutustega batümeetrias ning hoovustes (leviku kiirusega

$c_\sigma$   $\sigma$  - ruumis). Viies liige kirjeldab põhja ja hoovuste indutseeritud refraktsiooni (leviku kiirusega  $c_\theta$   $\theta$  - ruumis). Vastavad avaldised leviku kiiruste jaoks võeti lineaarsest laineteooriast.

Liige  $S=S(\sigma, \theta)$  võrrandi paremal pool on lähteliige energiatiheduse formuleeringus. Võrrandis (4.3) on see lähteliige esitatud järgmiste liikmete summana: lainete genereerimine tuule poolt ( $S_{in}$ ), mittelineaarne laine-laine interaktsioon lainenelikute ( $S_{nl4}$ ) ja -triaadide ( $S_{nl3}$ ) vahel, laineenergia hajumine *whitecapping*'u ( $S_{ds}$ ), põhjahõõrde ( $S_{bf}$ ) ja põhja-indutseeritud murdumise ( $S_{br}$ ) tõttu. Alljärgnevalt kirjeldatakse lühidalt nende liikmete formuleeringut.

Tuule energia ülekande lainetele toimub SWAN mudelis resonantsmehhanismi ning nn. tagasisidemehhanismi kaudu. Tuule energia ülekande saab kirja panna lineaarse ning eksponentsiaalse kasvu summana:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta), \quad (4.4)$$

kus  $A$  ja  $B$  sõltuvad laine sagedusest ja suunast ning tuule kiirusest ja suunast. Võrrand liikme  $A$  jaoks on filtriga, vältimaks energia kasvu madalamatel sagedustel kui Pierson – Moskowitz'i sagedus. Võrrand koefitsiendi  $B$  jaoks on võetud WAM lainemudeli üpris hiljutisest versioonist.

Sügava vee korral kontrollib spektri evolutsiooni lainenelikute omavaheline interaktsioon. See kannab laine energiat piigi energiast madalamatel sagedustel suunas (nihutades sellega piigi sageduse madalamatel väärtustel poole) ja kõrgemate sagedustel suunas (kus energia hajub *whitecapping*'u tulemusena). Väga madalal vees kannab lainetriaadide omavaheline interaktsioon energiat madalamatelt sagedustelt kõrgemate sagedustel suunas, mille tulemusena tekivad kõrgemad ja superharmoonikud.

Lainenelikute vahel toimuvat interaktsiooni arvutatakse nn. diskreetse interaktsiooni lähendusmeetodiga ning vastavalt sellele saab lähteliikme  $S_{nl4}$  kirja panna kujul:

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta), \quad (4.5)$$

kus  $S_{nl4}^*$  vastab esimesele nelikule ja  $S_{nl4}^{**}$  teisele lainenelikule.

Lainetriaadide omavahelist interaktsiooni arvutatakse nn. lainetriaadide lähendusmeetodiga iga spektraalse suuna jaoks.

Laineenergia hajub *whitecapping*'u, põhjahõõrdumise ning põhja-indutseeritud murdumise tõttu.

Laineenergia hajumine *whitecapping*'u tõttu sõltub põhiliselt laine järskusest. Praegu töötavates kolmanda põlvkonna lainemudelites (sealhulgas SWAN-is) põhineb *whitecapping*'u arvutamine WAMDI grupi poolt kohandatud ning Hasselmann'i poolt formuleeritud mudelil:

$$S_{ds}(\sigma, \theta) = -\Gamma \frac{\tilde{k}}{\tilde{\sigma}} E(\sigma, \theta), \quad (4.6)$$

kus  $\Gamma$  on laine järskusest sõltuv koefitsient,  $k$  on lainearv (saadakse dispersiooniseosest) ning  $\tilde{\sigma}$  ja  $\tilde{k}$  on vastavalt keskmine sagedus ja keskmine lainearv.

Põhja-indutseeritud laineenergia hajumine võib sõltuda põhjahõõrdest, põhja liikumisest või perkolatsioonist. Suhteliselt liivaste šelfimerede korral on domineerivaimaks mehhanismiks põhjahõõre, mida võib üldiselt esitada järgmiselt:

$$S_{bf}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta), \quad (4.7)$$

kus  $C_{bottom}$  on põhjahõõrde koefitsient,  $g$  on raskuskiirendus ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ning  $d$  on tegelik vee sügavus.

SWAN-is on lainemõju tasakaalu võrrandi integreerimine täide viidud lõplike vahede meetodiga kõigi viie dimensiooni jaoks (aeg, geograafiline ruum, spektraalne ruum).

Aeg on diskretiseeritud konstantse ajasammuga  $\Delta t$  üheaegse integreerimise jaoks nii lähteliikmete kui ka energia leviku suhtes. (Erinevalt WAM ja WAVEWATCH III

lainemudelid, kus lähteliikmete ja energia leviku integreerimise ajasammud on erinevad). Geograafiline ruum on diskretiseeritud ristkülikulise võrguga, millel on konstantsed sammud  $\Delta x$  ja  $\Delta y$  vastavalt  $x$ -i ja  $y$ -i suunas. Spekter on mudelis diskretiseeritud konstantse sammuga suuna jaoks  $\Delta\theta$  ja konstantse sammuga sageduse jaoks  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$  (logaritmiline sageduse jaotus). Diskreetsed sagedused on defineeritud madalsagedusliku äralõikesageduse ning kõrgsagedusliku äralõikesageduse vahel. Allpool madalsageduslikku äralõikesagedust (tavaliselt 0,04 Hz) eeldatakse, et energiatihedused võrduvad nulliga. Kõrgsageduslikust äralõikesagedusest (tavaliselt 1 Hz) suurematele sagedustele lisatakse nn diagnostiline „saba.” Seda „saba” kasutatakse mittelineaarsete lainete laine-interaktsioonide arvutamisel ning integraalsete laineparameetrite arvutamisel.

Numbriliste skeemide valikul on lähtutud nende täpsusest ja ökonoomsusest. Kuna põhivõrrandi (4.2) iseloom on selline, et energia olek võrgupunktis sõltub energiast üleslainet asuvas võrgupunktis (nn hüperboolne omadus), siis kõige robustsem ja tõhusam meetod on ilmutamata *upwind* skeem. Sellise skeemi kohaselt on aja- ja ruumisammu väärtused  $\Delta t$ ,  $\Delta x$  ja  $\Delta y$  vastastikku sõltumatud. Ilmutamata skeem on ökonoomne ka selles mõttes, et ta on tingimusteta stabiilne. Tänu sellele on võimalik arvutustes kasutada üpriski suuri ajasamme. Seega SWAN-is on valitud ilmutamata *upwind* skeem nii geograafilise kui ka spektraalse ruumi jaoks.

Võrrandi (4.2) lahendamisel kasutatakse Gauss – Seidel tehnikat. Hoovuste puudumise korral kasutatakse lahendamisel Thomas’i algoritmi.

## 5. Lainemudeli lähtestamine ja verifitseerimine

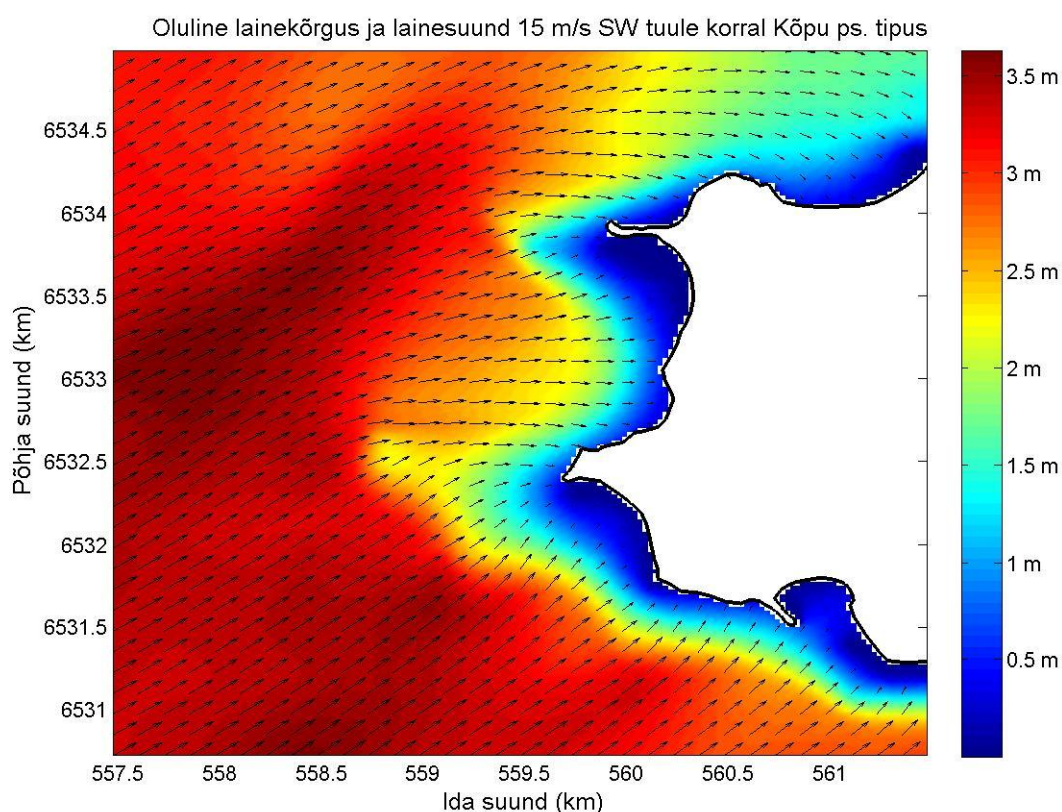
Tuulikute mõju on arvatud tuule suundade SW, W ja NW korral Neupokojevi madala piirkonnas ning suundade W, NW ja N korral Vinkovi madala piirkonnas. Kõik arvutused on tehtud tuule kiiruse 15 m/s korral. Modelleerimisel kasutatav topograafia oli kirjeldatud peatükis 2. Kõikide arvutuspiirkondade juures kasutatakse modelleerimisel laineleviku 24 suunda ning mudeli sagedusvahemikuks on valitud 0,05-1 Hz, kusjuures sagedusi kokku on 40. Kõikide topograafiate korral on mudelis kasutatud 3. põlvkonna mudelitele omast füüsikat (mehhanisme), ehk on arvestatud nii lainete genereerimist tuule poolt, lainete omavahelist kolmik- ja nelikinteraktsiooni ning lainete hajumist põhjahõõrde, *whitecappingu* ning põhja-indutseeritud murdumise tõttu. Suurima lahutusega mudelite rakendamisel (25 m sammuga Neupokojevi madala puhul ja 50 m sammuga Vinkovi madala puhul) on arvestatud ka lainetuse difraktsiooni.

Lainemudelit SWAN on varasemalt verifitseeritud Neupokojevi ja Vinkovi madalal tehtud mõõtmiste põhjal 2007. aastal, ning verifitseerimistulemused on esitatud TTÜ Meresüsteemide Instituudi koostatud aruandes „Mõõdistustööd lainetuse parameetrite ja hoovuste režiimi hindamiseks madalike piirkonnas.“ Lühidalt mainime siin, et mudeli ja mõõtmiste kooskõla olulise lainekõrguse osas oli väga hea, kusjuures korrelatsioon oli 0,95.

## 6. Modelleerimise tulemused

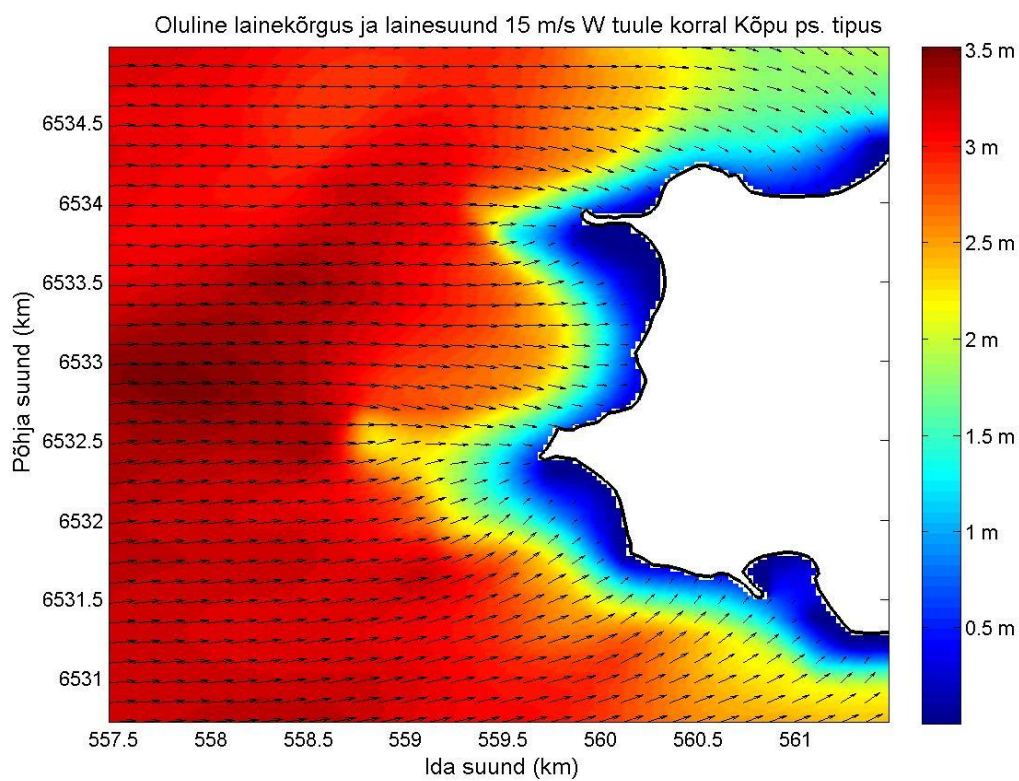
### 6.1. Lainetuse režiim Kõpu poolsaare tipus

Joonistel 6.1, 6.2 ja 6.3 on esitatud SW, W ja NW 15 m/s tuule korral küllastunud olulise lainekõrguse väljad koos laine leviku suundadega. Nagu näha, on olulised lainekõrgused suhteliselt võrdsed nii edela kui lääne tuule korral (maksimaalselt 3,7 m) ning mõnevõrra madalam on lainetuse režiim loode tuule korral (oluline lainekõrgus kuni 3,2 m). „Surfi paradiisi“ piirkonnas võib oluline lainekõrgus kõikide tuule suundade juures olla kuni 1,5 m, samas hakkavad seal lained juba murduma. Laine piigi periood on avamere poolses osas umbes 8,1 s.

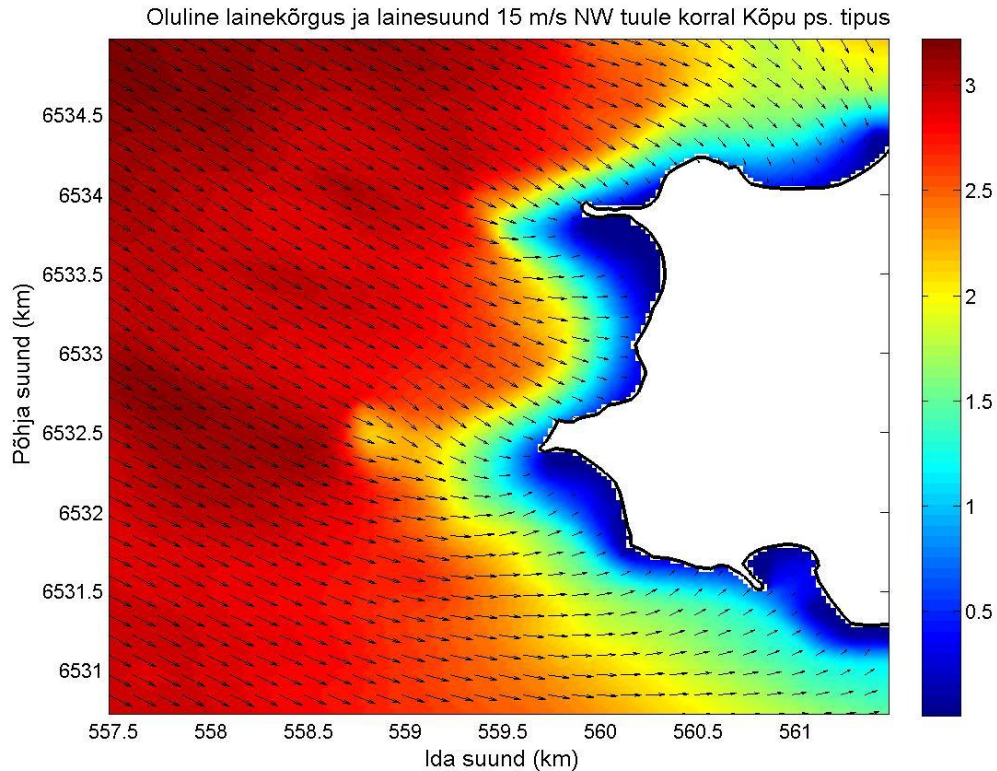


**Joonis 6.1.** Olulise lainekõrguse jaotus (küllastunud laineväli) Kõpu poolsaare lähistel 15 m/s puhuva edelatuule korral.





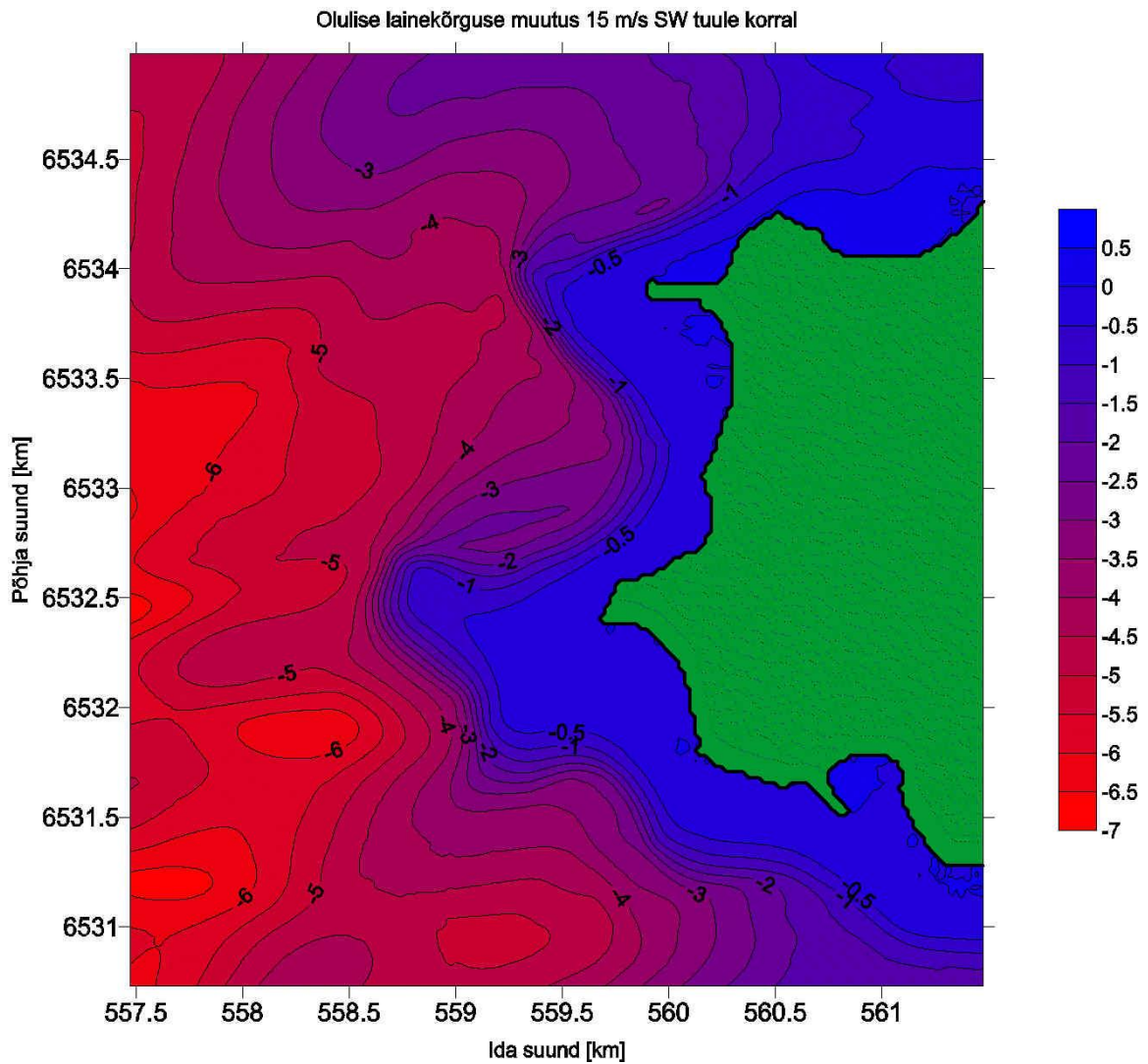
**Joonis 6.2.** Olulise lainekõrguse jaotus (küllastunud laineväli) Kõpu poolsaare lähistel 15 m/s puhuva läänetuule korral.



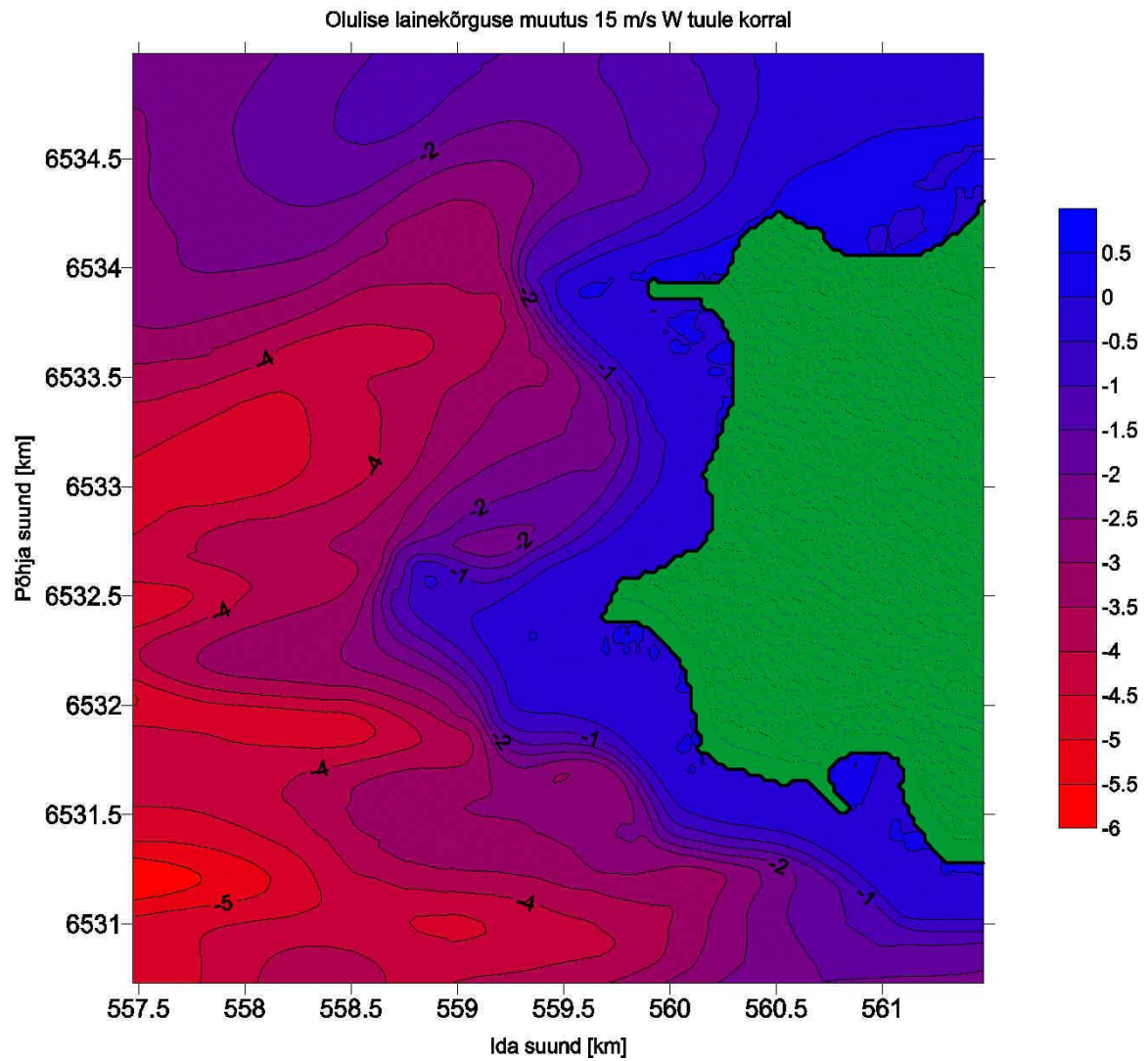
**Joonis 6.3.** Olulise lainekõrguse jaotus (küllastunud laineväli) Kõpu poolsaare lähistel 15 m/s puhuva loodetuule korral.

## **6.2. Lainetuse režiimi muutus Kõpu poolsaare tipus**

Joonistel 6.4, 6.5 ja 6.6 on esitatud olulise lainekõrguse muutus, kusjuures kasutatud värviskaala ühikuks on cm. Kõige suuremad muutused, kuni 7 cm on SW tuule korral ning kõige väiksemad NW tuule korral, kui mõju muutus ei ületa 3 cm. Ristna neeme piirkonnas, kus paikneb surfi paradiis, ei ole muutus kõikide suundade korral suurem kui 2 cm.

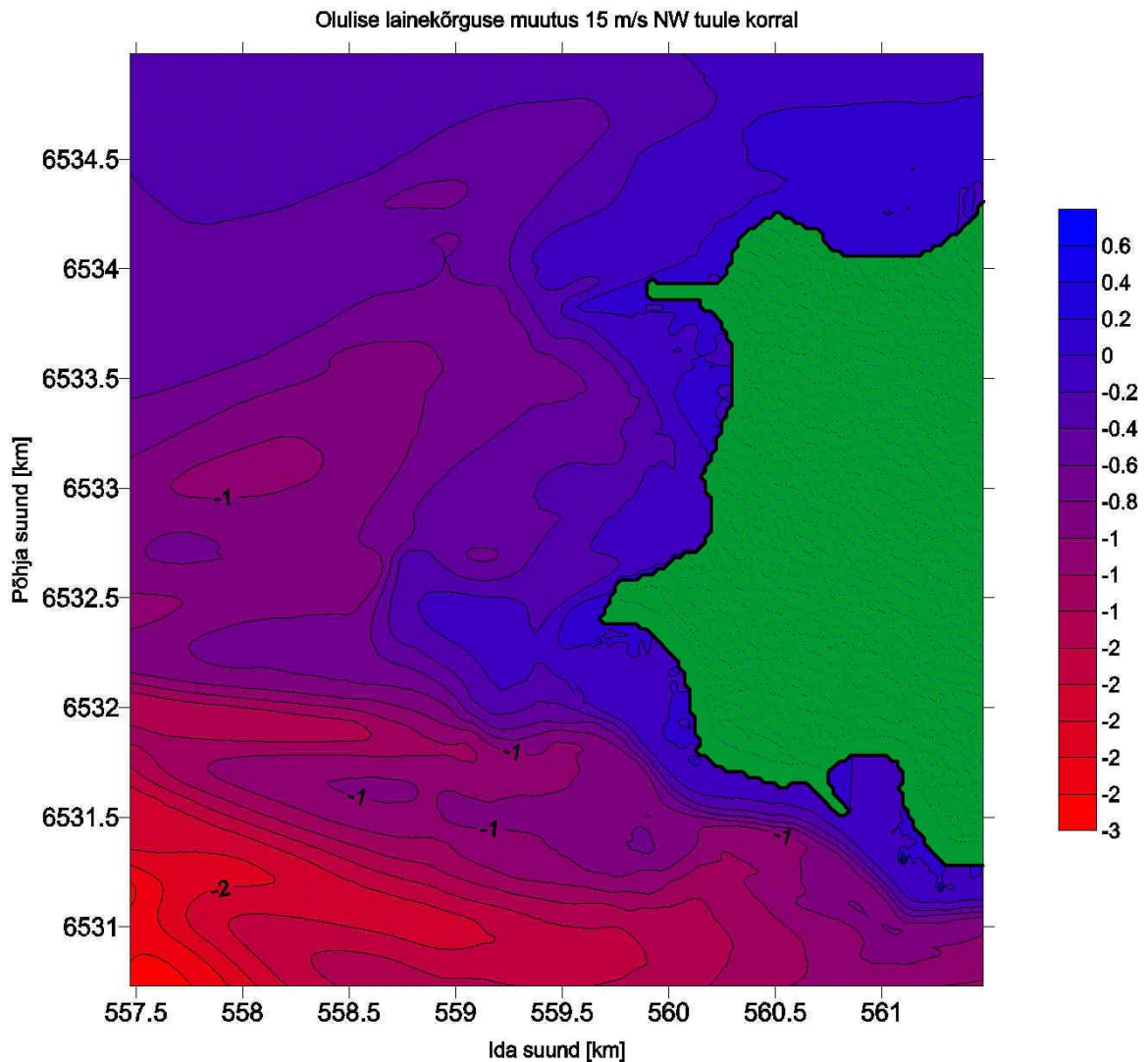


**Joonis 6.4.** Neupokojevi madalale paigutatud tuulikute poolt põhjustatud olulise lainekõrguse muutus (cm) Kõpu poolsaare lähistel 15 m/s puhuva edelatuule korral.



**Joonis 6.5.** Neupokojevi madalale paigutatud tuulikute poolt põhjustatud olulise lainekõrguse muutus (cm) Kõpu poolsaare lähistel 15 m/s puhuva läänetuule korral.

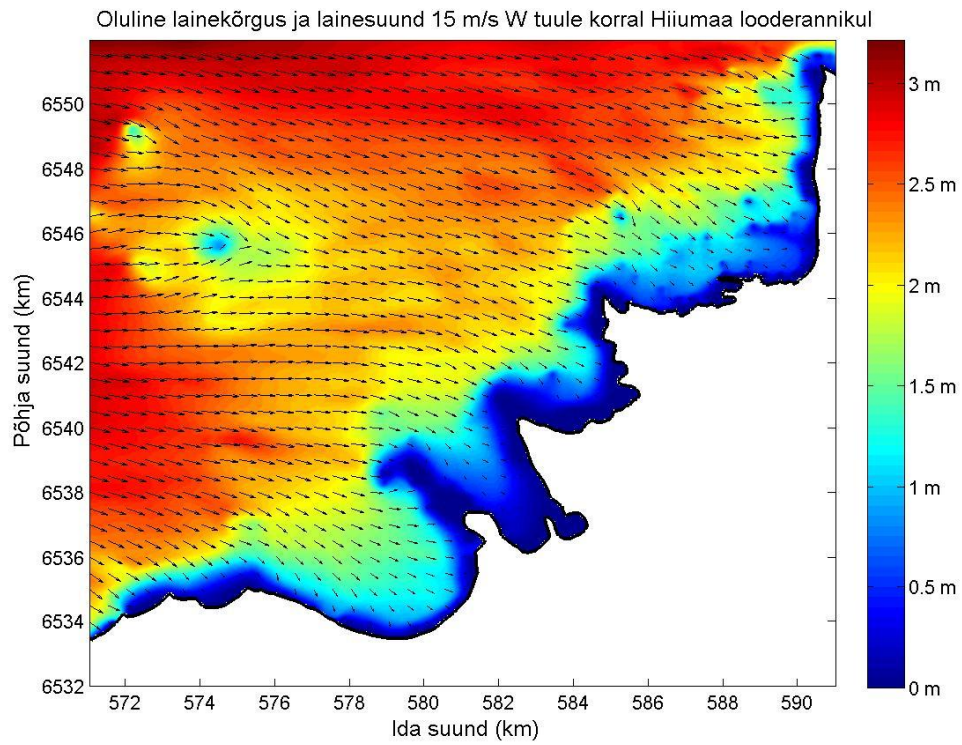




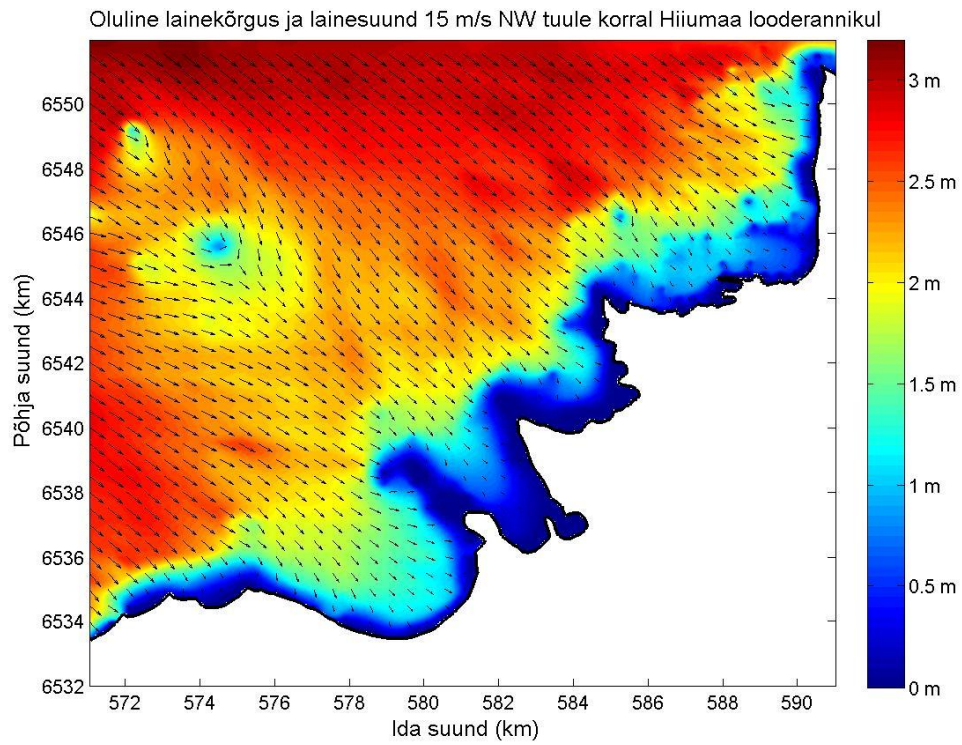
**Joonis 6.6.** Neupokojevi madalale paigutatud tuulikute poolt põhjustatud olulise lainekõrguse muutus (cm) Kõpu poolsaare lähistel 15 m/s puhuva loodetuule korral.

### **6.3. Lainetuse režiim Hiiumaa looderannikul**

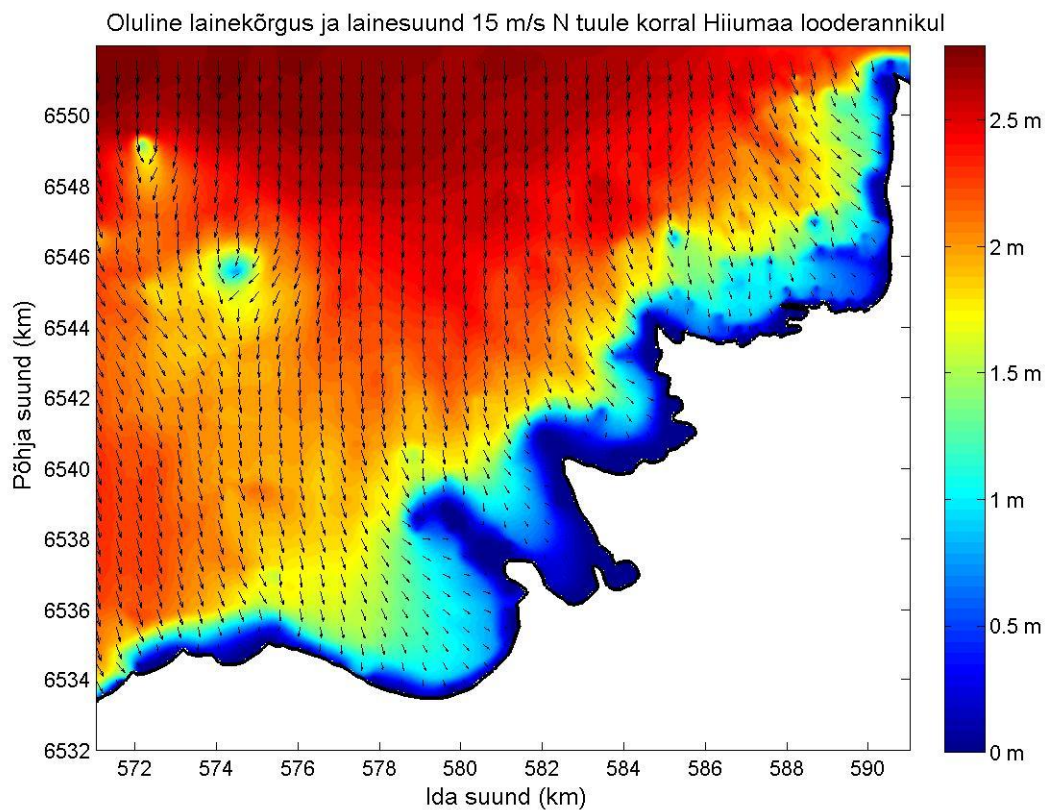
Joonistel 6.7, 6.8 ja 6.9 on esitatud olulise lainekõrguse väljad Hiiumaa looderannikul 15 m/s puhuvate lääne, loode ja põhja tuulte korral. Kõige madalamad olulised lainekõrgused avamere pool esinevad antud alal N tuultega (kuni 2,8 m) ning kõige kõrgemad (kuni 3,2 m) W ja NW tuulte korral. Selgelt tuleb välja lainekõrguse vähenemine Hiiu madala piirkonnas, kus see langeb alla 1 m.



**Joonis 6.7.** Olulise lainekõrguse jaotus (küllastunud laineväli) Hiiumaa looderanniku lähistel 15 m/s puhuva läänetuule korral.



**Joonis 6.8.** Olulise lainekõrguse jaotus (küllastunud laineväli) Hiiumaa looderanniku lähistel 15 m/s puhuva loodetuule korral.

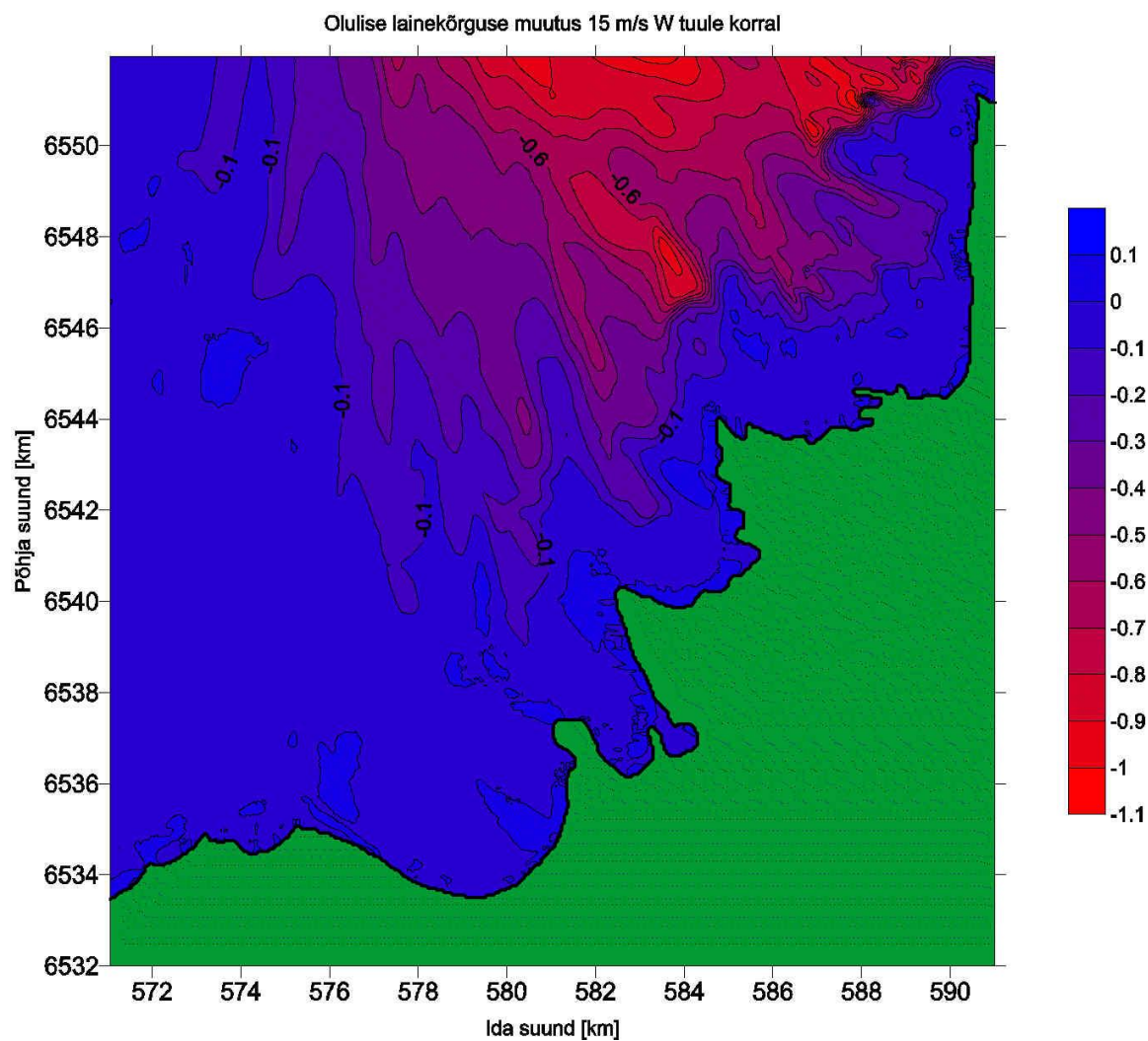


**Joonis 6.9.** Olulise lainekõrguse jaotus (küllastunud laineväli) Hiiumaa looderanniku lähistel 15 m/s puhuva põhjatuule korral.

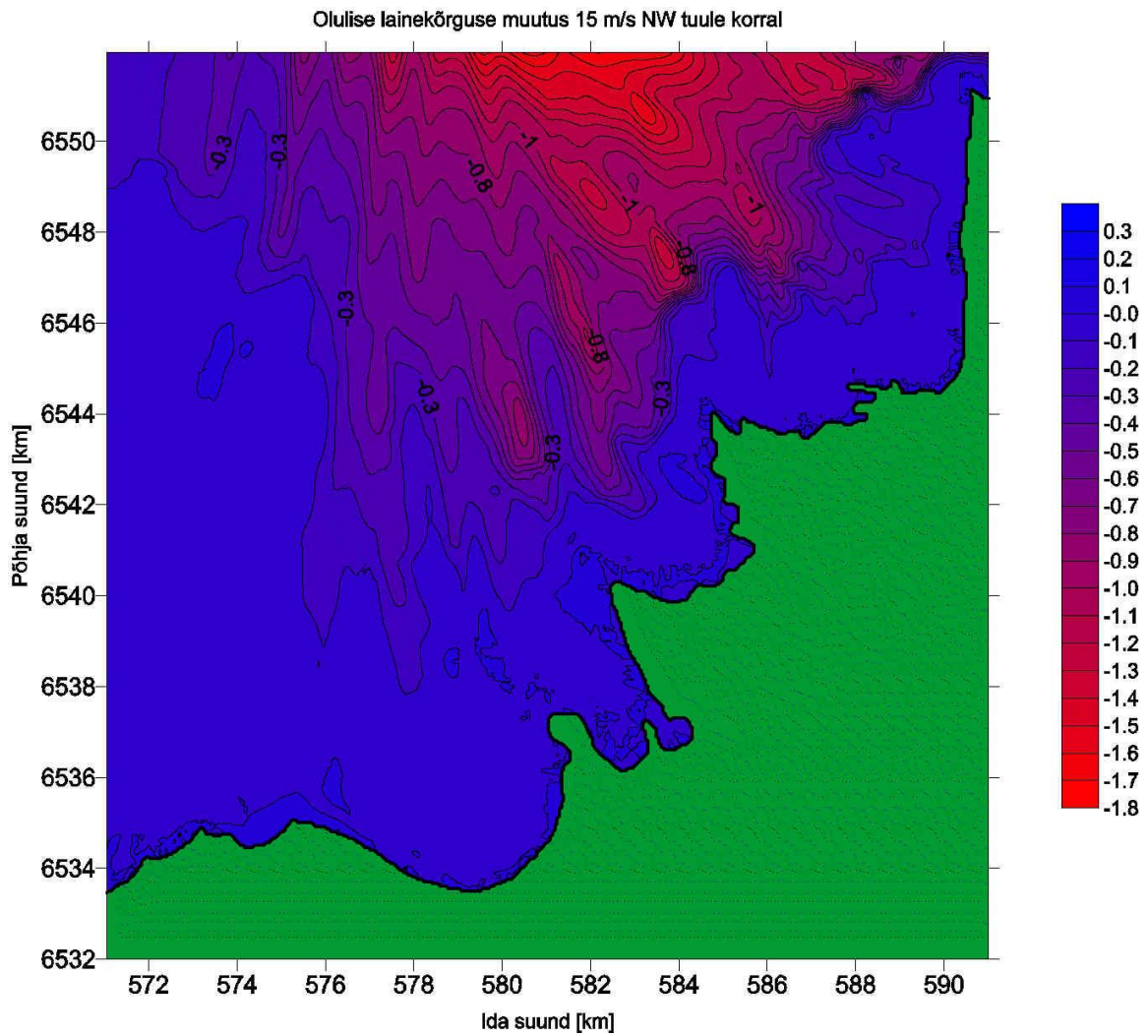
#### **6.4. Lainetuse režiimi muutus Hiiumaa looderannikul**

Võrreldes Kõpu poolsaare piirkonnas esinenud lainekõrguste muutustega, mis olid niigi väiksed, on Hiiumaa põhjaranniku ala lainekõrguste muutuste osas peaaegu olematu (joonised 6.10-6.12). Rannikualal ei ole muutus suurem kui 0,1 cm, ehk 1 mm lääne tuulte korral ning kuni 0,3 cm põhjakaarte tuulte korral. Üleüldse ei ulatu mõju üle 2 cm vaadeldaval piirkonnas.

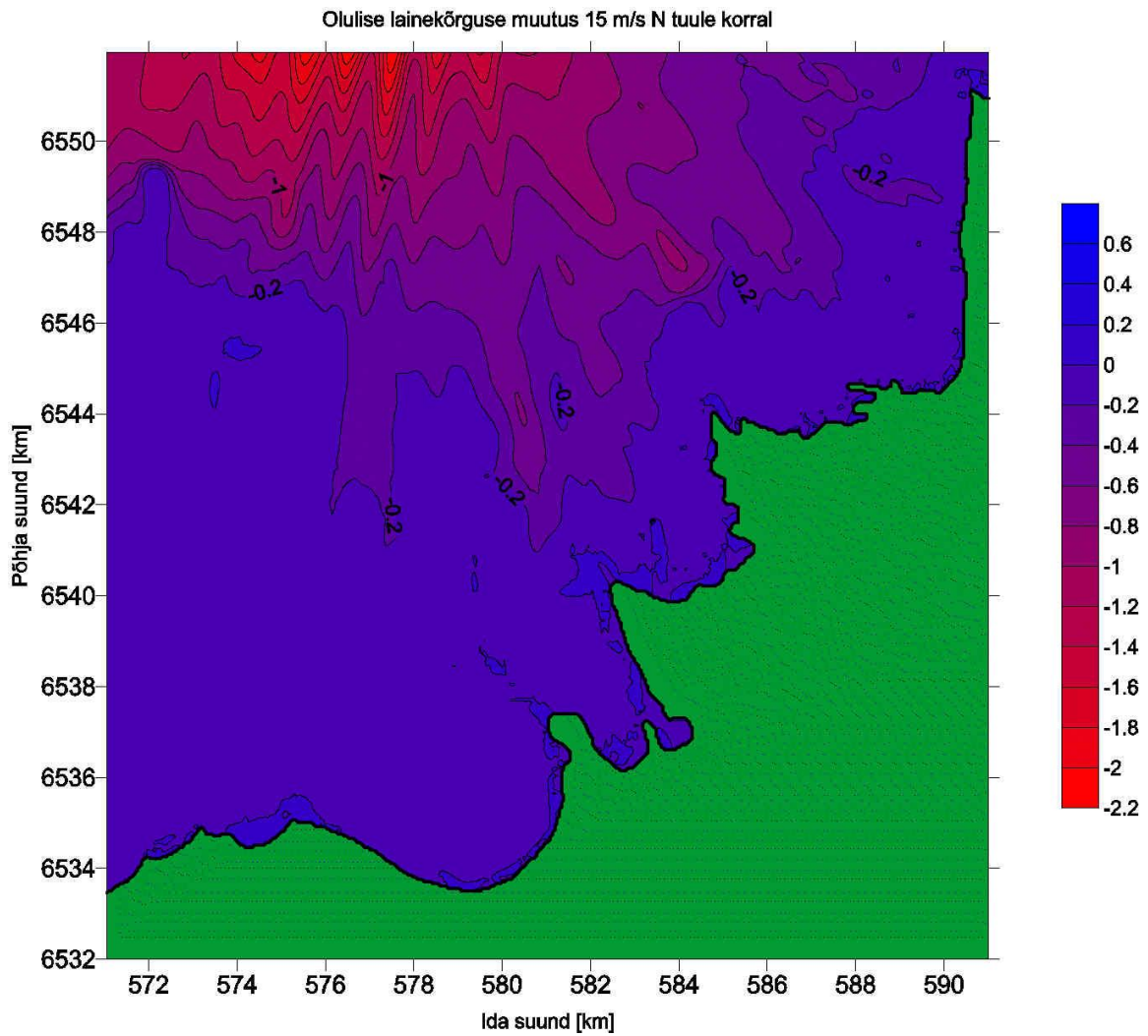




**Joonis 6.10.** Vinkovi madalale paigutatud tuulikute poolt põhjustatud olulise lainekõrguse muutus (cm) Hiiumaa looderanniku lähistel 15 m/s puhuva läänetuule korral.



**Joonis 6.11.** Vinkovi madalale paigutatud tuulikute poolt põhjustatud olulise lainekõrguse muutus (cm) Hiiumaa looderanniku lähistel 15 m/s puhuva loodetuule korral.



**Joonis 6.12.** Vinkovi madalale paigutatud tuulikute poolt põhjustatud olulise lainekõrguse muutus (cm) Hiiumaa looderanniku lähistel 15 m/s puhuva põhjatuule korral.

## 7. Järeldused

Nagu selgus modelleerimistulemuste põhjal, ei ületa olulise lainekõrguse muutus vahetult ranniku lähedal 2 cm, ning rannikust 2-5 km kaugusel 7 cm, samas kui olulise lainekõrguse foon on kuni 3,5 m – seega ei ületa muutus 2 %. Sellisel väikesel lainekõrguse muutusel on järgmised põhjused (tähtsuse järjekorras):

- Monoliitse kere diameetri (4m) ja keskmise lainepikkuse suhe (40-50 m) on alla 0,1. Teatavasti esineb oluline difraktsioon ainult juhul, kui see suhe ületab 0,2 (Coastal Engineering Manual, 2003).
- Tuulikute omavaheline kaugus on minimaalselt 1000 m, mis on enam kui 20 lainepikkust – seega ei teki lainete hajumist.
- Tuulikud on järjestatud korrapäraselt (paralleelsete ridadena), mitte kaootiliselt. Siinkohal on analoogia sadamarajatise – lainemurdjaga: kui vanasti ehitati lainemurdjad sirgete betoon vms seinana, siis tänapäeval kasutatakse üha enam üksteise otsa kuhjatud betooni tükke, mis summutavad laineenergiat palju efektiivsemalt kui sirge sein. Seega oleks lainete hajumine suurem, kui tuulikud paikneksid kaootiliselt.
- Tuulikute kaugus rannikust on näiteks Vinkovi madala puhul üle 13 km ning selle veeala peale koguvad lained uuesti energiat tuulelt.

## 9. Kokkuvõte

On analüüsitud, kasutades kolmanda põlvkonna spektraalset lainemudelit SWAN, monoliitse kerega tuulikute mõju lainerežiimi muutusele allalainet jäävatel merealadel Hiiumaa lääne ja looderanniku rannikumeres. Vastavad arvutused on tehtud Neupokojevi madala piirkonnas tuule suundade SW, W ja NW ning Vinkovi madala piirkonnas W, NW ja N korral tuule kiiruse 15 m/s jaoks. Antud piirkondades on eelpoolmainitud meteoroloogilise sisendi korral oluline lainekõrgus kuni 3,5 m, lainete periood kuni 8,2 s ning lainepikkus kuni 50 m. Vastavad muutused lainekõrguse vähenemise osas ranniku lähistel on kuni 2 cm ning ei ületa 2 % kogu vaadeldava mereala ulatuses. Antud marginaalne mõju on tingitud väikesest tuuliku diameetri ja lainepikkuse suhtest (difraktsiooni peaaegu pole) ning tuulikute soodsast paiknemisest üksteise ning ranniku suhtes.

## Kasutatud kirjandus

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. 1999. A third – generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res.* C104: 7649 – 7666.

Coastal Engineering Manual (2003):“EM 1110-2-1100 (Part VI)“, Chapter 5, p.242-245,  
Washington

Seifert, T., Kayser, B., Tauber F. 1995. *Bathymetry data of the Baltic Sea*. Baltic Sea Research Institute, Warnemünde.

TTÜ Meresüsteemide Instituut (2007). Mõõdistustööd lainetuse parameetrite ja hoovuste režiimi hindamiseks Hiiumaa madalike piirkonnas. Aruanne. 59 lk.