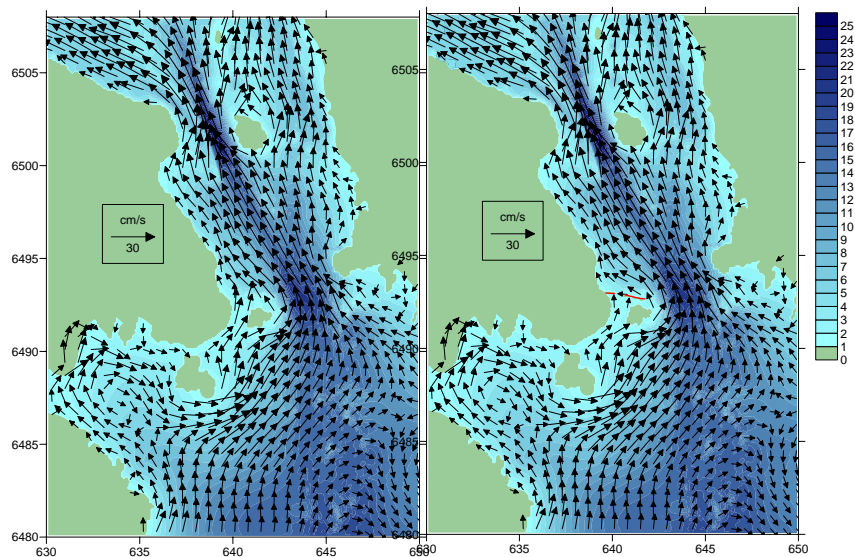




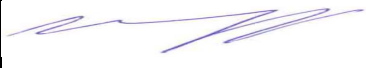


Sõitjate ja veoste üle Suure väina veo perspektiivse korraldamise kava koostamine ja keskkonnamõjude strateegiline hindamine

Suure väina veevahetuse uuring



September 2009

Projektijuht	Vastutav ekspert	Vastutav läbiviija
		
Peet Ranniste	Rauno Yrjölä	Urmas Raudsepp
WSP Finland Oy	Environmental Research Yrjölä ltd	TTÜ Meresüsteemide Instituut

Suure väina veevahetuse uuring

Tellija:

WSP Finland Oy

Töö teostaja:

TTÜ Meresüsteemide Instituut,
Akadeemia tee 21, 12618, Tallinn

Direktor: Prof. Jüri Elken

Vastutav läbiviija: Urmas Raudsepp

Sisukord

1. Sissejuhatus	3
1.1. Eesmärgid	3
1.2. Üldine taust	3
2. Kokkuvõte ja järeldused	12
3. Lähteandmed ja metodoloogia	14
3.1. Hoovuse kiiruse ja lainetuse parameetrite mõõtmised	14
3.2. Tsirkulatsiooni numbriline mudel	14
3.3. Lainemudel	15
3.4. Setete transpordi mudel	16
4. Analüüsid ja tulemused	18
4.1. Tuule andmete analüüs	18
4.2. Hoovuse kiiruse andmete analüüs	19
4.3. Lainetuse mõõtmisandmete analüüs	20
4.4. Lainemudeli seadistamine	23
4.5. Lainemudeli verifitseerimine	25
4.6. Tsirkulatsioonimudeli seadistamine, verifitseerimine ja arvutused 2008.a kohta ..	27
4.7. Mudelarvutused ROUTE III ilma tammiga ja tammiga	30
4.8. Setete transpordi arvutused olemasoleva olukorra ja teetammi korral	36
Kasutatud kirjandus	39

1. SISSEJUHATUS

1.1. Eesmärgid

Uuringu eesmärgiks oli saada kvantitatiivne hinnang veevahetusele ja selle muutlikkusele praeguses olukorras ning erinevate võimalike ühendusvariantide mõju veevahetusele Suures väinas. Veevahetuse hinnangud põhinevad hoovuse kiiruse mõõtmistel väinas ja numbrilise tsirkulatsioonimudeliga teostatud arvutuste tulemustel. Tsirkulatsioonimudel on arvesse võetud lainepinge poolt tekitatud kiiruse komponent, mis võib olla oluline madalas meres. Lainepinged saadakse lainetuse numbrilisest mudelist. Hoovuse kiiruste mõõtmisandmeid kasutatakse statistiliste seoste leidmiseks tuule mõju ning hoovuse kiiruse vahel ja numbrilise tsirkulatsioonimudeli verifitseerimiseks. Lainetuse mõõtmisandmetest leitakse statistilised seosed olulise lainekõrguse ja laineperioodi ning tuule mõju vahel ja verifitseeritakse lainemudel. Hoovuse kiiruse ja lainetuse mõõtmised Suures väinas teostati novembris-detsembris 2008 aastal. Mõõtmisperioodi iseloomustas meteoroloogiliste tingimuste suur muutlikkus, mis hõlmas ka tugeva sügistormi 23. novembril. Numbrilise tsirkulatsioonimudeli arvutustulemuste põhjal leitakse veevahetuse kvantitatiivsed hinnangud erinevate tuulerežiimide ja püsiühenduse alternatiivide korral. Tsirkulatsiooni ja lainetuse mudelitega on teostatud arvutused 2008.a. juuli jaoks, mis on hüdrodünaamiliselt väheaktiivne periood. Setete transpordi mudel on rakendatud mõlema perioodi jaoks. Selleks, et hinnata püsiühenduse mõju on läbi viidud arvutused praeguse olukorra ROUTE III tammiga juhu korral. Setete transpordi mudel kasutab lainemudeli sisendit setete resuspensiooni jaoks ja tsirkulatsiooni mudelit resuspendeeritud setete transpordi jaoks.

1.2. Üldine taust

Veevahetust läbi väina saab määratleda üldiselt väina ristlõike pindalaga ja vee voolamise kiirusega väinas. Väina ristlõike pindala on lihtsalt arvutatav kui ta on eelnevalt geograafiliselt fikseeritud. Hoovuste kiirusvälja määramine väinas on tunduvalt komplitseeritum ülesanne kuna ideaalsel juhul nõuab väga paljude kiirusmõõtjate kasutamist. Praktiliselt on see aga võimatu, sest tavaliselt (ka Eesti mereuurimisega seotud asutustes) on kiirusmõõtjate arv suhteliselt piiratud. Seetõttu mõõtmistepõhised veevahetuse hinnangud võivad oluliselt erineda reaalsest, kuid enamasti eriti suuremates ajamastaapides (nädal, kuu, sesoon) on siiski piisavalt usaldusväärsed. Otseste mõõtmiste kõrval võib veevahetust läbi väina ka modelleerida, kusjuures kasutatakse põhiliselt numbrilisi mudeleid. Numbrilised mudelid on rakendatud võimalikult täpselt määratletud merepiirkondadele (kaldajoon ja põhjatopograafia) ja arvesse võetakse olulisemad mõjuprotsessid. Vähemkasutatavad on nn ajaloolised mudelid/meetodid, mis võimaldavad ainult väga ligikaudseid veevahetuse hinnanguid väinades (näit soolsuste bilansil põhinev e Knudseni meetod, veehulga erinevustel põhinev meetod).

Suur väin on suhteliselt kitsas ja madal väin, mis ühendab Väinamere ja Liivi lahe veed. Virtsu–Kuivastu piirkonnas on väin kitsaim lõikel Võiküla–Virtsu, 6 km, kuid arvestades lõuna pool paikneva Viirelaiuga taandub laius ~5 kilomeetrini (Viire kurk 3.9 km ja Võiküla–Viirelaid 1.1 km). Suure väina maksimaalne ja minimaalne sügavus on vastavalt 21 ja 5–6 m ning ristlõike pindala 0.04 km² Viire kurgus.

Teadaolevalt kõige esimesed hoovuse mõõtmised selles piirkonnas toimusid 1908. aastal Väinameres, kus esimese Venemaa Läänemere ekspeditsiooni käigus määrati kolmes kohas (sh Suures väinas) hoovusi ujukitega (Mardiste, 1995). Esimesed kodumaised hoovuse mõõtmised Suures väinas teostati Mey (1922) poolt. Järgmised hoovuste mõõtmised Suures väinas toimusid juba pool sajandit hiljem (Mardiste, 1976), mis said aluseks ka esimestele veevahetuse hinnangutele läbi väina. Sellesse perioodi kuuluvad ka veevahetuse hinnangud Petrov'i (1979) poolt.

Kõige pikaajalisemad ja usaldusväärsemad hoovuste mõõtmised Suures väinas toimusid 90-ndate aastate esimesel poolel Põhjamaade Ministrite Nõukogu poolt finantseeritud Liivi lahe projekti raames. Neid täiendasid ka ETF grandiprojektide käigus kogutud hoovuste kiiruste andmed. Alljärgnevas toodud analüüs veevahetusest läbi Suure väina baseerubki põhiliselt nendel hoovuste mõõtmistel aga ka numbriliste mudelite tulemustel.

Veevahetuse protsessi Väinamere ja Liivi lahe vahel mõjutab põhiliselt selle piirkonna tuuleväli. Madalas meres põhjustab tuul nn tuulehoovusi, kuid samuti veetaseme erinevusi alambasseinides, mis omakorda võib mõjutada hoovusi. Allpool vaadeldakse neid tingimusi ja protsesse lähemalt erinevates ajamastaapides.

Tuule tingimused

Mõõtmisandmete analüüs ja mudeluuringud (Suursaar et al, 2004) näitasid, et süsteemi Liivi laht - Väinameri ja nendega seotud väinade (Irbe väin, Suur väin, Soela väin ja Hari kurk) veevahetuse üldskeemi määrab ära põhiliselt tuul. Seejuures on olulised nii tuule kiirus kui ka suund. Kõige intensiivsem veevahetus läbi Suure väina on NNW ja SSE tuulte korral, st tuuled mis puhuvad piki väina. Suure väina veevahetust mõjutavate tuulesündmuste sageduste ja tugevuse hindamiseks võib kasutada meteojaamade andmeid. Lähim meteojaam Suurele väinale paikneb Virtsus, kuid vastavalt artiklis Soomere ja Keevallik (2001) toodud hinnangule, antud jaam ei kirjelda adekvaatselt Väinamere regiooni tuuli. Põhjuseks on meteojaama vähene avatus kõikidele tuultele, st jaamas mõõdetud tuuled kirjeldavad ainult lokaalseid tuulolusid ja ei iseloomusta laiema piirkonna tuulerežiimi. Skaalal 0-25 (25 vastab maksimaalsele avatusele) on Virtsu meteojaama avatus SSE tuultele 5 ja NNW tuultele ~15. Soomere ja Keevallik (2003) hindasid Eesti rannikujaamade avatust tuuleridade statistiliste parameetrite baasil ja leidsid, et regiooni tuuli iseloomustavad hästi Vilsandi meteojaama andmed. Vilsandi meteojaama pikaajalise tuuleandmete rea (1966-1999) statistiline analüüs tehti autorite poolt kõigi tuulte, mõõdukate tuulte (tuule kiirus $>5 \text{ m s}^{-1}$) ja tugevate tuulte (tuule kiirus $>10 \text{ m s}^{-1}$) jaoks. Analüüsist selgus, et tuulte suuna jaotus on kahe tipuga, kusjuures tugevalt domineerisid SW tuuled ja teine tipp oli N või NNW tuulte korral. Suure väina veevahetust määravate tuulte jaotus oli järgmine. Kõigi tuulte korral oli NNW ja SSE tuulte korduvus ~7 %. Mõõdukate tuulte korral oli NNW ja SSE tuulte korduvus ligikaudu sama, mis kõigi tuulte korral. Tugevate NNW tuulte korduvus oli suur (~12 %), samal ajal tugevate SSE tuulte korduvus jäi alla 5 %. Uuritavas regioonis on domineerivateks tuulteks SW ja SSW tuuled, kusjuures SSW mõõdukate ja tugevate tuulte korduvus on vastavalt 13 ja 18%. Siin on oluline, et SW ja SSW tuultel on ka põhjasuunaline komponent, mis mõjutab voolamist Suures väinas. Vilsandi meteojaama tuule andmete analüüs aastatest 1977-1991 näitas, et mõõdukate ja tugevate tuulte jaotuses suuna järgi säilib kahe tipuga jaotus kõikidel sesoonidel (Soomere ja Keevallik, 2001). Maksimaalseteks NNW ja SSE tuulte kiiruseks sel ajavahemikul mõõdeti 24 ja 15

m s^{-1} vastavalt. Suures väinas on mõõdetud ka suuremaid tuule kiirusi. Suursaar et al. (2004) mõõtsid 23. jaanuaril ja 2. oktoobril 1995 a. tuule kiiruseks Suures väinas 27 m s^{-1} , millega kaasnesid vastavalt põhja- ja lõunasuunalised hoovused kiirusega kuni 1 m s^{-1} , mis mõõdeti 12 m sügavusel. Autorid hindasid, et pinnakihis võisid hoovuse kiirused ulatuda 1.5 m s^{-1} .

Veevahetuse, lainetuse ja sette transpordi modelleerimisel tuleks kasutada numbrilise atmosfääri mudeli HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) tuule prognoosi andmeid. HIRLAM mudeli versiooni 6.4.0 tuule andmete kvaliteeti Eesti rannikutsoonis on hinnanud Keevallik et al., 2008. Autorid leidsid:

1. HIRLAM mudelil on tendents ülehinnata tuule kiirust ja õhuvoolu tsonaalset komponenti. Meridionaalne komponent on kergelt ülehinnatud Eest põhja- ja läänerannikul.
2. HIRLAM mudelil on probleeme nõrkade tuulte suundade prognoosiga.
3. Mõõdukate ja tugevate tuulte korral on 90% juhtudest HIRLAM mudeli tuulte suuna erinevus mõõdetud tuulte suunast väiksem kui $\pm 22.5^\circ$; umbes 60% juhtudest erines suund vähem kui 10%.
4. HIRLAM modelleeris Eesti rannikutsoonis tuuli kõige paremini läänerannikul. Seega järeldub HIRLAM mudeli tuule andmete kvaliteedi hinnangutest, et HIRLAM tuule prognoosi andmete kasutamine hoovuste modelleerimisel Väinamere regioonis on põhjendatud.

Hoovused

Esimesed Liivi lahe projekti kiirusvälja mõõtmised toimusid 1993 ja 1994 aastal kokku kuuel korral 2–5 nädalaste perioodidena (Suursaar et al, 1995; Suursaar et al, 1996a), hõlmates ligikaudu 30% kogu võimalikust 1.5-aastasest perioodist. Vaatlusriidades domineeris kaks hoovuste suunda: $130\text{--}160^\circ$ (sissevool Liivi lahte) ja $340\text{--}350^\circ$ (väljavool Liivi lahest), mis on suhteliselt hästi vastavuses väina teljele ja taustatuulele. Kiiruse mooduli keskmine üle mõõtmiste oli 0.19 m s^{-1} ning maksimaalne kiirus 0.92 ja 0.95 m s^{-1} vastavalt välja- ja sissevoolu korral.

Hinnati ka hoovuse ja tuule kiiruste korrelatsiooni (N–S komponentide vahel). Leiti, et korrelatsiooni koefitsient oli suurem tugevate tuulte ($0.85\text{--}0.9$) ning väiksem nõrkade tuulte (0.57) korral. Vastav regressiooni mudel võimaldab Suures väinas hästi tugevate tuulte juhul ($30\text{--}35 \text{ m s}^{-1}$) hoovuse kiirusi kuni 1.5 m s^{-1} .

Kiirusriidade spektraalanalüüs näitas, et väina teljesihiliste kiiruste muutlikkus moodustas 92–95% kogumuutlikkusest. Spektrites domineeris suure usaldusväärtusega piik $12.5 \pm 0.1 \dots 0.3$ h, mis ühtib ligilähedaselt poole-ööpäevase tõusu-mööna M_2 perioodiga (12.42 h). Vähem usaldusväärsemad piigid vastasid perioodidele $24\text{--}30$ h ja $3\text{--}4$ päeva (atmosfääri tsükloonaalse aktiivsuse päritolu) ning $1.4\text{--}1.6$ ja $4.5\text{--}4.8$ h, milliseid interpreteeriti vastavalt Väinamere ja Liivi lahe seiside esimeste moodidena. Väärib märkimist, et kiiruse spektrites puudus inertsperioodile vastav piik.

Järgmiste mõõtmiste lisandumisega (1994. a lõpp ja 1995. a) suurenes keskmine kiirus kogu mõõtmisperioodil (434 päeva), olles 0.25 m s^{-1} (Suursaar et al, 1996a; Suursaar et al, 1996b). Maksimaalne kiirus mõõdeti 1994/95 talvel 1.00 m s^{-1} mõlemas suunas seda just puuduva jääkatte tõttu. Kevadel ja suvel olid hoovuse kiirused ~ 2 korda väiksemad

kui jäävabal talvel. Jääkatte korral olid kiirused suhteliselt väiksed: keskmiselt 0.05–0.15 m s⁻¹ ja maksimaalselt kuni 0.35 m s⁻¹.

Viimased kättesaadavad hoovuse kiirused pärinevad 1995. a detsembrist kuni 1996. a maini (Suursaar et al, 1998a). Detsembris olid kiirused kuni 0.40 m s⁻¹, jääkatte all valdavalt kuni 0.20 m s⁻¹ ja pärast jääminekut kuni 0.40 m s⁻¹. Keskmise kiirus kogu 6-kuulise perioodi jooksul oli ligilähedaselt sama, 0.135 m s⁻¹, mõlemas suunas.

Veevahetuse hinnangud hoovuste mõõtmiste põhjal

Juba esimesed mõõtmised Suures väinas näitasid, et kiirusväli on piisavalt ühtlane (kahe domineeriva suunaga) veevahetuse hindamiseks läbi väina (Suursaar et al, 1995). See võimaldas leida Suure väina vooluhulga Q [km³ d⁻¹] jaoks empiirilise seose $Q = k \cdot 0.035 \cdot v$, kus v [cm s⁻¹] on keskmine kiirus ja $k = 0.9, 1, 1.1$ on paranduskoeffitsient. Viimase valik sõltus mõõteriistade arvust (1 või 2) ning jääkatte olemasolust talvel.

Mõõdetud hoovuse kiiruste põhjal leiti nn ööpäevaselt kaalutud alusel aastaseks sissevooluks 128 km³ ja väljavooluks 91 km³, mis tähendab aastast summaarset veevahetust 37 km³ Liivi lahe suunas (Suursaar et al, 1995). Ligilähedaselt samad hinnangud saadi ka nn sesoonsel alusel: sissevool 107 km³ ja väljavool 78 km³ ning vastavalt summaarne veevahetus 29 km³. Leitud sisse- ja väljavoolude hinnangud on samas suurusjärgus varasemate hinnangutega (Mardiste, 1976; Petrov, 1979), kuid summaarne aastane veevahetus on vastupidise suunaga, vastavalt –50 ja –38 km³. Viimane tulemus näitab, et kõik senised analüüsitud hoovuse kiiruste vaatlusread on olnud liiga lühikesed. Seetõttu võis näit üks torm (9–14 novembril 1993, väljavool mahuga 8 km³) oluliselt mõjutada veevahetuse hinnangut (Suursaar et al, 1995).

Olgu lisatud, et veevahetus läbi madala väina Viirelaiu ja Muhu saare vahel mõjutab tulemust ainult 2–4%. Küll aga omab voolamine läbi Suure väina (Viire kurgu) olulist tähtsust Liivi lahe veevahetuses, mis hinnanguliselt võib olla kuni 32% (Suursaar et al, 1996b).

Uued Suure väina veevahetuse hinnangud saadi 1995. a kiirusvälja mõõtmisandmete lisandumisega, kusjuures kogu perioodi 1993–1995 hinnangud leiti erinevate aastate põhiselt (Suursaar et al, 1996b, Suursaar et al, 1996c). Kogu selle perioodi (434 päeva) aastapõhine sissevool oli 139 km³ ja väljavool 159 km³. Seega oli summaarne veevahetus –20 km³ st Liivi lahest Väinamerre. Olgu märgitud, et eelpool toodud hinnangud (1993–94) olid määratud kas ööpäeva või sesooni põhiselt. Leitud aastapõhised vooluhulgad on esitatud järgnevas tabelis (Suursaar et al, 1996b alusel).

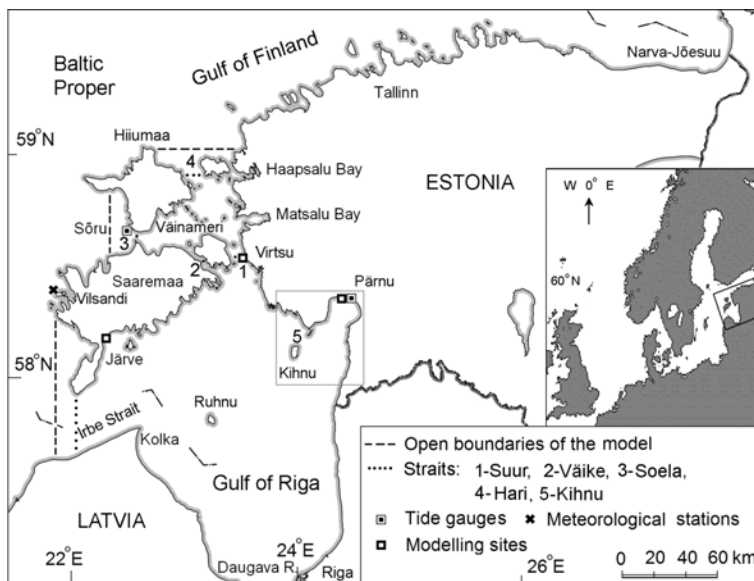
Tabel 1. Vooluhulkade hinnangud.

Hinnang/aasta	1993	1994	1995	1994–95
Mõõtmiste kestvus (päevad)	42	206	186	392
Sissevool (km ³)	14.3	69.6	80.9	150.5
Väljavool (km ³)	11.9	75.5	102.0	177.5
Aastane sissevool (km ³)	125	123	159	140
Aastane väljavool (km ³)	104	133	201	165
Summaarne veevahetus (km ³ a ⁻¹)	+21	–10	–42	–25

Tabelist nähtub ilmekalt, et domineerib voolamine Liivi lahest Väinamerre. Vastupidine summaarne voolamine 1993. a on seletatav kindlasti mõõtmisrea lühidusega. Järgmistel aastatel olid vaatlusread ligikaudu poole aasta pikkused, mistõttu ka hinnangud on palju usaldusväärsemad. Samuti on eristatav aastatevaheline muutlikkus veevahetuses kui võrrelda 1994. ja 1995. a. Suur summaarne väljavool 1995. a on tingitud jäävabast talvest. Ligikaudne keskmine hinnang hõlmates jääkattega ja jäävaba talvi on toodud tabeli viimases veerus. Arvestades vaatlusriidade suhteliselt suurt pikkust, võib summaarset väljavoolu -25 km^3 lugeda vägagi usaldusväärseks hinnanguks. See hinnang on mõnevõrra väiksem ajaloolistest -50 km^3 (Mardiste, 1976) ja -38 km^3 (Petrov, 1979), mis võib olla tingitud erinevatest hinnangute leidmise meetodikatest kui ka aastatevahelisest muutlikkusest.

Veevahetuse hinnangud numbriliste mudelite alusel

Suur väin on osa süsteemist Liivi laht – Väinameri-avameri ja neid ühendavatest väinadest Irbe väin, Suur väin, Soela väin ja Hari kurk (Joonis 1). Veevahetust selles süsteemis on uuritud nii välimõõtmiste kui ka numbriliste mudelite abil TU Eesti Mereinstituudis Põhjamaade Ministrite Nõukogu Liivi lahe projekti (1993-1998) ja mitme Eesti sisese projekti (1998-2004) raames. Järgnev ülevaade kasutatud mudelitest ja tulemuste analüüsist tugineb artiklitele Kullas et al (2000), Otsmann et al (2001), Suursaar et al (1998b, 2000, 2002, 2004, 2006), Suursaar and Kullas (2006).



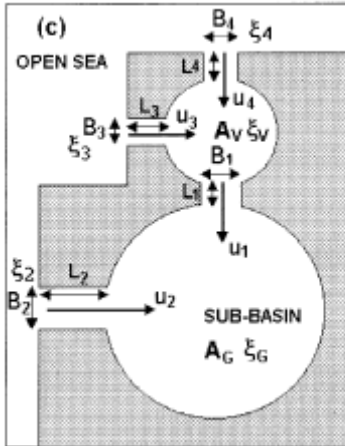
Joonis 1. Uuritava ala kaart. Kriipsjoonega on tähistatud mudelite avatud piirid. Punktiirjoonega on tähistatud väinad. Joonis on võetud artiklist Suursaar and Kullas (2006).

Mudeluuringutes kasutati kahte tüüpi mudeleid 1) Liivilahe – ava-Läänemere neljakanaline sundvõnkumiste veevahetuse mudel ja 2) madala mere võrranditel põhinev 2D hüdrodünaamiline mudel.

Neljakanaline sundvõnkumiste mudel

Väinades ruumiliselt keskmistatud voolamise ja alambasseinide (Liivi laht ja Väinameri) keskmise veetaseme kirjeldamiseks töötati välja neljakanaline sundvõnkumiste mudel

(forced oscillation model, FOM). Modelleeritava piirkonna (Joonis 1) idealiseeritud kuju ja geometria on toodud Joonisel 2. Mudelis vaadeldi kahte konstantse pindalaga basseini (A_G ja A_V), mis olid omavahel ja avamerega ühendatud väinadega.



Joonis 2. Uuritava ala üldistatud skeem ja parameetrid veevahetuse mudeli jaoks. L_i on väina pikkus, B_i on väina laius, u_i on sügavuses ja pikkuses keskmetsatud voolamine väinades, ξ_i ($i = 1-3$) on veetase avatud piiridel, ξ_G ja ξ_V on veetase vastavalt Liivi lahes ja Väinameres, A_G ja A_V on vastavalt Liivi lahes ja Väinameres pindalad. Joonis on võetud artiklist Otsmann et al (2001).

Väinade pikkus (L_i), laius (B_i) ja sügavus (H_i) olid samuti konstantsed. Indeks i tähistab erinevaid väinu: Suur väin ($i=1$), Irbe väin ($i=2$), Soela väin ($i=3$) ja Hari kurk ($i=4$). Samuti on eeldatud, et veetasemed basseinides (ξ_G ja ξ_V) on ühtlased üle basseinide pindala, mis tähendab, et veetaseme muutused basseini sees on põhjustatud sisse- ja väljavoolust läbi väinade ja jõgede sissevoolust.

FOM koosneb neljast momendi võrrandist (iga väina jaoks), mis on integreeritud piki väina ja sügavuses, ja mahu jäävuse võrranditest Liivi lahe ja Väinamere jaoks (Otsmann et al, 2001):

$$\begin{cases} \frac{du_i}{dt} = \frac{g}{L_i} \Delta \xi_i + \frac{\tau_i}{H_i} - \frac{k|u_i|u_i}{H_i}, \\ A_G \frac{d\xi_G}{dt} = u_1 A_1 + u_2 A_2 + Q_G, \\ A_V \frac{d\xi_V}{dt} = -u_1 A_1 + u_3 A_3 + u_4 A_4 + Q_V, \end{cases}$$

siin $\Delta \xi_i$ ($i = 1-4$) on veetasemete vahe Liivi lahe ja Väinamere vahel ning avamere ja väinade vahel, g on gravitatsiooni kiirendus, ρ_w on vee tihedus, H_i on väina sügavus, τ_i tuule pinge, k on põhjahõõrde koefitsient, A_i on väinade ristlõike pindalad, Q_G ja Q_V on vastavalt jõgede sissevoolud Liivi lahte ja Väinamerre.

Mõjuvateks jõududeks olid tuule pinge, mis arvutati HIRLAM mudeli tuule andmetest,

veetasemete vahe väinade otstes, põhjahõõre. Samuti arvestati jõgede sissevoolu mõlemasse alambasseini. Veetase mudeli avatud piiridel saadi kas mõõtmistest või Läänemere 2D mudeli arvutustest (täpsemalt vt Otsmann et al 2001). Mudel kalibreeriti ja valideeriti kasutades hoovuse kiiruse mõõtmisi Suures väinas kolmel perioodil: 22 oktoober – 15 november 1993, 1 jaanuar – 31 märts 1995 ja 1 juuni – 31 juuli 1995. Mudeli ja mõõdetud kiiruste kokkulangevus oli väga hea, korrelatsiooni koefitsient oli 0.95. Jõgede sissevool mõjutab uuritavas süsteemis voolu kiirusi ja vee taset väga vähe. Jõgede sissevoolu arvestamine on vajalik ainult alambasseinide pikaajalise veebilansi arvutustes.

2D hüdrodünaamiline mudel

Eesmärgiga selgitada täpsemalt voolamise horisontaalset struktuuri ja hinnata, kas voolamist võib väinas vaadelda ühesuunalisena, koostati ja lahendati numbriliselt 2D hüdrodünaamiline madala mere võrranditel põhinev barotroopne (vertikaalselt integreeritud) vabapinnaline mudel (2DM) uuritava ala (Joonis 1) jaoks (Suursaar and Kullas, 2006):

$$\frac{DU}{Dt} - fV = -g(H + \xi)\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho_w} - \frac{kU}{H^2}(U^2 + V^2)^{1/2},$$

$$\frac{DV}{Dt} + fU = -g(H + \xi)\frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho_w} - \frac{kV}{H^2}(U^2 + V^2)^{1/2},$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{H}\left(U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y}\right),$$

kus U ja V on vertikaalselt integreeritud vood x ja y suunas, ξ on veetaseme kõrgus (kõrvalekalle tasakaalu sügavusest H), f on Coriolise parameeter, ρ_w on vee tihedus, τ_x ja τ_y on tuulepinge komponendid.

Tuulepinge arvutuseks kasutatakse HIRLAM mudeli tuule prognoosi.

Kahe mudeli tulemusi võrreldi ka omavahel. Mudelitega arvutatud keskmetsatud kiirused Suures väinas korreleerusid omavahel väga hästi, korrelatsiooni koefitsient oli 0.99.

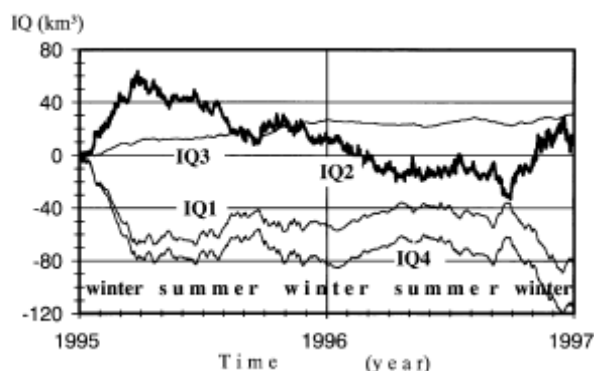
Mudelsimulatsioonide tähtsamad tulemused Suure väina jaoks

Mõõtmised Suure väina ristlõike kolmes erinevas punktis näitasid, et voolamine väina ristlõikes on praktiliselt homogeenne igal ajahetkel (Otsmann et al, 2001), mis õigustab vooluhulkade hindamisel ühe poijaama andmete ja ka FOM ja 2DM arvutuste tulemuste kasutamist.

Mudeleksperimendid näitasid, et maksimaalsed voolu kiirused Suures väinas (konstantne ja homogeenne tuul kiirusega 7 m s^{-1}) on tuule suundade 174° ja 354° korral.

Otsmann et al (2001) modelleerisid voolamisi väinades kasutades realistlikke tuule ja avatud piiride veetasemete tingimusi aastatel 1995-1996. Nad leidsid, et vee liikumise kogu süsteemis (kaasaarvatud Suur väin) perioodidega vahemikus 1 aasta ja 2 päeva määrab põhiliselt tuul. Veetaseme muutused avatud piiridel omasid kergelt suuremat rolli liikumistele perioodidega vahemikus 1 ja 0.5 päeva. Looded ja seišid on vähetähtsad.

Modelleeritud integraalsete vooluhulkade read väinades on toodud Joonisel 3. Jooniselt on näha nii sesoonsed kui ka aastatevahelised vooluhulkade muutused Suures väinas (IQ1), mis on põhjustatud tuulevälja sesoonsete ja aastatevaheliste muutlikkusega uuritava ala kohal. Tuule suunad 90° ja 270° on voolu suuna muutuste murdepunktideks kõikide väinade jaoks, väljaarvatud Soela väin. Uuritavas piirkonnas domineerivad mõõdukad ja tugevad SSW ja SW tuuled (nt Soomere ja Keevallik, 2003), mis põhjustavad väljavoolu Suurest väinast nagu ka pikilahte SSE tuuled. Talv 1994/1995 oli uuritavas piirkonnas tormine ja jäävaba, mis põhjustas tugeva väljavoolu läbi Suure väina (Joonis 3, 1995 aasta esimesed kuud). Talv 1995/1996 oli külm (jääkate Suures väinas) ja põhjakaarte tuulte domineerimisega SW tuulte suhtes. Nendes tingimustes toimus nõrk sissevool läbi Suure väina, mida näitab ka integraalse vooluhulga (IQ1) käik perioodil jaanuar-märts. Suvi 1996 oli suhteliselt tuulevaikne, mis kajastub integraalse vooluhulga väikestes muutustes. 1996 aasta sügis-talv (oktoober-detsember) oli tuuline põhjustades tugeva väljavoolu läbi Suure väina.



Joonis 3. Modelleeritud (1995-1996) integraalsed vooluhulgad (km^3) Suures väinas (IQ1), Irbe väinas (IQ2), Soela väinas (IQ3) ja Hari Kurgus (IQ4). Arvutustes kasutati keskmist jõgede sissevoolu 33 km^3 . (Joonis on võetud Otsmann et al, 2001).

Arvutatud kiiruste ja vooluhulkade statistika modelleeritud perioodi kohta on toodud Tabelis 2. Tabelis toodud aasta keskmiste hoovuse kiiruste ja vooluhulkade märgatavad muutused kajastavad samuti tuulerežiimi erinevusi nendel kahel aastal. Näiteks oli aastane väljavool läbi Suure väina 1995 aastal 189 km^3 ja 1996 aastal 137 km^3 . Sissevoolu muutused olid sel perioodil väiksemad. Väljavool läbi Suure väina ületas 1995 aasta sissevoolu 53 km^3 võrra, 1996 aastal ainult 27 km^3 võrra.

Tabel 2. Kiiruse ja voolu hulga statistika Suures väinas modelleerimisperioodil 1995-1996. Välja tähendab voolamist põhja suunas. Tabel on koostatud kasutades andmeid artiklist Otsmann et al (2001).

	Sisse	Välja
Maksimaalne kiirus, 1995-96 (cm s^{-1})	89	94
Keskmine kiirus, 1995 (cm s^{-1})	20	15
Keskmine kiirus, 1996 (cm s^{-1})	16	19
Aastane vooluhulk, 1995 (km^3)	136	189
Aastane vooluhulk, 1996 (km^3)	110	137

Suure väina veevahetuse võimalikud muutused seoses kavandatava püsiühendusega

Suursaar et al (2000) on modelleerinud ka juhte, mis imiteerivad püsiühenduse rajamist Suure väina, st mudelarvutusi tehti muutes väina ristlõiget. Mudelarvutused tehti FOM mudelit. Sellised hinnangud on olulised kuna Suur väin on lahutamatu osa süsteemis Liivi laht - Väinameri - ava-Läänemeri ja seega mõjutavad muutused Suure väina veevahetuses kogu süsteemi vee- ja ainevahetust. Arvutused tehti 1995 aasta realistlike tuule tingimuste ja veetasemete väärtustega avatud piiridel.

Sõltuvalt püsiühenduse asukohast Suures väinas, tammide (pealesõidud sillale) ja silla sammaste konstruktsioonist eeldati, et Suure väina ristlõike võib väheneda hinnanguliselt 10-20%. Leiti, et 10%-line ristlõike vähendamine Suures Väinas suurendab hoovuse keskmisi ja maksimaalkiirusi 2-4% võrra ning 20%-line vähendamine suurendab hoovuse keskmisi ja maksimaalkiirusi 5-10% võrra. Samal ajal vähenevad kiirused Hari kurgus, Soelas kiirused siseneval hoovusel suurenevad ja väljuval hoovusel vähenevad. Aasta jooksul läbi Suure väina Liivi lahte sissevoolavate veehulkade summa väheneb 10% ristlõike vähendamise korral 133 km³-lt 124 km³-le ning väljavoolavate veehulkade summa 190 km³-lt 178 km³-le (seega vähenemine 5-6%). Kui vähendati ristlõiget 20 %, siis saadi vastavateks veehulkade summadeks 114 km³ ja 153 km³ (seega vähenemine umbes 14%). Vooluhulgad kahanevad ligikaudu samal määral ka Hari kurgus, kuid Soela väinas jäävad vooluhulgad kas samaks, või sissevoolud võivad isegi pisut kasvada.

Autorid järeldasid, et saadud tulemusi otsesteks ökoloogilisteks mõjudeks (nt eutrofeerumise kiirenemine Väinameres) ümber hinnata on raske. Samuti leidsid autorid, et uuritava piirkonna vee- ja ainevahetuse režiimi täpsemaks kirjeldamiseks tuleks kasutada suure lahutusega 2D või 3D hüdrodünaamilist mudelit, soovitatavalt koos ökosüsteemi mudeliga.

Kirjanduse ülevaate kokkuvõte

1. Suure väina veevahetust mõjutab põhiliselt tuul. Kõige soodsamad on NNW ja SSE tuuled, st tuuled mis puhuvad piki väina. Tugevate NNW tuulte statistiline korduvus on ~12 %, tugevate SSE tuulte statistiline korduvus on alla 5 %. Domineerivateks tuulteks on SW ja SSW tuuled, kusjuures SSW mõõdukate ja tugevate tuulte korduvus on vastavalt 13 ja 18%. Kuna SW ja SSW tuultel on ka põhjasuunaline komponent, siis mõjutavad ka need tuuled oluliselt voolamist Suures väinas. Kuna põhiliseks mõjuvaks jõuks süsteemis Liivi laht – Väinameri-avameri ja neid ühendavad väinad on tuul, siis on voolu kiirustel tugev sünoptiline ja sesoonne komponent, mis on põhjustatud suuremastaabiliste atmosfääriprotsesside poolt. Samuti on Suure väina vooluhulkades suur aastevaheline muutlikkus.

2. Veevahetuse, lainetuse ja sette transpordi modelleerimisel tuleks kasutada HIRLAM mudeli tuule prognoosi andmeid.

3. Voolu kiirused väinas on suured. Aasta keskmine voolu kiirus on vahemikus 0.15-0.25 m s⁻¹, maksimaalsed mõõdetud voolu kiirused tugeva tormi ajal, tuule kiirus 27 m s⁻¹, olid 1 m s⁻¹. Veevahetuses domineerisid väljavoolud, mis omasid märkimisväärset aastevahelist muutlikkust. Veevahetus läbi Suure väina sõltub oluliselt ka jääkatte olemasolust Väinamere regioonis.

4. Täiendavad arvutused väikese võrgusammuga 2D hüdrodünaamilise mudeliga on vajalikud, kuna refereeritud töödes tehti arvutusi sundvõnkumiste mudeliga (sisuliselt punktmudel) ja 2D hüdrodünaamilise mudeliga, mille arvutusvõrgu samm oli 1 km. Võrgusamm 1 km on Püsiühendusega seotud ülesannete lahendamiseks ilmselt liiga suur.

2. KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

Tuule andmed näitasid, et mõõtmisperiodil puhusid suhteliselt tugevad põhja- ja lõunakaarte tuuled, keskmine tuule kiirus oli $7.0 \pm 3.5 \text{ m s}^{-1}$. Mõõtmisperiodi langes ka tugev sügistorm 23. novembril kui põhjakaarte tuulekiiruse maksimaalsed väärtused ulatusid 31 m s^{-1} . Võis eristada viis tuule impulssi, millede piki väina tuulepinge komponendi absoluutväärtused oli $\geq 0.2 \text{ N m}^{-2}$, kusjuures 23. novembri tormi ajal ulatusid maksimaalsed tuulepinge väärtused -0.9 N m^{-2} .

Hoovuse kiirused muutusid suurtes piirides, pikiväina hoovuse kiirused muutusid tormi ajal ja vahetult pärast tormi piirides -20 cm s^{-1} kuni 40 cm s^{-1} . Risti väina teljega hoovuse kiirused varieerusid vahemikus -5 kuni 5 cm s^{-1} .

Tuule ja hoovuste mõõtmisandmete analüüs näitas, et pikiväina hoovuse kiiruse ja tuulepinge korrelatsiooni koefitsient oli 0.53, mis viitab lisaks tuulepingele pikiväina veetaseme gradiendi olulisele rollile hoovuste genereerimisel Suures väinas. Lühemas ajamastaabis iseloomustasid voolamist Suures väinas võnkumised perioodidega ligikaudu 13 ja 24 h, mis on reaktsiooniks kiiretele tuule ja veetaseme muutustele piirkonna avatud piiridel. Mõõdetud olulised lainekõrgused väinas ulatusid tugevate tuulte korral 1.6 m. Modelleeritud ja mõõdetud pikiväina kiiruste vaheline korrelatsioon oli 0.88, mis on väga hea ja näitab, et numbrilise tsirkulatsioonimudeli tulemusi saab edukalt kasutada veevahetuse hinnanguteks. Mõõdetud ja modelleeritud oluline lainekõrgus langesid hästi kokku – vastav korrelatsiooni koefitsient oli 0.89. Mudel kirjeldas 10-20 cm alahindamisega olulist lainekõrgust suuremate lainetusesündmuste korral. Korrelatsioon mõõdetud ja modelleeritud laineperioodide vahel oli 0.67. Lainemudel alahindas perioode, kusjuures ruutkeskmine erinevus oli 1.6 s. Lõunatuulte korral levivad kõrgemad lained Suure väina kui põhjaloo tuulte korral. ROUTE II ja ROUTE III lähedal on juulis lained madalamad kui novembris. Arvutused tsirkulatsioonimudeliga, kus arvestati ka lainepinge poolt tekitatud kiiruse komponenti näitasid, et lainetuse mõju voolukiirusele ja seega ka veevahetusele Suures väinas on ebaoluline. Lainetuse arvestamine on oluline settetranspordi arvutustes.

Mudelarvutused Suures väinas kogu 2008. aasta kohta näitasid erinevate tuulerežiimide korral voolu kiiruse ja suuna ja seega ka veevahetuse suurt muutlikkust, kusjuures tuli selgelt välja sesoone muutlikkus. Suve kuudel (juuni, juuli, august) olid vooluhulgad väikese ja kogu perioodi summaarne veevahetus oli ligikaudu 5 km^3 . Võrdluseks, oktoobrist kuni detsembri lõpuni domineeris tugev voolamine Liivi lahest Väinamerre, summaarne vooluhulk oli ligikaudu 20 km^3 . Aasta summaarne voolamine oli ligikaudu 23 km^3 Liivi lahest Väinamerre. Juuli ja november valiti perioodideks, millede kohta teostati mudelarvutused teetammi (ROUTE III) mõju hindamiseks voolu kiirusele ja veevahetusele. Kumulatiivne veevahetus läbi Suure väina oli tugeva tuulega perioodil (november) 3.6 km^3 (domineeris voolamine Liivi lahest Väinamerre) ja nõrga tuulega perioodil (juuli 2008) -0.49 km^3 , domineeris voolamine Väinamerest Liivi lahte,

kusjuures perioodi sisene muutlikkus oli küllalt suur ja sõltus tuulerežiimist. Teostatud mõõtmisandmete ja mudelarvutuste tulemuste analüüsist ja eelnevatest uuringutest järeldub, et voolamise kiirust ja suunda ning ka veevahetust Suures väinas iseloomustab väga suur looduslik muutlikkus - võnkumiste perioodidest kuni aastatevahelise mastaabini.

Teetammi (ROUTE III) mõju hindamiseks voolu kiirusele ja veevahetusele Suures väinas teostati mudelarvutusi ilma tammita ja tammiga juuli ja novembri kohta. Mudelarvutused näitasid, et kuna tamm on Viirelaiu lähedal, siis on tammi mõju voolu kiirusele ja veevahetusele väga väike. Juulis oli keskmine voolu kiirus lõike Virtsu-Kuivastu keskel ilma tammita 3.36 cm s^{-1} ja tammiga oli kiirus minimaalselt suurem, 3.42 cm s^{-1} , kusjuures kiiruste ruutkeskmine erinevus oli 0.11 cm s^{-1} . Novembris oli keskmine voolu kiirus lõikel 13.3 cm s^{-1} ja voolu kiiruste r.m.s. erinevus tammiga ja ilma tammiga variantide vahel oli samuti väike, 0.5 cm s^{-1} . Kumulatiivset veevahetust tamm praktiliselt ei mõjutanud.

Töös hinnatakse teetammi mõju setete resuspensioonile ja transpordile. Mudelarvutused on teostatud kahe perioodi jaoks 2008 aastal: 14-29 november, mida iseloomustavad tugevad tuuled, kõrge lainetuse aktiivsus ja intensiivne veevahetus; ja 9-29 juuli, mida iseloomustavad nõrgad tuuled madal lainetuse aktiivsus ja väike veevahetus. Mudelarvutustes on kasutatud osakeste transpordi mudelit, kus on arvesse võetud osakeste resuspensioon lainetuse tekitatus nihkepinge tõttu ja osakeste transport tsirkulatsioonimudeliga arvatud hoovuste tõttu. Teetammi mõju setete transpordile on iseloomulik üle oluliselt suurema mereala kui mõju otseselt setete resuspensioonile. Peamine tendents teetammi olemasolu korral võib olla setete akumulatsioon teetammi ümbruses ja Viirelaiu ja Muhu vahelisel alal. Kui lainetuse aktiivsus on kõrgem, siis on ka mõjutatud mereala suurem.

Silla veealused konstruktsioonid ROUTE II-I ja ROUTE III-I vähendavad väina ristlõike pindala. Varasematest uuringutest on teada, et Suure väina ristlõike pindala vähendamine 10% suurendab keskmist ja maksimaalset voolu kiirust väinas 2-4%. Mõlemat tüüpi sildade veealused konstruktsioonid ROUTE II-I ja ROUTE III-I vähendavad väina ristlõike pindala ligikaudu 3% ja seega võib eeldada, et sildade veealuste konstruktsioonide mõju veevahetusele väinas on väga väike. Silla sammaste mõõtmised on väiksed ja seetõttu on nende mõju setete erosioonile/akumulatsioonile lokaalne ja pole käsitletud. Mõlemat tüüpi sildade veealused konstruktsioonid ROUTE II-I ja ROUTE III-I tõenäoliselt ökoloogilist olukorda piirkonnas ei mõjuta.

Kokkuvõtteks, teetamm ROUTE III-I mõjutab vähe voolurežiimi ja veevahetust Suures väinas võrreldes suure loodusliku muutlikkusega, kuid arvestatav setete akumulatsioon võib toimuda teetammi läheduses. Sildade veealused konstruktsioonid ROUTE II-I ja ROUTE III-I omavad väiksemat mõju voolamisele ja lainetuse režiimile ning veevahetusele ja setete ümberpaigutamisele Suures väinas.

Heljumi transpordi ehitusaegse hinnangu andmine ja mõjutatud mereala määramine on praegusel hetkel väga ebamäärane, kuna pole teade veealuste konstruktsioonide konfiguratsioonide ja tööde ajal rakendatavat tehnoloogiat.

3. LÄHTEANDMED JA METODOLOOGIA

3.1. Hoovuse kiiruse ja lainetuse parameetrite mõõtmised

Suures väinas püsiühenduse trasside 2A ja 2B piirkonnas viidi läbi hoovuse kiiruse ja lainetuse mõõtmised. Poijaam, mis koosnes AANDERAA hoovusemõõtjast ja SEABIRD lainemõõtjast paigaldati 13.11.2008 a. Virtsu lähedale punkti koordinaatidega 58° 34.95' N ; 23° 29.30' E. Sügavus poijaama asukohas oli 9 m. Hoovusemõõtja paiknes ~3.5 m sügavusel ja lainemõõtja ~2.5 m sügavusel veepinnast. Hoovusemõõtja mõõtmiste intervall oli 5 min ja lainemõõtja mõõtmiste intervall 0.25 s. Hoovuse kiiruse mõõtmised toimusid kuni 04.12.2008 ja lainemõõtmised kuni 6.12.2008.

Samaaegselt hoovuste ja lainetuse mõõtmistega Suures väinas viidi läbi tuule kiiruse ja suuna mõõtmised. Mõõtmiste läbiviimiseks installeeriti AANDERAA automaatne ilmajaam Kessulaiule 30-m kõrgusele. Tuule andmed registreeriti 5 min intervalliga ajavahemikus 21.11-13.12.2008.

3.2. Tsirkulatsiooni numbriline mudel

Hoovuste modelleerimiseks kasutatakse TTÜ Meresüsteemide Instituudis välja töötatud tsirkulatsiooni mudelit. Tsirkulatsiooni mudelit on rakendatud erinevate Eesti rannikumere piirkondade jaoks. Modelleerimispiirkond on sama, mis lainemudeli korral. Mudeli arvutuspiirkonnas on sisendiks Väinamere põhjatopograafia, mille ettevalmistamiseks kasutatakse digitaliseeritud merekaarte ja Veeteede Ameti poolt läbiviidud hüdrograafilisi mõõdistusi. Sügavuste andmed interpoleeritakse regulaarsele mudeli võrgule. Hoovuse kiiruse väljad avatud radadel saadakse Läänemere 2-mõõtmelisest mudelist. Mudeli kalibreerimiseks ja verifitseerimiseks teostatakse arvutused novembri 2008 kohta, mil toimusid hoovuse kiiruse mõõtmised. Mudeli sisendina kasutatakse atmosfääri mudeli HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) tuuleväljade prognoosi, mida verifitseeritakse Kessulaiul mõõdetud tuule andmetega. Kuna tegemist on madala ja tugevalt liigendatud rannajoonega piirkonnaga, kasutatakse mudeli sisendiks ka lainemudeli arvutatud lainepingete välju. Kvantitatiivseks võrdluseks arvutatakse mõõdetud ja modelleeritud hoovuse kiiruse põhjasuunaliste komponentide keskmine erinevus, ruutkeskmine erinevus ja korrelatsioonikoefitsient.

Hoovuste arvutamiseks Väinamere piirkonnas kasutati 2-mõõtmelist numbrilist mudelit, mis põhineb mittelineaarsetel madala mere võrranditel. Võrrandisüsteem koosneb vertikaalselt keskmistatud liikumishulga võrranditest

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_w^x}{h} - \frac{F_b^x}{h} + G^x,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_w^y}{h} - \frac{F_b^y}{h} + G^y,$$

ja pidevuse võrrandist

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0,$$

kus (u, v) on keskmised kiirused kogu veesambas, (F_w^x, F_w^y) on kinemaatiline tuule pinge, (F_b^x, F_b^y) on põhjahõõrde pinge, (G^x, G^y) on horisontaalne turbulentsne viskoossus (x, y) suunas, f on Coriolise parameeter, g on raskuskiirendus, η on veetaseme kõrvalekalle tasakaaluasendist, $h(x, y)$ on sügavus. Hõõrdumine mere põhjas on arvatud kasutades ruutsõltuvust hoovuse kiirusest

$$F_b^x = C_D |\vec{u}| u$$

$$F_b^y = C_D |\vec{u}| v$$

kus C_D on põhjahõõrde koefitsient. Põhjahõõrde koefitsient on võetud konstantseks, kuna puuduvad usaldusväärsed mõõtmised merepõhja ebatasasuste määramiseks. Horisontaalseid turbulentsi liikmed arvutatakse kasutades konstantset horisontaalse turbulentsse viskoossuse koefitsienti A_H :

$$G^x = A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$G^y = A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Seega võetakse numbrilises mudelis arvesse merepõhja topograafia, maakera pöörlemine, tuul, hõõrdumine mere põhjas ning horisontaalne turbulentsne viskoossus. Mudel ei arvuta temperatuuri ja soolsuse välju, seega ka hoovuste barokliinset komponenti, mis on Väinamere piirkonnas vähetähtis võrreldes tuule ja veetasemete muutuste poolt tekitatud hoovustega (Otsmann et al., 2001).

3.3. Lainemudel

Lainetuse modelleerimiseks kasutatakse SWAN (Simulating Waves Nearshore) lainemudelit. Lainemudel on sobiv rakendamiseks lainetuse välja arvutamiseks madalates merepiirkondades. Lainemudelit on rakendatud erinevate Eesti rannikumere piirkondade jaoks. Modelleerimise piirkonnaks on Väinameri. Mudeli avatud radadel Saaremaa ja Hiiumaa vahel, Hiiumaa, Vormsi ja mandri vahel ning Liivi lahe põhjaosas mandri ja Saaremaa vahel kasutatakse Läänemere kirdeosa mudeliga arvatud laineväljasid. Mudeli arvutuspiirkonnas on sisendiks Väinamere põhjatopograafia, mille ettevalmistamiseks kasutatakse digitaliseeritud merekaarte ja Veeteede Ameti poolt läbiviidud hüdrograafilisi mõõdistusi. Sügavuste andmed interpoleeritakse regulaarsele mudeli võrgule. Mudeli kalibreerimiseks ja verifitseerimiseks teostatakse arvutused novembri 2008 kohta, mil toimusid lainemõõtmised. Mudeli sisendina kasutatakse HIRLAM mudeli prognoositud tuulevälju. HIRLAM tuulevälju võrreldi enim Virtsus mõõdetud tuule andmetega. Mudelitulemustest arvutatakse olulise lainekõrguse ja perioodi ajaread lainemõõtja asukohas. Modelleeritud ja mõõdetud parameetrite võrdluseks kasutatakse visuaalset võrdlust, kus joonistatakse ühele ja samale joonisele modelleeritud ja mõõdetud olulise lainekõrguse ja perioodi ajaread. Kvantitatiivseks võrdluseks arvutatakse mõõdetud ja modelleeritud olulise lainekõrguse ja laineperioodi keskmine erinevus, standardhälve, ruutkeskmine viga ja korrelatsioonikoefitsient.

Lainemudeli kirjeldus

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

SWAN-is kirjeldab laineid kahemõõtmeline lainemõju spektraaltiheduse võrrand isegi juhul, kui mittelineaarsetel protsessidel on suur osatähtsus (nt kalda tsoonis). Loogiline põhjendus kasutamaks spektrit tugevalt mittelineaarsetes tingimustes on, et isegi sel juhul on võimalik piisava täpsusega ennustada lainete teise momendi spektraalset jaotust. SWAN-is vaadeldakse mõjutiheduse spektrit $N(\sigma, \theta)$, mitte energiatiheduse spekter $E(\sigma, \theta)$, kuna hoovuste olemasolu korral mõjutihedus säilib aga energiatihedus mitte. Sõltumatud muutujad on relatiivne sagedus σ (mida vaadeldakse taustsüsteemina, mis liigub hoovuse kiirusega) ja lainesuund θ (suund, mis on risti laineharjaga iga spektraalse komponendi korral). Mõjutihedus on võrdne energiatiheduse ja relatiivse sageduse suhtega:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}. \quad (1)$$

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:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial x} c_x + \frac{\partial N}{\partial y} c_y + \frac{\partial N}{\partial \sigma} c_\sigma + \frac{\partial N}{\partial \theta} c_\theta = \frac{S}{\sigma}, \quad (2)$$

kus

$$S = S_{in} + S_{nl4} + S_{nl3} + S_{ds} + S_{bf} + S_{br}. \quad (3)$$

Esimene liige võrrandi (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 relatiivse sageduse nihkumist seoses variatsioonidega batümeetrias ning hoovustes (leviku kiirusega c_σ σ -ruumis). Viies liige kirjeldab põhja ja hoovuste indutseeritud refraktsiooni (leviku kiirusega c_θ θ -ruumis).

Liige $S=S(\sigma, \theta)$ võrrandi paremal pool on lähteliige energiatiheduse formuleeringus. Võrrandis (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.

3.4. Setete transpordi mudel

Põhjasetete resuspensiooniks on vajalik, et nihkekiirus veekogu põhjal ületaks vastavate setete jaoks kriitilise nihkekiiruse. Nihkekiirus veekogu põhjal arvutatakse hoovuste ja lainetuse koosmõjul tekkivast nihkekiirusest. Hoovuse kiirused arvutatakse hüdrodünaamilise

udeliga, millest edasi tuletatakse hoovustest põhjustatud nihkekiirus veekogu põhjal kasutades lineaarset seost hoovuste kiiruse ja nihkekiiruse vahel. Lainetusest põhjustatud nihkekiiruse arvutamiseks on eelnevalt vaja arvutada lainevõnkumise amplituudid merepõhjas ning laine orbitaalkiirus. Lainevõnkumise amplituud avaldub kujul

$$A_b = \frac{H_s}{2 \sinh\left(\frac{2\pi D}{\lambda}\right)},$$

kus D on sügavus, λ on lainepikkus ja H_s on oluline lainekõrgus (Jönsson, 2006). Orbitaalkiirus avaldub

$$U_m = 2\pi \frac{A_b}{T_p},$$

kus T_p on laine periood. Nihkekiirus sõltub ka hõõrdetegurist f_w , mis arvutatakse järgmiselt

$$f_w = \begin{cases} 0.3, & \frac{A_b}{2.5d} < 1.57 \\ \exp\left(5.5\left(\frac{A_b}{2.5d}\right)^{-0.2} - 6.3\right), & \end{cases}$$

kus d on osakese läbimõõt. Nihkekiirus võtab niisiis kuju

$$u_{*w} = U_m \sqrt{\frac{1}{2} f_w}.$$

Lainetuse parameetrite arvutamiseks on kasutatud lainetuse mudelit SWAN.

Setete resuspensiooni intensiivsus arvutatakse (Khurts et al., 2004)

$$q_r = M\rho(u_*^2 - u_{*cr}^2), \quad u_* > u_{*cr},$$

kus ρ on vee tihedus ja M on konstant, mis sõltub põhjasetete materjalist.

Setete transpordi hindamiseks kasutatakse Lagrange'i osakeste transpordi mudelit. Osakesi transporditakse hoovustega (adveksioon) ning toimub turbulentsne osakeste dispersioon. Hoovuste transpordi jaoks on kasutatud hüdrodünaamilise mudeliga arvutatud kiiruste välja. Osakeste resuspensioon toimub võrgupunktides, kus hoovustest ja lainetusest tingitud nihkekiiruste summa ületab kriitilise nihkekiiruse. Resuspendeeritud setete hulk sõltub igale ajamomendile vastavast nihkekiirusest. Mida suurem on nihkekiirus seda rohkem setteid resuspendeeritakse. Ajaliselt interpoleeritakse kahel järjestikusel ajamomendil salvestatud kiirusvälja väärtused osakeste transpordi arvutamise ajahetkele. Turbulentsest dispersioonist tingitud osakeste liikumine on arvesse võetud läbi juhusliku väärtuste $[R]_{-1}^1$, kus $[R]_{-1}^1$ on juhuslik arv -1 ja 1 vahel, mis saadakse ühtlasest jaotusest. Osakese asukoht arvutatakse

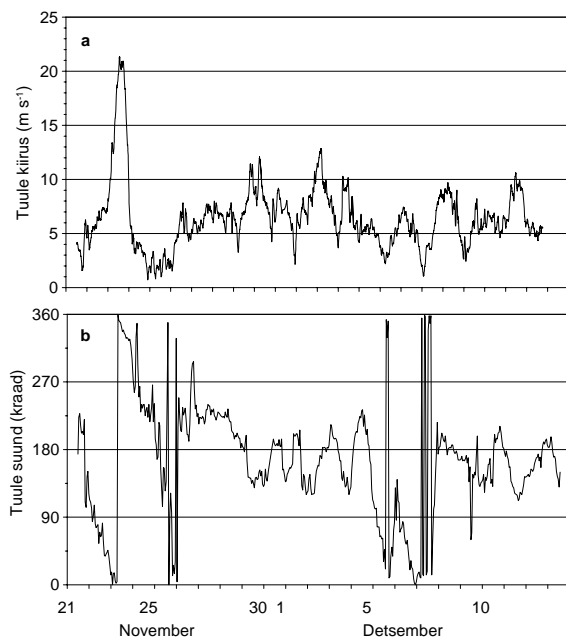
$$\vec{x}(t_n) = \vec{x}(t_{n-1}) + (\vec{v}_{adv}(t_{n-1}))\Delta t + [R]_{-1}^1 \Delta \vec{x} / 2,$$

kus \vec{v}_{adv} on osakese adveksiooni kiirus. Osakesed settivad võrgupunktides, kus nihkekiirus vastaval ajahetkel on väiksem kriitilisest nihkekiirusest. Osakeste transpordi mudelis on kasutatud kriitilist nihkekiirust 1.4 cm/s, mis vastab peenele liivale.

4. ANALÜÜSID JA TULEMUSED

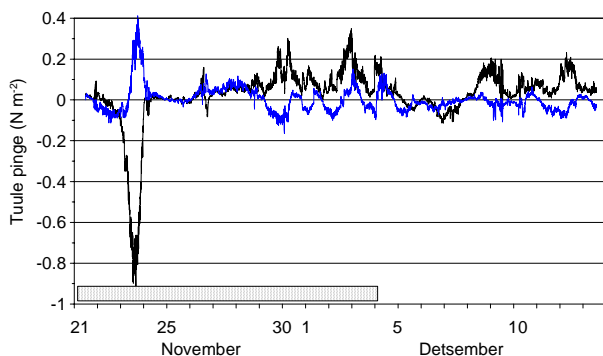
4.1. Tuule andmete analüüs

Tuule kiiruse ja suuna mõõtmised Kessulaiul toimusid ajavahemikus 21.11-13.12.2008. Tuule kiirus ja suund mõõtmisperioodil on toodud Joonisel 4. Mõõtmisperioodil puhusid suhteliselt tugevad põhja- ja lõunakaarte tuuled, keskmine tuule kiirus oli $7.0 \pm 3.5 \text{ m s}^{-1}$. Mõõtmisperioodi langes ka tugev sügistorm 23. novembril kui põhjakaarte tuulekiiruse maksimaalsed väärtused ulatusid 31 m s^{-1} . Tuule kiiruse komponent piki Suure väina telge omas maksimaalseid väärtusi kuni 23 m s^{-1} .



Joonis 4. Kessulaiul mõõdetud tuule kiirus (a) ja suund (b) ajavahemikul 21 november kuni 14 detsember 2008. aastal. Tuule kiirus on silutud 1 h libiseva keskmisega.

Tuule andmetest arvutati ka tuule pinge komponendid piki ja risti Suure väina teljega, mis on toodud Joonisel 5.

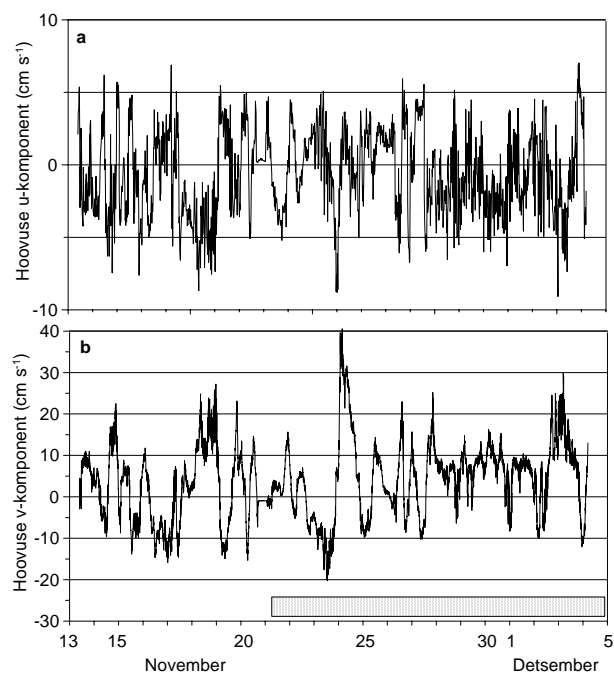


Joonis 5. Mõõtmisandmetest arvatud tuulepinge komponendid piki Suure väina telge (must joon) ja risti väina teljega (sinine joon). y-telje positiivne suund on põhja. Varjutatud ristkülik x – teljel näitab samaaegseid kiiruse mõõtmisi.

Joonisel 5 võib eristada viis tuule impulssi, millede piki väina tuulepinge komponendi absoluutväärtused oli $\geq 0.2 \text{ N m}^{-2}$, kusjuures 23. novembri tormi ajal ulatusid maksimaalsed tuulepinge τ väärtused -0.9 N m^{-2} .

4.2. Hoovuse kiiruse andmete analüüs

Hoovuste mõõtmisandmetest arvatati hoovuse kiiruse komponendid u (risti Suure väina teljega) ja v (piki väina telge), mis on esitatud Joonisel 6. Kiiruse komponent piki väina telge (v) kirjeldab veevahetust väinas, kusjuures väina sisse voolamine tähendab voolamist põhja suunas, st positiivsed v väärtused.



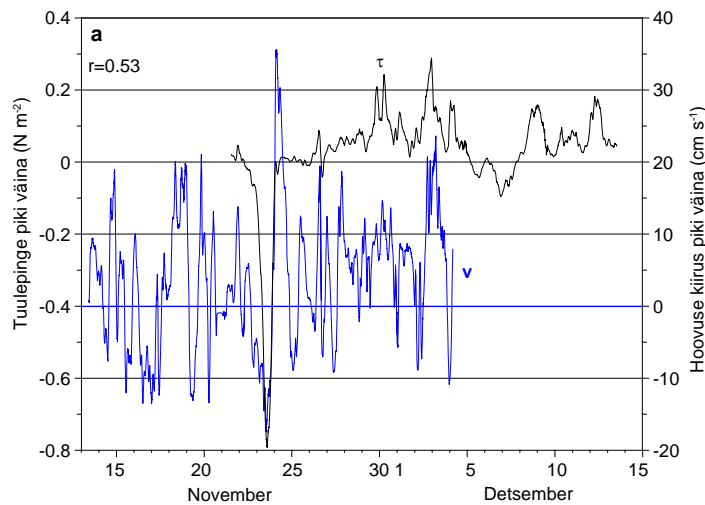
Joonis 6. Hoovuse kiiruse mõõtmistest arvatati kiiruse komponendid u risti Suure väina teljega (a) ja v piki väina telge (b). x -telje positiivne suund on itta ja y -telje positiivne suund on põhja. Varjutatud ristkülik aja teljel näitab samaaegseid tuule kiiruse mõõtmisi.

Jooniselt 6 on näha, et tugeva tormi ajal 23. novembril olid piki väina hoovuse kiirused kuni -20 cm s^{-1} , voolamine toimus Väinamerest Liivi lahte. Kõige suuremad piki väina hoovuse kiirused mõõdeti peale tormi ja ulatusid 40 cm s^{-1} . Risti väina teljega hoovuse kiirused (u) varieerusid vahemikus -5 kuni 5 cm s^{-1} (Joonis 6a).

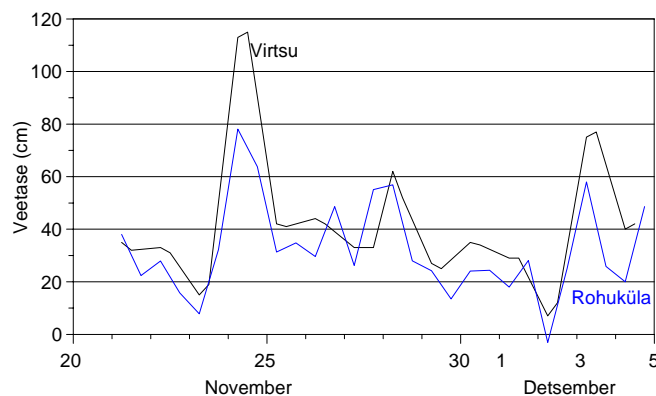
Joonisel 4 on toodud piki väina hoovuse kiiruse v ja tuulepinge τ ajaline käik. Jooniselt on näha, et tuulepinge ja hoovuse kiirus ei korreleeru eriti hästi. Korrelatsiooni koefitsient oli 0.53, mis viitab pikiväina veetaseme gradiendi olulisele rollile hoovuste genereerimisel. Tugeva tuule ajal 23. novembril, tuule pinge -0.9 N m^{-2} , olid hoovuse kiirused kõigest -20 cm s^{-1} . Joonisel 8 on toodud veetasemete muutused Virtsu ja Rohuküla mõõtejaamades. Jooniselt on näha, et 23. novembri hommikul hakkas veetasemete vahe (Virtsu-Rohuküla) kiiresti kasvama, ulatudes 24. novembri hommikuks $\sim 40 \text{ cm}$. See on ka tõenäoline põhjus, miks tugevate tuulte ajal jäid hoovuse kiirused väikseks ja tuule tugevuse kiirel vähenemise ajal 24. novembril tekkis tugev põhjasuunaline voolamine. Põhjasuunalised mõõdetud hoovuse kiirused ulatusid maksimaalselt kuni $\sim 35 \text{ cm s}^{-1}$.

Jooniselt 6b on ka näha, et voolamisele Suures väinas on iseloomulik erinevate perioodidega

võnkumised. Otsmann et al (2001) näitasid, et Suures väinas on kaks resonants perioodi, umbes 13 ja 24 tundi. Võnkumised on reaktsioon kiiretele tuule tingimuste muutustele ja veetaseme muutustele süsteemi piiiridel.



Joonis 7. Hoovuse kiiruse (v) ja tuulepinge (τ) piki väina telge komponendid.



Joonis 8. Veetaseme käik Virtsu (must joon) ja Rohuküla (sinine joon) mõõtejaamades. Veetaseme andmed on võetud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi kodulehelt.

4.3. Lainetuse mõõtmisandmete analüüs

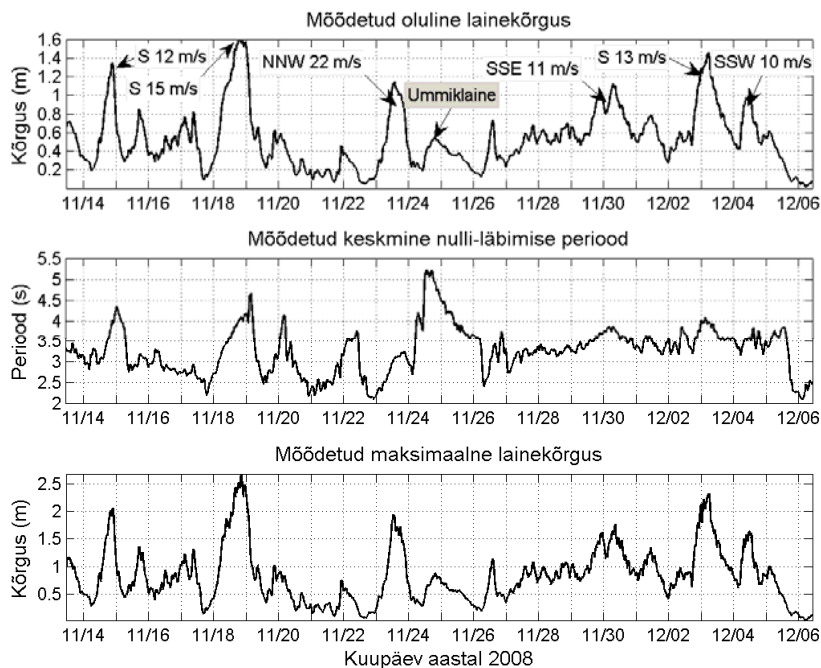
Rõhu (ehk veesamba kõrguse) aegrida jagati 10-minutilisteks osalõikudeks (lainepakettideks). Igast lainepaketist lahutati paketi keskmine ning trend. Järgmisena arvutati iga paketi spekter, kusjuures spektri amplituudid jagati „rõhu hajumise” koefitsiendiga (viimane sõltub mittelineaarselt nii lainearvust kui ka rõhuanduri paiknemisest vaba veepinna suhtes). Spektrist leiti oluline lainekõrgus (1/3 kõrgeimate lainete keskmine kõrgus kitsa spektri korral) ja keskmine laineperiood. Spektri põhjal rekonstrueeriti pinnalainete aegrida ning leiti lainepakettides esinevad maksimaalsed lainekõrgused.

Sügisest mõõtekampaniat Virtsu sadama lähedal iseloomustab suhteliselt aktiivne lainetuse foon, kus keskmine oluline lainekõrgus on 0.53 m ning maksimaalne oluline lainekõrgus 1.6 m (Joonis 9). Mõõteperioodi jooksul esineb üldiselt 6 lainetuse sündmust, mil oluline lainekõrgus kasvab üle 1 m. Keskmine laineperiood kogu mõõteperioodi jooksul on 3.3 s ning varieerub vahemikus 2 s kuni 5.5 s. Suuremate

lainetuse sündmustega kasvab periood. Maksimalne mõõdetud lainekõrgus üleüldse ületas 2.5 m (Joonis 9).

Esimene suurem lainetuse sündmus on 14 novembri õhtul, mil oluline lainekõrgus saavutab 1.35 m ning laineperiood on maksimaalselt 4.3 s. Tuul puhub antud lainetuse sündmuse ajal lõunast kiirusega 12 m s^{-1} . Mõõtekohas on lõunatuulte korral tuule mõjuala pikkus 170 km.

Järgmine, ühtlasi ka mõõteperioodi tugevaim lainetuse sündmus, leiab aset 18 novembril. Selle sündmuse käigus kasvab oluline lainekõrgus kuni 1.6 m, laineperiood kasvab kuni 4.5 s. Sündmuse tekitab lõunast puhuv tuul kiirusega 15 m s^{-1} .



Joonis 9. Mõõdetud laineparameetrid: oluline lainekõrgus (ülemine paneel), keskmine nulli-läbimise periood (keskmine paneel) ja maksimaalne lainekõrgus (alumine paneel). Tuule kiiruse väärtused enne mõõtmiste algust Kessulaiul on võetud HIRLAM mudeli tuule prognoosi andmetest.

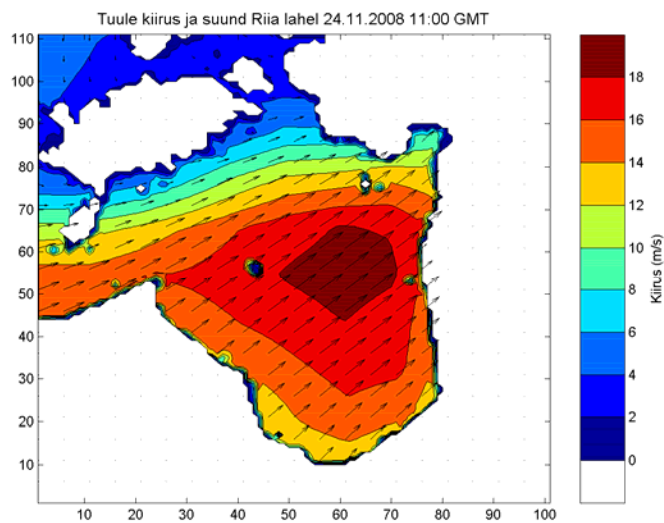
Kuigi mõõteperioodi tugevam tuul, põhjaloode tuul 22 m s^{-1} , mõõdetakse 23 novembril, ei kaasne sellega suurimat olulist lainekõrgust - oluline lainekõrgus jääb alla 1.2 m. Laineperiood antud sündmuse ajal on veidi üle 3 s.

Novembrikuu viimasel päeval tekitab lõunakagust puhuv tuul kiirusega 11 m s^{-1} olulise lainekõrguse kasvu 1.1 m. Laineperiood jääb 3.5-4 s piirimaile.

Tugevnenud lõunatuul 3. detsembri öösel, kiirus 13 m s^{-1} , tekitab olulise lainekõrguse veidi üle 1.4 m. Laineperiood sündmuse ajal on 4 s. Oluline lainekõrgus kasvab 1 meetrini. Edasi, 4. detsembri päeval, jääb laineperiood 3.5 s piirimaile.

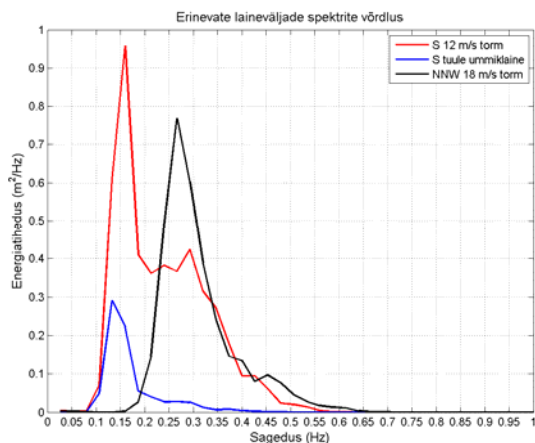
Kuigi ummiklainetuse osakaal mõõdetud laineväljades jääb Läänemeres tagasihoidlikuks, mõõdeti 24. novembri pärastlõunal ja õhtul ummiklaine, kus oluline lainekõrgus jääb 0.4-

0.5 m vahele ning assotsieeruv laineperiood on kuni 5.3 s. Tuule kiirus antud perioodil Kessulaiu mõõtejaamas jääb alla 5 m s^{-1} ning tuul puhub SW; lainespekter on tunduvalt madalamate sageduste poole nihkunud kui tormi ajal. Seega ei ole kahtlust, et tegemist on ummiklainetusega. Põhjendust sellele ummiklainetusele võib esimeses lähenduses otsida 23 novembri tormist, kus 22 m s^{-1} puhuvad NNW tuuled tekitasid olulise lainekõrguse 1.2 m. Samas lõppes antud torm ca 12 tundi enne ummiklainetuse teket ning on väga vähe tõenäoline, et Kessulaiu ja Muhu saare vahelisest alast ning madalast Väinamerest üleüldse ummiklaine läbi tungib. Uurides HIRLAM'i tuule välju antud perioodi kohta (24 november), näeme edela tormi Liivi lahel (Joonis 10) kiirusega kuni 18 m s^{-1} . Nagu näha väheneb tuule kiirus, liikudes Väinamere poole.



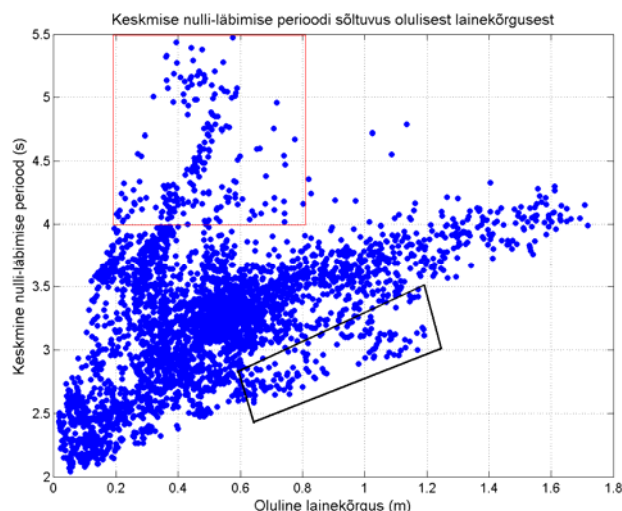
Joonis 10. HIRLAM'i tuuleväli (kiirus ja suund) Liivi lahe kohal 24. novembril kell 11.00 GMT.

Mõõteperioodi iseloomustab pika tuulemõjualaga (S tuul), lühikese tuulemõjuala (NNW tuul) ja ummiklainetusega laineväljad. Joonisel 11 on esitatud vastavate väljade spektrid. Nagu näha, genereerib 12 m s^{-1} puhuv lõuna tuul üsna laia spektri, mille maksimaalne piik asub 0.15 Hz juures ning sekundaarne piik 0.3 Hz juures. NNW 22 m s^{-1} tuul tekitab aga tunduvalt kõrgema piigisagedusega spektri, kus piik asub 0.25 Hz juures – NNW tuulte korral on mõjuala pikkus tunduvalt väiksem kui lõunatuulte korral ning spektril ei ole võimalust nihkuda madalamate sageduste poole; samuti on NNW tuulte korral veesügavus tunduvalt väiksem, kui S tuulte korral. Lõunast tuleva ummiklainetuse korral on spektri piik 0.13 Hz juures (periood 8 s) ning spektri saba kõrgemate sageduste pool omab marginaalset energiat.



Joonis 11. Laineväljade spektrid.

Üldiselt suureneb lainete periood olulise lainekõrguse kasvuga. See on visualiseeritud Joonisel 12. Musta ristkülikuga piiratud ala iseloomustab NNW tormi tekitatud lainetust ning punase ristkülikuga piiratud ala võimalikku ummiklainerust. Jättes need arvestamata, on selgelt näha, et lõunatuulte korral ning tuule kiiruse suurenedes kasvab oluline lainekõrgus ning periood kasvab vastavalt astmefunktsioonile. Kõige rohkem on mõõdetud väärtusi koondunud vahemikku 0.4-0.6 m ning 3-3.5 s, mis kajastab eelnevalt mainitud keskmist olulist lainekõrgust ning laineperioodi.



Joonis 12. Keskmise nulli-läbimise perioodi sõltuvus olulisest lainekõrgusest.

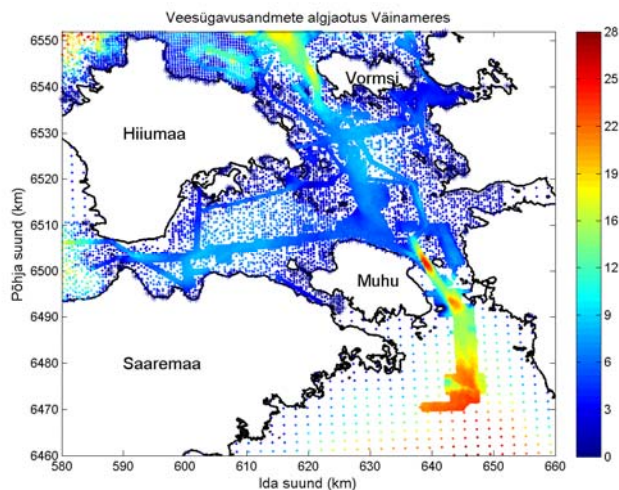
4.4. Lainemudeli seadistamine

Tuulelainetuse genereerib õhu liikumise horisontaalkomponent. Mudelarvutused Väinamere kohta on teostatud kasutades ajas ja ruumis muutuvat HIRLAM'i mudeli tuulevälju. Modelleerimisperioodiks on valitud 10.11.2008 00:00 GMT -15.12.2008 23:00 GMT ning tuuleväljad on mudelisse lülitatud 1 h sammuga.

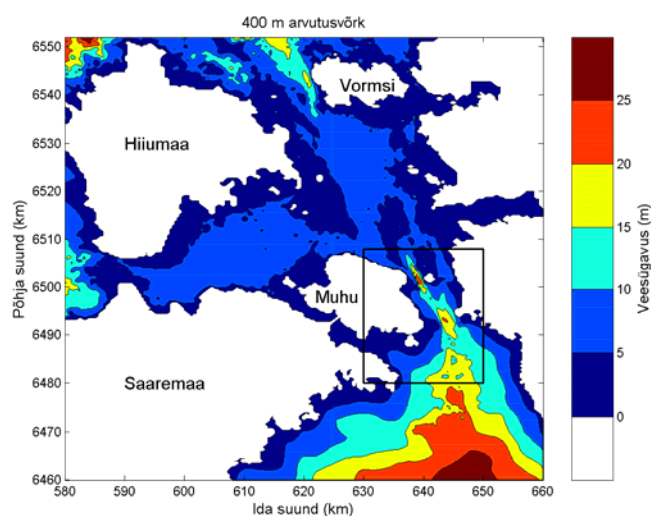
Mudelarvutused on läbi viidud kolmeastmeliselt. Esmalt modelleeritakse terve Läänemere laineväli eelpoolmainitud tuulte korral; mudeli võrgusammuks on 2 km nii

ida kui põhja suunas. Lainemudeli topograafia põhineb Seifert et al (1995) andmetel. Järgnevalt modelleeritakse Väinameri 400 m võrgusammuga, võttes rajatingimused Läänemere mudelist. Sellise lahutusega mudel toob välja Väinamere topograafia iseärasused ning võimaldab lainetuse levikut ka läbi kitsaste väinade nagu Voosi kurk ja Hari kurk. Kõrglahutusega Suure Väina lainemudelis on võrgusamm 100 m nii põhja kui ida sihis. Mudeli rajatingimused on Soome lahe arvutustest. Suure lahutusega lainemudelites (400 ja 100 m) on Väinamere topograafia manuaalselt digitaliseeritud merekaartidelt ning Veeteede Ameti mõõdistusi kasutades (veesügavuste algaotus on toodud Joonisel 13). Sügavusandmed on interpoleeritud ühtlasele 2000, 400 ja 100 m võrgule kasutades selleks meetodit Kriging. Väinamere põhjatopograafia on toodud Joonisel 14 ja Suure väina topograafia Joonisel 15. Samuti on HIRLAM'i tuuleväljad interpoleeritud vastavatele võrkudele.

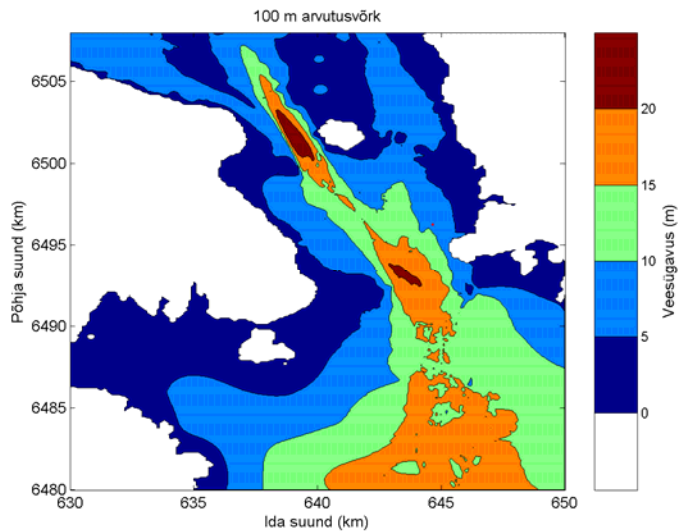
Igas mudeli arvutuspunktis leitakse laineenergia 960 spektraalse komponendi jaoks: 24 suuna korral ning 40 erineva sageduse korral, kusjuures sagedused on jaotunud logaritmiliselt vahemikku 0.05 – 1 Hz. Seega on võimalik modelleerida laineid, mille perioodid jäävad vahemikku 1 – 20 s.



Joonis 13. Merepõhja topograafia algaotus Väinameres ja Suures väinas. Värvusskaala: sügavus meetrites.



Joonis 14. Väinamere ja ümbritsevate väinade põhjatopograafia, mida kasutatakse 400 m võrgusammuga lainemudelis. Ristkülikuga on tähistatud 100 m võrgusammuga mudeli arvutuspiirkond.



Joonis 15. Kõrglahutusega Suure väina lainemudeli põhjatopograafia.

4.5. Lainemudeli verifitseerimine

Mudeli usaldusväärsust tõstab selle tulemuste võrdlemine reaalsete mõõtmisandmetega. Käesolevaga oleme võrrelnud modelleeritud ja mõõdetud olulist lainekõrgust ning keskmist nulli-läbimise perioodi, mis vastab spektri teise momendi arvatud perioodile. Vastavad võrdlused on tehtud nii 400 m võrgusammuga lainemudeli arvutustulemuste korral kui ka 100 m võrgusammuga lainemudeli tulemuste korral. Olulisi erinevusi 400 ja 100 m võrgusammuga arvutuste vahel ei olnud.

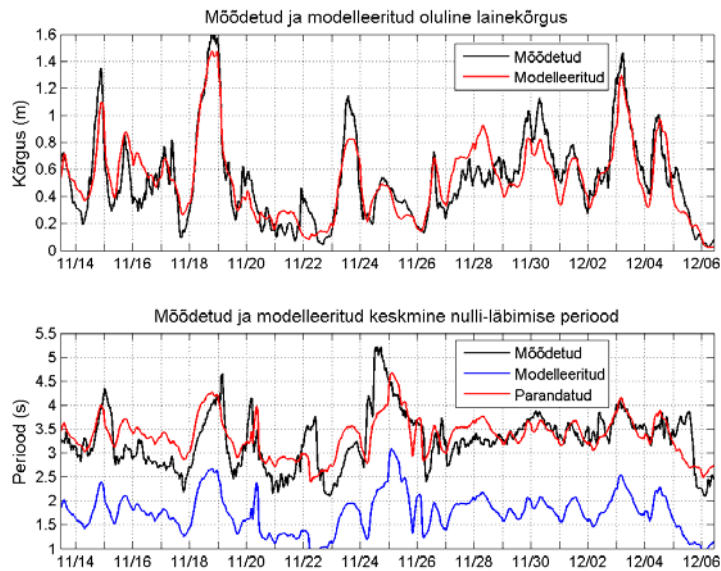
Väinamere 400 m võrgusammuga lainemudeli korral langevad mõõdetud ja modelleeritud oluline lainekõrgus hästi kokku – vastav korrelatsiooni koefitsient on 0.89 ning hajumise indeks (ruutkeskmise vea ja mõõdetud keskväärtuse suhe) 0.28 (Joonis 16, ülemine paneel). Mudel kirjeldab 10-20 cm alahindamisega kõiki suuremaid lainetusesündmusi ning ajaline käik mõõtmistega võrreldes langeb hästi kokku.

Korrelatsioon mõõdetud ja modelleeritud laineperioodide vahel on mõnevõrra kehvem kui olulistel lainekõrgustel, olles 0.67. Lainemudel alahindab perioode kogu mõõtmiskampania vältel, kusjuures ruutkeskmise erinevus on 1.6 s (Joonis 16, alumine paneel). Liites selle väärtuse modelleeritud laineperioodidele, saame üsna sarnase pildi mõõtmistega (joonis 16, alumine paneel).

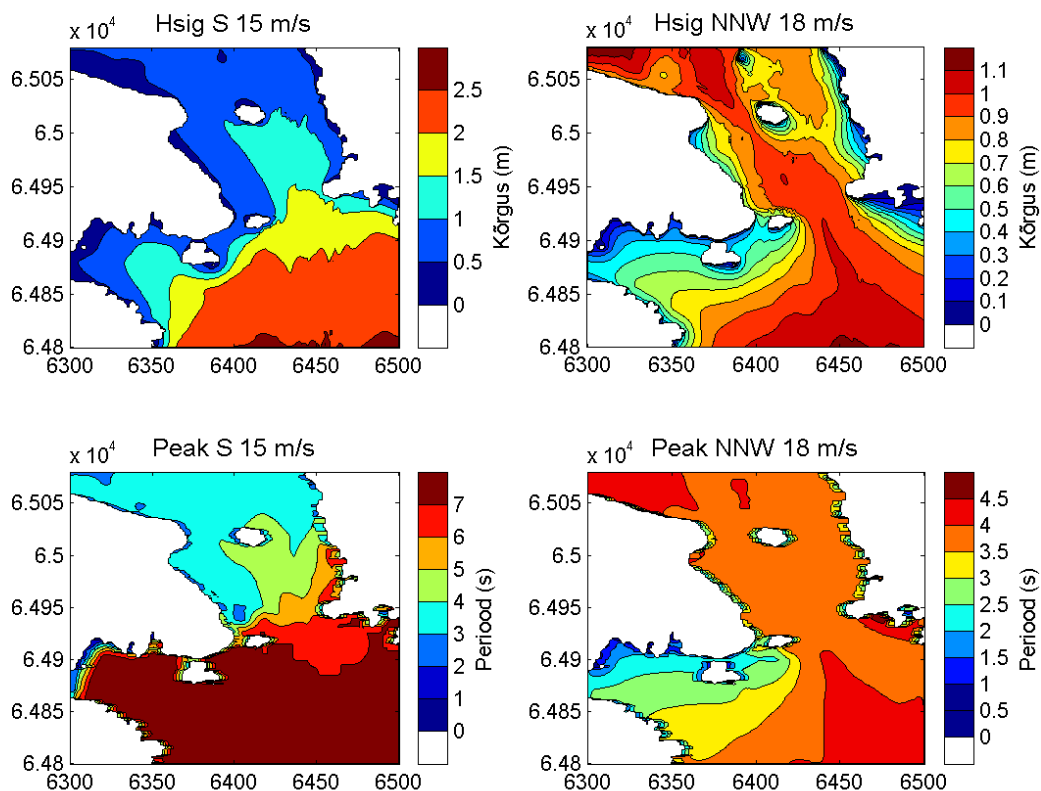
Olulise lainekõrguse mõttes simuleerib lainemudel 24 novembril esinenud ummiklainetust väga täpselt, samas jääb ummiklaine periood mudelis 2 s väiksemaks kui mõõdetud ning on nihutatud ajas veidi edasi.

Modelleeritud olulise lainekõrguse ala- või ülehindamised on otseselt seotud modelleeritud tuulevälja ning mõõdetud tuulevälja erinevusega.

Kaks lainesündmust, mis leidsid aset 19. ja 23 novembril, on iseloomulikud tugevale 15 m/s lõuna- ja tugevale 18 m/s põhjaloodetuulele. Nendest suundadest puhuvad tuuled tekitavad antud piirkonnas kõrgemaid laineid, kui teistest suundadest puhuvad tuuled. Vastavad olulise lainekõrguse ja piigi perioodi väljad on esitatud Joonisel 17. Lõunatuule korral levib kõrge laine (oluline lainekõrgus kuni 1.5 m) Suurde väina. ROUTE II ja III juures on oluline lainekõrgus umbes 2 m. Laine periood on 4-6 s. Põhjaloodetuule korral on oluline lainekõrgus 1-m ja periood vahemikus 3.5-4 s.



Joonis 16. Mõõdetud ja modelleeritud olulise lainekõrguse (ülemine paneel) ja keskmise nulli-läbimise perioodide (alumine paneel) võrdlus.



Joonis 17. Olulised lainekõrgused ja perioodid Suures väinas tugeva lõunatuule (vasul) ja põhjakirde tuule (paremal) korral.

4.6. Tsirkulatsioonimudeli seadistamine, verifitseerimine ja arvutused

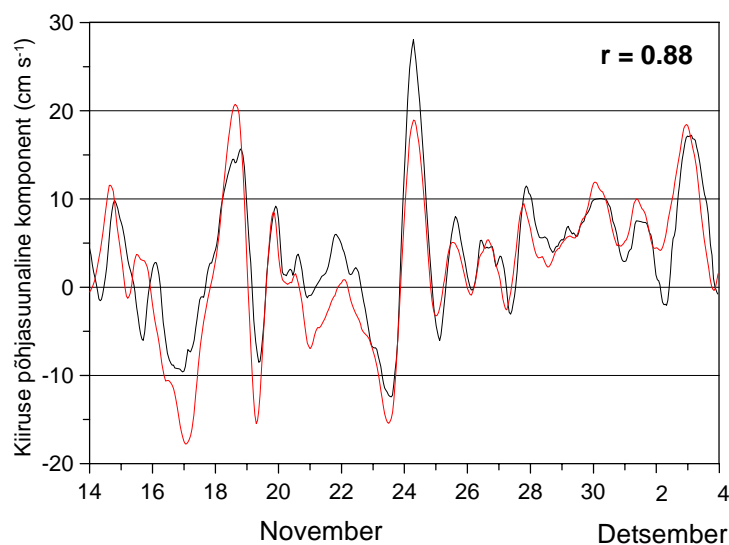
2008.a. kohta

Suure väina veevahetuse modelleerimine koosneb mitmest etapist. Esmalt teostatakse mudelarvutused Läänemere 2-mõõtmelise tsirkulatsioon mudeliga, mille arvutusvõrgu samm on 2 km. Tsirkulatsioonimudeli põhjatopograafia põhineb Seifert et al (1995) andmetel. Sisendina kasutatakse HIRLAM mudeli tuulevälja andmeid 1 h ajasammuga, mis on interpoleeritud tsirkulatsioonimudeli arvutusvõrgule. Modelleerimise perioodiks on kogu 2008. aasta.

Mudelarvutused Väinamere piirkonna kohta on teostatud 2-mõõtmelise tsirkulatsiooni mudeliga. Mudeli arvutusvõrgusamm on 400 m ja põhjatopograafia on sama mis lainemudelil (vt Joonis 14). Piiritingimused avatud radadel saadakse Läänemere 2-mõõtmelise tsirkulatsiooni mudeli arvutustest ja tuuleväli HIRLAM mudeli tuule prognoosist 1 h ajasammuga.

Kõrglahutusega mudelarvutused Suure väina kohta on teostatud 2-mõõtmelise tsirkulatsiooni mudeliga, mille arvutusvõrgu samm on 100 m ja põhjatopograafia on sama mis vastaval lainemudelil (vt Joonis 15). Piiritingimused avatud radadel saadakse Väinamere 2-mõõtmelise tsirkulatsiooni mudeli arvutustest ja tuuleväli HIRLAM mudeli tuule prognoosist 1 h ajasammuga.

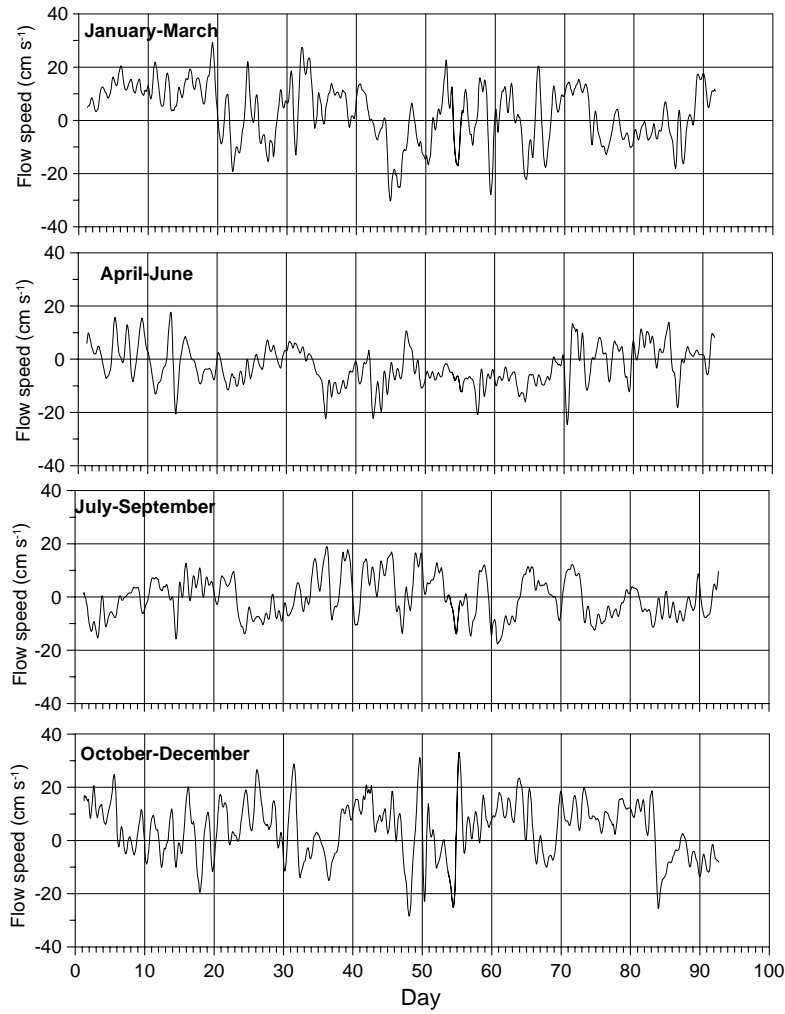
Tsirkulatsioonimudeli verifitseerimiseks kasutati novembris 2008 tehtud hoovuse kiiruse mõõtmisi Suures väinas. Verifitseerimine on toodud kõrglahutusega 2-mõõtmelise tsirkulatsiooni mudeli jaoks, mille arvutusvõrgu samm on 100 m. Ligilähedaselt sama tulemuse andis ka võrdlus arvutustega, mis tehti 400 m võrgusammuga. Kuna tsirkulatsioonimudel ei ole 12.42 h tõusu-mõõna võnkumisi, siis siluti mõõdetud kiiruse andmeid 12 h libiseva keskmisega (Otsmann et al, 2001). Joonisel 18 on toodud modelleeritud ja mõõdetud põhja- lõunasuunalise kiiruse komponendid. Jooniselt on näha, et kiiruste kokkulangevus on väga hea, mida kinnitab ka korrelatsioonikoefitsiendi väärtus 0.88. Mõningane kiiruse väärtuste lahkumine on näha suuremate hoovuse kiiruste korral.



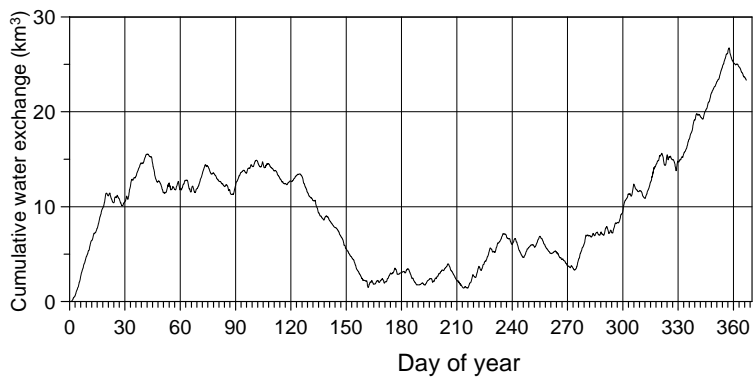
Joonis 18. Modelleeritud ja mõõdetud põhja-lõunasuunaliste kiiruste võrdlus Suures väinas. Põhjasuunaline kiirus on positiivne. Must joon – mõõdetud hoovuse kiirus, punane joon – modelleeritud kiirus. Mudelarvutused on tehtud 100 m võrgusammuga.

Voolamist Suures väinas iseloomustavad ligilähedaselt 12 ja 24 tunnise perioodiga võnkumised. Jooniselt 18 on näha, et tuulevälja kiire muutus nt 23 novembril (Joonis 7a) koos veetasemete muutusega (Joonis 8) tingivad suured muutused ka Suure väina kiirusväljas. Tugev voolamine Suures väinas võib muutuda lühikese ajaga vastupidiseks. Arvutused tsirkulatsioonimudeliga, kus arvestati ka lainepinge mõju kiirusväljale näitasid, et lainetuse mõju voolukiirusele ja seega ka veevahetusele Suures väinas on ebaoluline. Lainepinged saadi lainetuse numbrilise mudeli arvutustest. Lainetuse mõju arvestamine on oluline settetranspordi arvutustes madalas meres.

Verifitseeritud kõrglahutusega tsirkulatsiooni mudeliga teostati arvutused kogu 2008 aasta kohta. Tuule andmed saadi HIRLAM-i prognoosist 1 h ajasammuga. Joonisel 19 on toodud põhja-lõunasuunalised voolukiirused ja Joonisel 20 kumulatiivne veevahetus Suures väinas. Voolu kiirust ja suunda iseloomustab suur muutlikkus kogu aasta lõikes. Jooniselt 20 on selgelt näha veevahetuse sesoonne muutlikkus. Jaanuarist veebruari keskpaigani domineerisid põhjasuunalised kiirused ja Liivi lahest voolas Väinamerre 15 km³ vett. Veebruari keskpaigast aprilli lõpuni oli summaarne veevahetus läbi Suure väina väike. Maist juuni keskpaigani domineeris voolamine Väinamerest Liivi lahte, summaarne vooluhulk oli ligikaudu 10 km³. Suve kuudel (juuni, juuli, august) olid vooluhulgad väikesed. Alates oktoobrist kuni detsembri lõpuni domineeris tugev voolamine Liivi lahest Väinamerre, summaarne vooluhulk oli ligikaudu 20 km³. Aasta summaarne voolamine oli ligikaudu 23 km³ Liivi lahest Väinamerre. Kokkuvõtteks võib öelda, et nii voolu kiirust kui ka veevahetust läbi Suure väina iseloomustab suur looduslik muutlikkus.



Joonis 19. Põhja-lõunasuunalised voolukiirused Suures väinas 2008. aastal kvartalite lõikes.



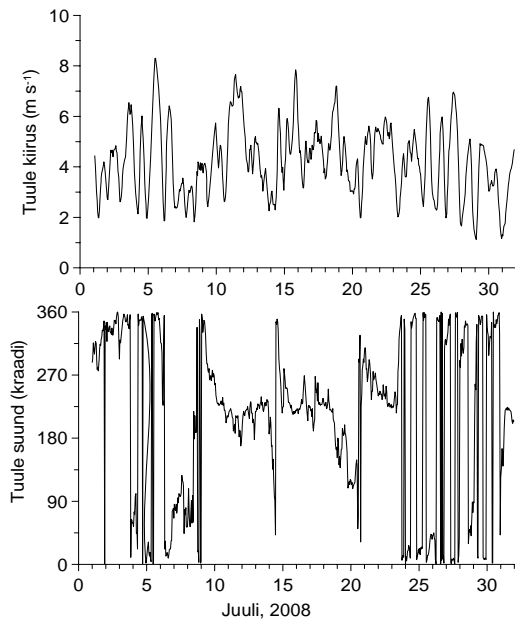
Joonis 20. Kumulatiivne veevahetus Suures väinas 2008. aastal.

4.7. Mudelarvutused ROUTE III ilma tammita ja tammiga

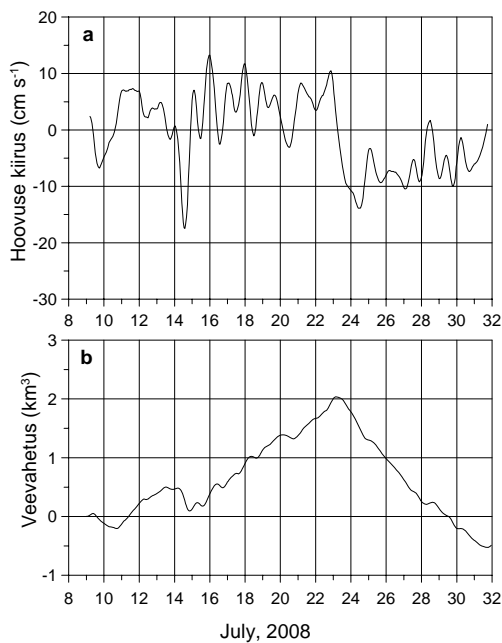
Silla veealused konstruktsioonid ROUTE II-l ja ROUTE III-l vähendavad väina ristlõike pindala. Varasematest uuringutest on teada, et Suure väina ristlõike pindala vähendamine 10% suurendab keskmist ja maksimaalset voolu kiirust väinas 2-4%. Mõlemat tüüpi sildade veealused konstruktsioonid ROUTE II-l ja ROUTE III-l vähendavad väina ristlõike pindala ligikaudu 3% ja seega võib eeldada, et sildade veealuste konstruktsioonide mõju veevahetusele väinas on väga väike ja ei mõjuta ka ökoloogilist olukorda regioonis. Edasi hindame tammi mõju ROUTE III-l veevahetusele Suures väinas.

Mudelarvutused verifitseeritud tsirkulatsiooni mudeliga, kus arvestati tammi ROUTE III-l, teostati kahe iseloomuliku perioodi jaoks. Perioodid valiti vastavalt aastase arvutuse tulemustele. Võrdluseks tugevate tuultega ja suure veevahetusega novembrile, arvutati kõrglahutusega tsirkulatsioonimudeliga hoovuse kiirused ja nendest veevahetus ka perioodiks 9-31 juuli, mil veevahetus oli väike.

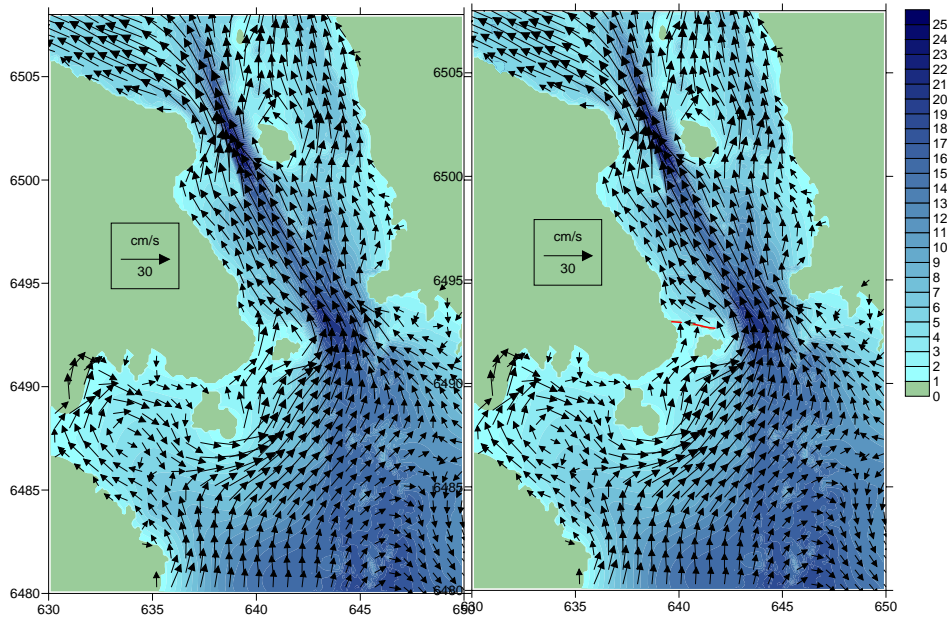
Sel perioodil oli tuule keskmine kiirus 4.2 m s^{-1} ja ka maksimaalsete tuulepuhangute ajal jäid tuule kiirused alla 8 m s^{-1} (Joonis 21). Vastavalt tuule mõjule, olid ka modelleeritud pikiväina hoovuse kiirused väikesed, jäädes enamasti alla 10 cm s^{-1} (Joonis 22a). Arvutusperioodi keskmine voolu kiirus olid ilma tammita 3.36 cm s^{-1} ja tammiga oli kiirus minimaalselt suurem, 3.42 cm s^{-1} , kusjuures kiiruste ruutkeskmine erinevus oli 0.11 cm s^{-1} . Joonisel 23 on toodud kiiruste jaotus väinas 16. juulil 2008 kell 00.00 UTC tammita ja tammiga. Jooniselt on näha, et tamm mõjutab kiirusvälja väga lokaalselt tammi läheduses. Samuti on jooniselt näha, et kiiruste jaotus väina ristlõikel ei ole homogeenne. Kogu arvutusperioodi kumulatiivne veevahetus oli -0.49 km^3 (Joonis 22b), mis on absoluutväärtuselt palju väiksem kui novembris ligikaudu sama pika perioodi jooksul. Samas on näha, et arvutusperioodi jooksul muutusid vooluhulgad suurtes piirides. Arvutuste algus, 9 juulist kuni 23 juulini toimus domineerivate edelatuulte (Joonis 21) mõjul voolamine Liivi lahest Väinamerre, kogu vooluhulgaga 2 km^3 (Joonis 22b). 23 juulil pöördus tuul põhjakaartesse ja Väinamerest voolas Liivi lahte 2.5 km^3 vett. Kogu perioodi veevahetus oli väike, kuid muutlikkus perioodi sees oli küllalt suur ja oli seotud tuulerežiimi muutustega.



Joonis 21. Tuule kiirus (ülemine paneel) ja suund (alumine paneel) mõõdetud Vilsandi meteojaamas juulis 2008 aastal.



Joonis 22. Pikkväina hoovuse kiirus lõike Virtsu-Kuivastu keskel (a) ja kumulatiivne veevahetus väinas tammiga (b). Tammita kiirusväli ja kumulatiivne veevahetus praktiliselt kattusid ja seetõttu ei ole neid esitatud.

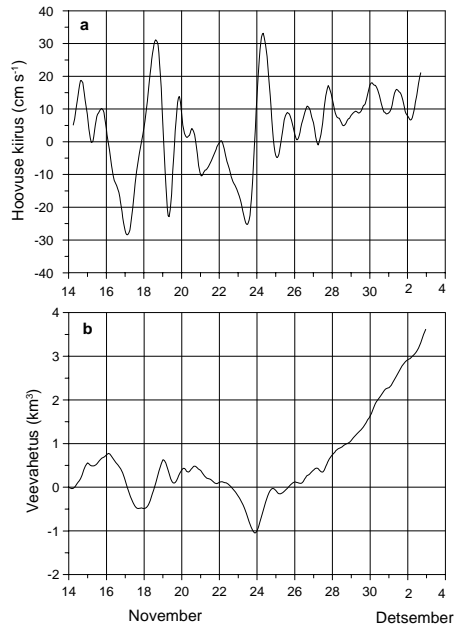


Joonis 23. Modelleeritud kiiruse väljad 16. juulil 2008 kell 00.00 UTC Suures väinas ilma tammita (vasakpoolne paneel) ja tammiga (parempoolne paneel). Punane joon tähistab tammi. Värvuskaala: põhja topograafia meetrites.

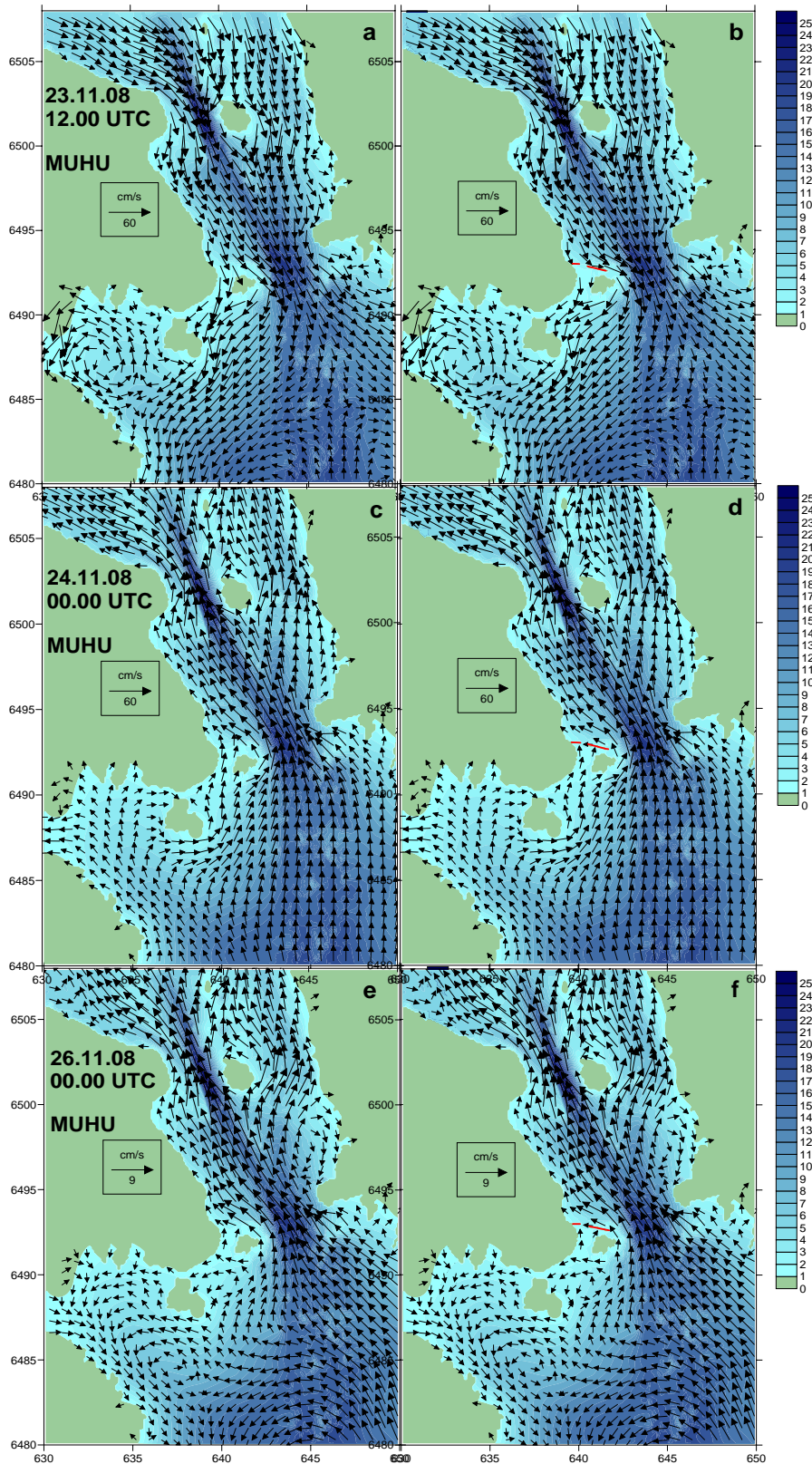
Novembris olid voolu kiirused märgatavalt suuremad, muutudes suures vahemikus 30 ja -30 cm s^{-1} (Joonis 24a). Arvutusperioodi keskmine voolu kiirus olid ilma tammita 12.9 cm s^{-1} ja tammiga oli kiirus samuti minimaalselt suurem, 13.3 cm s^{-1} , kusjuures kiiruste ruutkeskmise erinevus oli 0.5 cm s^{-1} . Tulemused näitavad, et ka suurte voolukiiruste korral on tammi mõju voolu kiirusele väinas minimaalne. Joonisel 25 on toodud kiiruste jaotused erinevate voolukiiruste korral tammita ja tammiga juhtude jaoks. Jooniselt on näha, et tammi mõju kiirusväljale on lokaalne, tammi läheduses. Arvutusperioodi kumulatiivne veevahetust oli 3.6 km^3 (Joonis 24b), mida tamm praktiliselt ei mõjutanud.

Juuli ja novembri lainetuse mudelarvutuse tulemused on oluliselt erinevad. Samas on oluline lainekõrgus ja periood mõõtmiste asukohas ja ROUTE II ja III vahel valitud punktis väga sarnane (Joonised 26 ja 27). Novembris on poole modelleerimisperioodi jooksul oluline lainekõrgus suurem kui 0.5, kuid juulis saavutab selle väärtuse ainult kahel korral. Ka perioodid on novembris suuremad kui juulis.

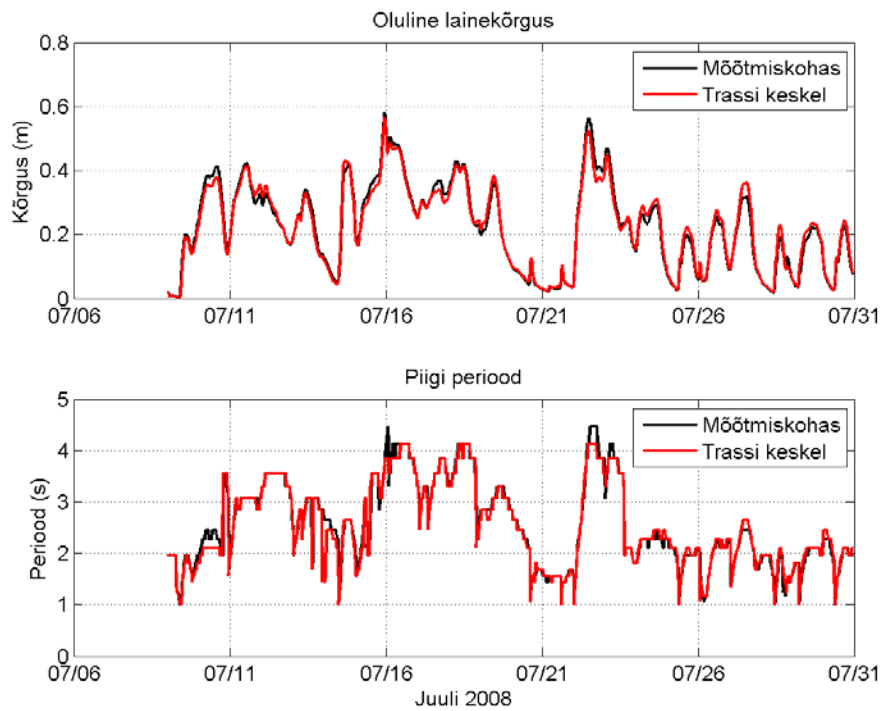
Mudelarvutused näitasid, et kuna tamm on Viirelaiu lähedal, siis on tammi mõju voolu kiirusele ja veevahetusele väga väike. Kiirusväljas võib tammi lähedal märgata väga väikesi muutusi, kuid need on lokaalse iseloomuga.



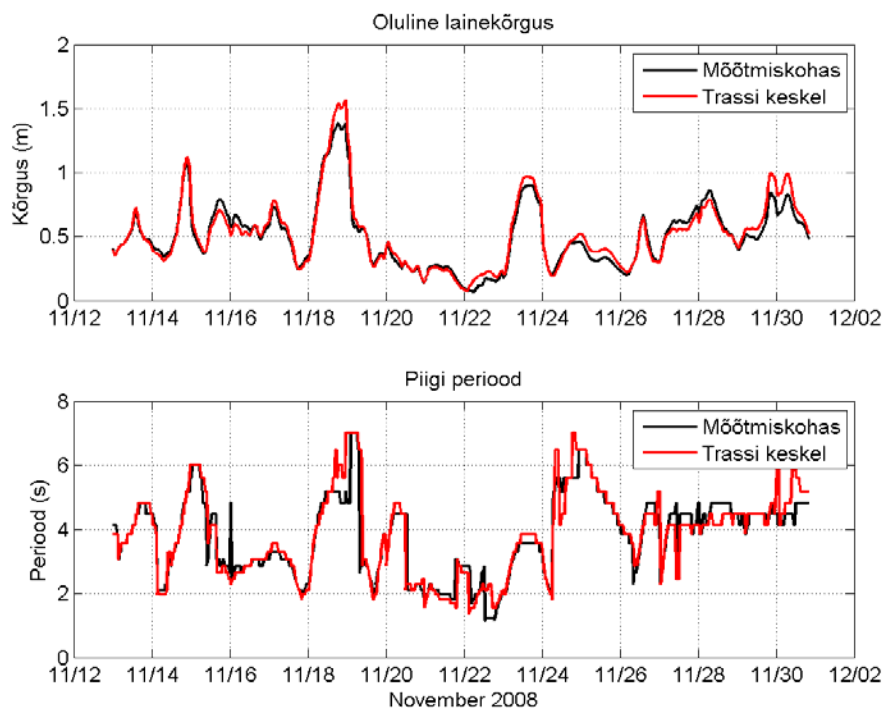
Joonis 24. Pikiväina hoovuse kiirus lõike Virtsu-Kuivastu keskel (a). Kumulatiivne veevahetus väinas tammiga (b). Tammita kiirusväli ja kumulatiivne veevahetus praktiliselt kattusid ja seetõttu ei ole neid esitatud.



Joonis 25. Modelleeritud kiiruse väljad novembris 2008 Suures väinas ilma tammita (vasakpoolsed paneelid) ja tammiga (parempoolsed paneelid) 3 voolurežiimi korral. (1) tugev lõunasuunaline voolamine ilma tammita (a) ja tammiga (b). (2) tugev põhjasuunaline voolamine ilma tammita (c) ja tammiga (d). (3) nõrk põhjasuunaline voolamine ilma tammita (e) ja tammiga (f). Punane joon tähistab tammi. Värvusskaala: põhja topograafia meetrites.



Joonis 26. Oluline lainekõrgus (ülemine) ja periood (alumine) mõõtmiste asukohas (must) ja ROUTE II ja III vahelises punktis (punane) juulis.



Joonis 27. Oluline lainekõrgus (ülemine) ja periood (alumine) mõõtmiste asukohas (must) ja ROUTE II ja III vahelises punktis (punane) novembris.

4.8. Setete transpordi arvutused olemasoleva olukorra ja teetammi korral

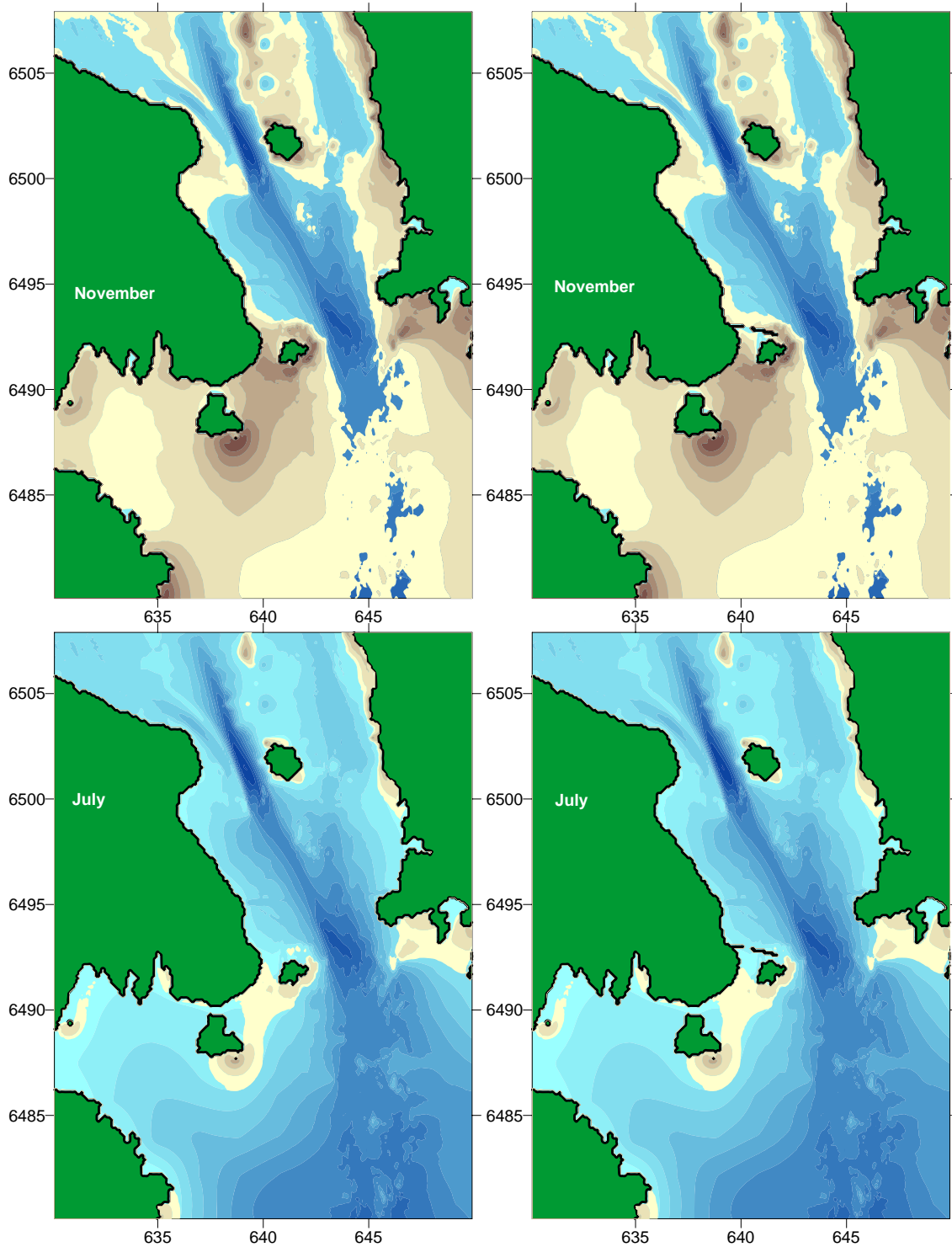
Silla veealused konstruktsioonid ROUTE II-I ja ROUTE III-I vähendavad väina ristlõike pindala ligikaudu 3% ja seetõttu võib eeldada, et mõju veevahetusele on ebaoluline. Silla sammaste mõõtmed on väiksed ja seetõttu on nende mõju setete erosioonile/akumuleerumisele lokaalne ja pole käsitletud. Mõlemat tüüpi sildade veealused konstruktsioonid.

Töös on hinnatud teetammi mõju setete resuspensioonile ja transpordile. Mudelarvutused on teostatud osakeste transpordi mudeliga, mis võtab arvesse lainetusest tingitud setete resuspensiooni ja hoovustest tingitud transpordi. Arvutused on tehtud kahe iseloomuliku perioodi jaoks 2008. a.: 14-29 november, mida iseloomustavad tugevad tuuled, kõrge lainetuse aktiivsus ja intensiivne veevahetus; ja 9-29 juuli, mida iseloomustavad nõrgad tuuled madal lainetuse aktiivsus ja väike veevahetus. Võrdlevalt on arvutused läbi viidud olemasoleva olukorra ja teetammi olemasolu korral.

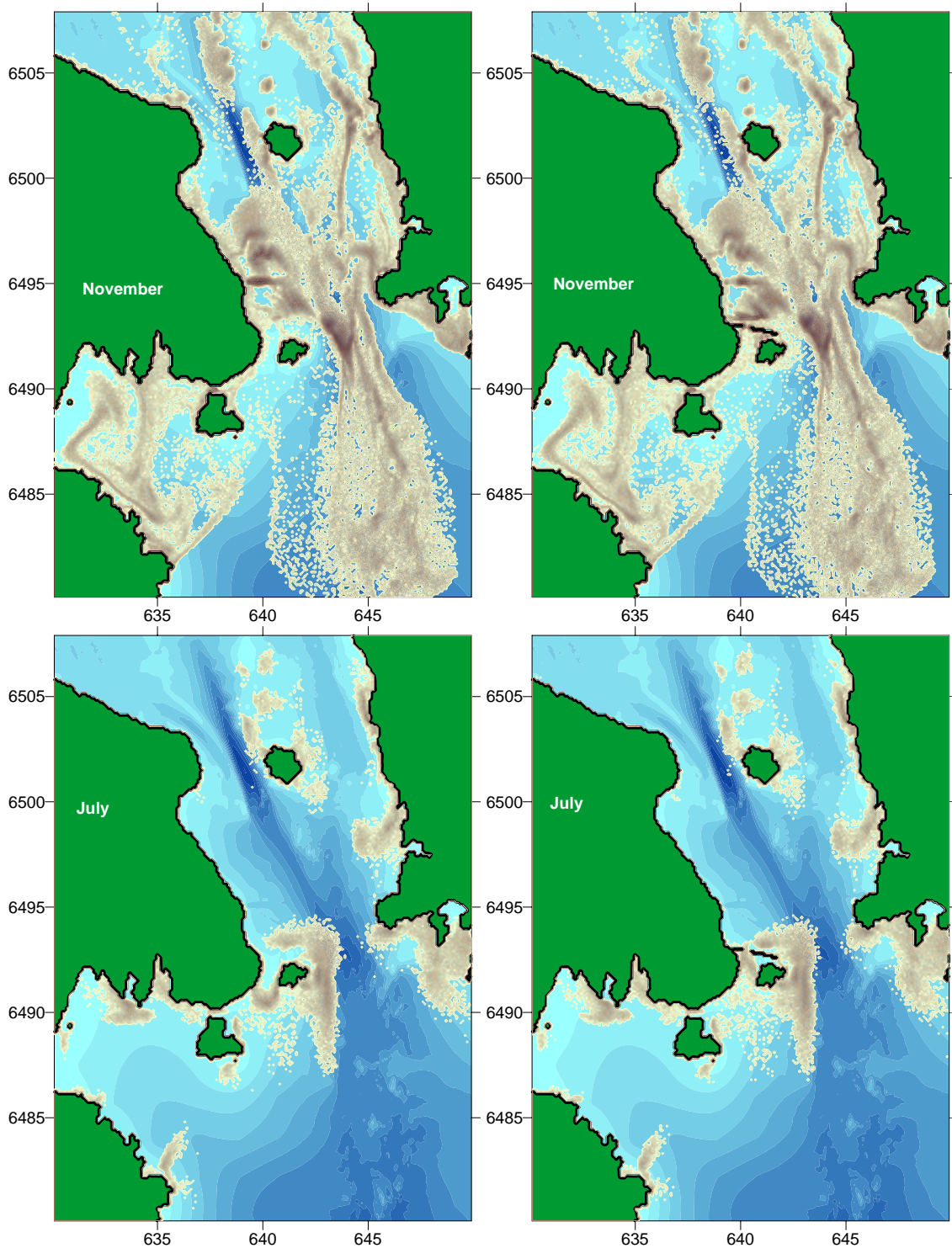
Selleks, et välja tuua illustreerivalt erinevad lainetuse režiimid on arvutatud üle modelleerimisperioodi keskmistatud lainetuse tekitatud nihkepinged, mis võivad resuspendeerida põhjaseteid (Joon. 28). Novembris resuspendeeridakse põhjaseteid palju suuremas alas kui juulis. Maksimaalne setete resuspensioon, on Viirelaiu ja Võilaiu lähedal ja nendevahelisel alal. Selles piirkonnas on resuspendeeritud materjali kogus suurem novembris kui juulis. Teetamm vähendab resuspensiooni intensiivsust Viirelaiu ja Muhu vahel ning umbes kilomeetri laisuses rias teetammi ümber. Vähenemine on tugevam novembris, mis vastab tugevamale lainetuse aktiivsusele.

Lainetuse tekitatud põhjalähedane nihkepinge on peamine faktor, mis tekitab setete resuspensiooni. Lokaalsed hoovused põhjustavad resuspendeeritud setete transporti. Tugevamad tuuled novembris võrreldes juuliga põhjustavad ka tugevamaid hoovusi, mis põhjustavad setete transporti üle suurema piirkonna (Joon. 29). Seega resuspendeeritakse sügisel rohkem põhjaseteid ja kantakse neid üle suurema piirkonna kui suvel. Tugevad lõunakaarte tuuled tekitavad kõrgeid laineid, mis põhjustavad setete resuspensiooni Viirelaiu ja Võilaiu kallastel ja nendevahelises alas, samal ajal kui põhjasuunalised hoovused kannavad resuspendeeritud setteid eemale. Novembris on Viirelaiu, Keselaiu ja Muhu vaheline ala peamine akumulatsioonipiirkond. Lõunakaarte tuulte korral on laevatee Kuivastu juures peamine setete „püüdja“. Teetammi korral on setete põhjasuunaline transport piiratud. Sellisel juhul akumuleerub rohkem setteid Viireliu ümber ja Viirelaiu ja Muhu vahelisel alal. Teetammist põhjapool olev piirkond on kõige aktiivsema akumulatsiooni ala. Tuleb mainida, et teetammi olemasolu korral kantakse vähem setteid laevateele. Sarnane setete akumulatsioonide suundumus Viirelaiu ja Muhu vahel on nähtav ka madala lainetuse aktiivsuse perioodil suvel.

Teetammi mõju setete transpordile on iseloomulik üle oluliselt suurema mereala kui mõju otseselt setete resuspensioonile. Peamine tendents teetammi olemasolu korral võib olla setete akumulatsioon teetammi ümbruses ja Viirelaiu ja Muhu vahelisel alal. Kui lainetuse aktiivsus on kõrgem, siis on ka mõjutatud mereala suurem.



Joonis 28. Lainetuse tekitatud üle modelleerimisperioodi keskmistatud põhjalähedane nihkepinge, mis võib põhjustada põhjasetete resuspensiooni olemasoleva olukorra juures (vaskpoolsed pildid) ning teetammi olemasolu korral (parempoolsed pildid). Tumedamad värvid vastavad suuremale nihkepingele). Sinised värvid esindavad ala põhjatopograafiat.



Joonis 29. Modelleeritud põhjasetete jaotus 29. november (ülemised pildid) ja 29. juulil (alumisel pildid) praeguses olukorras (vasakpoolsed pildid) ja teetammi olemasolul (parempoolsed pildid). Tumedamad värvid vastavad suuremale põhjasetete kontsentratsioonile. Sinised värvid esindavad ala põhjatopograafiat.

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.
- Jönsson, A. 2006. A model study of suspended sand due to surface waves during a storm in the Baltic Proper. *Journal of Marine Systems*.
- Keevallik S., A. Männik and J. Hinnov. Quality of HIRLAM wind data in Estonian coastal zone. (submitted to Boreal Environment Research)
- Kuhrts, C., Fennel, W., Seifert, T. (2004). Model studies of transport of sedimentary material in the western Baltic. *Journal of Marine Systems*, Vol. No. 52, p 167-190.
- Kullas, T., M. Otsmann and Ü. Suursaar. 2000. Comparative calculation of flows in the straits of the Gulf of Riga and the Väinameri. *Proceedings of the Estonian Academy of Science. Engineering*, 6, 284–294.
- Mardiste, H. 1976. Currents in the straits of the Väinameri. *Transactions of Tartu State University*, 393, Publications of Geography, 13, 67–76.
- Mardiste, H. 1995. Eestit piirava mere hüdroloogilise uurimise ajalugu (kuni 1917 aastani). Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist, XI, TA Kirjastus, Tallinn, lk 58–78.
- Mey, J. 1922. Baltimere hüdrograafia III. *Laevandus*, 7, 179–182.
- Seifert, T., and B. Kayser (1995), A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea, *Meereswissenschaftliche Berichte / Marine Science Reports*, Institut für Ostseeforschung Warnemünde.
- Soomere, T. and Keevallik, S., 2001. Anisotropy of moderate and strong winds in the Baltic Proper. *Proceedings of the Estonian Academy of Science. Engineering*, 7, 35–49.
- Soomere, T. and Keevallik, S., 2003. Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland. *Proceedings of the Estonian Academy of Science. Engineering*, 9, 73–90.
- Suursaar, Ü., Astok, V., Kullas, T., Nõmm, A. and Otsmann, M. 1995. Currents in the Suur Strait and their role in the nutrient exchange between the Gulf of Riga and the Baltic Proper. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Ecology*, 5 (3/4), 103–123.
- Suursaar, Ü., Astok, V., Kullas, T., Otsmann, M. and Alenius, P. 1996a. Thermohaline regime and currents in the Suur Strait in 1993–1995. *EMI Report Series No 3*, 7–58.
- Suursaar, Ü., Astok, V., Kullas, T. and Otsmann, M. 1996b. New estimation of the water and nutrient exchange between the Gulf of Riga and the Baltic Proper. *EMI Report Series No 3*, 95–108.
- Suursaar, Ü., Astok, V., Kullas, T., Otsmann, M. and Nõmm, A. 1996c. Väinameri – the buffer zone in the water and nutrient exchange between the Gulf of Riga and the Baltic Proper. Punning, J.-M. (Ed) *Geographical Studies (5–28)*, Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Suursaar, Ü., Astok, V., Alenius, P., Kullas, T. and Otsmann, M. 1998a. Thermohaline regime and currents in the Suur Strait and Hari Strait in 1996–1997. *EMI Report Series No 9*, 6–22.

- Suursaar, Ü., Otsmann, M., Astok, V. and Kullas, T. 1998b. Modelling the water exchange in the Irben, Suur, Soela and Hari Straits in 1995–96. EMI Report Series No 9, 61–90.
- Suursaar, Ü., T. Kullas, M. Otsmann. 2000. Possible influence of bridges and dams on the water exchange processes through the straits of the Väinameri. Estonia. Geographical studies, 89 - 101
- Suursaar, Ü., T. Kullas, M. Otsmann. 2002. A model study of the sea level variations in the Gulf of Riga and the Väinameri Sea. Continental Shelf Research, 22, 2001-2019.
- Suursaar, Ü., T. Kullas, M. Otsmann. 2004. Hoovused ja veetaseme kõikumised Lääne-Eesti rannikumeres. Estonia Maritima, 6, 5-26.
- Suursaar, Ü and T. Kullas. 2006. Influence of wind climate changes on the mean sea level and current regime in the coastal waters of west Estonia, Baltic Sea. Oceanologia, 48, 361-383.
- Suursaar, Ü., J. Jaagus, T. Kullas. 2006. Past and future changes in sea level near the Estonian coast in relation to changes in wind climate. Boreal Environment Research. 11, 123-142.
- Otsmann, M., Astok, V., Suursaar, Ü. and Kullas, T. 1996. Water exchange model for the Gulf of Riga. EMI Report Series No 3, 81–94.
- Otsmann, M., Suursaar, Ü., Kullas, T. and Astok, V. 1998. Helmholtz response to the system of two semi-enclosed basins and four Straits. EMI Report Series No 9, 34–60.
- Otsmann, M., Ü. Suursaar, T. Kullas, 2001. The oscillatory nature of the flows in the system of straits and small semienclosed basins of the Baltic Sea. Continental Shelf Research, 21, 1577-1603.
- Petrov, V. S. 1979. Water balance and exchange between the Riga Bay and Baltic Sea. Papers of Riga Hydrometeorological Observatory, 18, 20–40.