

TALLINNA REAALKOOL

ANNA EGOROVA

142.A, REAAL-PROGRAMMEERIMISE ÕPPESUUND (12. KLASS)

LAEVA KIIRUSE JA KAUGUSE MÄÄRAMINE MÕÕTEKOHAST LAEVALAINETE SALVESTUSTE ALUSEL (LÄHTUDES KLASSIKALISEST KELVINI LAINETEOORIAST)

JUHENDAJA TARMO SOOMERE (TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL)

SISSEJUHATUS

Käesolev uurimistöö käsitleb laeva kiiruse ja kauguse hindamist mõõtekohast, kasutades selleks veealuste rõhuandurite abil salvestatud laevalainete signaale ja ajasagedusanalüüsi (spektrogrammid). Spektrogrammid pakuvad efektiivset viisi veepinna kõrguse mõõtmiste visualiseerimiseks ajasageduslikus ruumis ning on ennast tõestanud kasuliku vahendina laevajälgede signaalide uurimisel.

Laevajälgede spektraalanalüüsil põhinevad meetodid on olulised, sest need pakuvad alternatiivset viisi laevaliikluse seireks ja laevade liikumisparameetrite (kiirus, kaugus, suund) kindlaksmääramiseks. Eriti väärtuslik on see rannikuvööndis ja sadamate läheduses, kus laevaliiklus on tihe ning traditsioonilised seiremeetodid, nagu radarid, optilised süsteemid või isegi AIS-süsteemid, võivad olla keerukad või ebausaldusväärsed. Samuti ei saa loota seiremeetoditele kuumade konfliktide ajal, sest tõenäoliselt lülitakse need süsteemid välja. Küll aga ei saa laevad vältida lainete teket, just seda asjaolu kasutabki ära spektrogrammi tehnika.

Uurimisküsimused

1. Kuidas arvutada rõhuanduritega tehtud lainete salvestistest laevade kiirusi ja kaugusi, kasutades spektrogramme?
2. Kui täpselt saab rõhuanduritega tehtud lainete salvestistest arvutada laevade kiirusi ja kaugusi, kasutades spektrogramme?
3. Milline on spektrogrammi meetodi kui suhteliselt uue viisi veealuste rõhuanduritega laeva kiiruse ja kauguse arvutamiseks asjakohasus praktilises rakenduses?

Teoreetilises osas tutvustatakse kõigepealt erinevaid meetodeid laevaliikluse jälgimiseks ning käsitletakse nende meetodite vältimise võimalusi. Järeldatakse, et antud uurimistöös käsitletava spektrogrammi meetodi ilu seisneb selles, et laev tekitab alati laineid ning sellist laevatuvastamise meetodit on raske tahtlikult vältida. Järgnevalt räägitakse nn Kelvini kiilu tekkimisest ning selle erinevatest komponentidest (kald-, rist- ja liitlained (*cusp waves*)). Seejärel tutvustatakse spektrogrammi meetodit ning erinevaid viise laeva kiiruse ja kauguse arvutamiseks. Uurimuslikus osas analüüsitakse saadud tulemusi ning antud meetodi praktilisust.

Uurimismeetodid: töö koostamisel kasutati asjakohaseid kirjalikke materjale (doktoritööd, teadusartiklid). Spektrogrammide loomise ning andmete arvutamise jaoks kasutati Pythoni rakendust.

Peamised allikad: töö tugineb 2022. aastal Tallinna Tehnikaülikooli tehtud lainete mõõtmistele Skulte vallas (Liivi laht) ja töö idee lähtub Margus Rätsepa doktoritööst „*Surface Vessel localization from Wake Measurements*“. Kasutatud allikad on peamiselt teadusajakirjad ning käsikirjalised materjalid.

Töö autor soovib tänada töö valmimisele kaasa aidanud isikuid: Tarmo Soomeret, Mart Kuurmet ja Daniel Kaasikut.

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	1
1. LAEVALIIKLUSE AVASTAMINE JA JÄLGIMINE	4
1.1. Erinevad meetodid	4
1.2. Erinevate meetodite vältimine	4
1.3. Huygensi printsiip ja Kelvini laineteooria	5
1.4. Spektrogrammi meetod	8
1.5. Laeva kiiruse arvutamine	9
1.5.1. Liitlainete sagedusel põhinev meetod.....	9
1.5.2. Ristlainete piirsagedusel põhinev meetod	9
1.5.3. Üldine sageduse ja kiiruse seos	9
1.6. Laeva kauguse arvutamine mõõtekohast	9
1.6.1. Kaldlainete sageduse muutumisel põhinev meetod	10
1.6.2. Ristlainete piirsagedusel põhinev meetod	10
2. SPEKTROGRAMMIDELT ANDMETE ARVUTAMINE JA ANALÜÜSIMINE	11
2.1. Pythoni kood spektrogrammide genereerimiseks	11
2.2. Pythoni kood spektrogrammilt andmete arvutamiseks.....	12
2.3. Kiiruste tulemuste analüüs ja mõõtemääramatuse hindamine	12
2.4. Kauguste tulemuste analüüs ja mõõtemääramatuse hindamine	14
2.5. Spektrogrammide analüüs, huvitavad näited	17
KOKKUVÕTE	20
KASUTATUD ALLIKAD	22
LISA 1. Tallinna Tehnikaülikooli 2022. aastal tehtud lainete mõõtmised Skulte vallas.....	23
LISA 2. Kood spektrogrammide genereerimiseks	24
LISA 3. Kood kiiruste ja kauguste arvutamiseks.....	25
RESÜMEE.....	26
ABSTRACT	27

1. LAEVALIIKLUSE AVASTAMINE JA JÄLGIMINE

1.1. Erinevad meetodid

Laevade liikumise tuvastamiseks ja jälgimiseks on maailmas olemas palju erinevaid meetodeid. Tehnikad jagunevad laias laastus kaugtuvastuse meetoditeks ning laevade tekitatud füüsiliste signaalide analüüsil põhinevateks mõõtmisteks. Üldiselt tuntud pikamaa tuvastus- ja jälgimissüsteemid põhinevad radari-, raadio- ja satelliidipõhistel süsteemidel. Nende hulka kuulub sünteetilise apertuuriga radari (SAR) tehnoloogia, mida kasutatakse laevade ja nende järellainete pildistamiseks. SAR-kujutised laeva järellainetest on sageli heledad V-kujud, mille poolnurgad on tavaliselt 2–5 kraadi (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 2). Optilised ja infrapunased (IR) seiremeetodid põhinevad laevade soojuskiirguse tuvastamisel. Optilised meetodid kasutavad laevade jälgimiseks laia spektriga visuaalseid või hüperspektraalseid kujutisi, samas kui infrapunaseire keskendub laeva soojuslikule signatuurile, näiteks mootori heitgaaside kuumusele (Rätsep, 2025, lk 9).

GPS (globaalne positsioneerimissüsteem) on satelliitnavigatsioonisüsteem, mis mõõdab kaugust, aega ja määrab asukoha koordinaatsüsteemis. Tööpõhimõte on navigatsioonisatelliitidelt tuleva sünkroniseeritud signaali vastuvõtuhetkede mõõtmine kasutaja antenni abil. AIS ja LRIT on aga isereporteerivad raadiosaatjad, mille kaudu laev edastab oma nime, asukohta ja kurssi teistele jälgimissüsteemidele (*ibid.*, lk 9).

Teine oluline lähenemisviis, eriti rannikualadel ja kitsastes veeteedes, on laevade tekitatud lainetuse (järellainete) analüüs. Järellainete salvestamiseks kasutatakse sageli kajaloode (*echosounder*, veepinna kõrguse mõõtmiseks) veepinna kohal, hüdrofone (veealused mikrofonid) või piesoelektrilisi andureid (tabavad kõrge sagedusega akustilisi signaale) veesambas või merepõhja lähedal (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 2). Madalas vees sobib eriti merepõhjas olevate rõhuandurite (*pressure sensors*, veetaseme kõikumise ja laeva tekitatud pinnalainete tuvastamiseks) kasutamine, sest on võimalik summutada lühemaid tuulelaineid (müra) (Rätsep, 2025, lk 45).

1.2. Erinevate meetodite vältimine

Kahjuks pole ükski meetod ideaalne. Erinevates olukordades ja tingimustes on igal neist oma nüansid. On olemas mitmeid võimalusi laevade avastamise võimalust tahtlikult vähendada või vältida. Näiteks Automaatne Identifitseerimissüsteem (AIS) ja Pikamaa Identifitseerimise Jälgimissüsteem (LRIT) on laevade eneseandmete edastamise meetodid. Nende kaudu laeva tuvastamise vältimiseks on mitu viisi: lülitada seadmed välja või edastada väärinfot (tavaline probleem ebaseadusliku mereliikluse puhul). Laevad, mis eelistavad jääda teadmata, võivad liikuda väljaspool reguleeritud liikluskoridore, mis muudab nende jälgimise keerulisemaks.

Samuti võib olla tegemist sõjaväeliste operatsioonidega, kus GPS-signaali on teadlikult häiritud. Vältida saab ka optilisi ja infrapunaseid (IR) seiremeetodeid, näiteks kasutades sobivaid värvi- või kattematerjale laeva varjamiseks või selle kavatsuste maskeerimiseks. Levinud vastumeede infrapuna signatuuri vähendamiseks on mootori heitgaaside väljalaskeavade paigutamine kereesse veepinna lähedale või veepiirile.

Radaritehnoloogia (sh sünteetilise apertuuri radar, SAR) tundlikkus sõltub laeva suurusest, kujust ja ilmastikutingimustest. Kõige levinum viis vältida, et radarid laeva tuvastaksid, on varjamistehnoloogia, kus kasutatakse spetsiaalseid värvikihte, konstruktsiooni ja kerematerjale, mis neelavad ja/või hajutavad heitmeid. Teiseks võimaluseks on laeva veest kõrgemal asuva osa vähendamine. Seda taktikat kasutatakse narkootikumide salakaubaveoks Lõuna-Ameerikast, ehitades selleks madala profiiliga laevu. (Rätsep, 2025, lk 10)

Traditsiooniline laevade tuvastamine helisignatuuride (akustika) põhjal on muutumas keeruliseks, sest kaasaegsed keskkonnasäästlikud lahendused, nagu elektriajamid ja vesinikkütuseelemendid, on tunduvalt vaiksemad kui tavapärased sise põlemismootorid. Lisaks võimaldab tuule- ja päikeseenergia kasutamine laeva liigutamiseks vähendada aega, mil töötavad peamootorid või sõukruvid, mis minimeerib laeva akustilist jälge ja muudab selle kuulamise teel tuvastamise peaaegu võimatuks. (*ibid.*, lk 10).

Antud uurimistöö teemaks valitud spektrogrammi meetodi ilu seisneb selle praktilisuses. Laev võib küll sõita äärmiselt vaikselt, olla hüdrofonidega mittetuvastatav, kasutada varjamistehnoloogiat ja palju muud, kuid tekitab alati laineid. Seda eelist saabki spektrogrammi meetodiga ära kasutada ja rakendada näiteks kuumade konfliktide ajal või ebaseaduslike kaupadega laevade tuvastamiseks. Laevajälgede analüüs, sealhulgas spektrogrammi meetod, on oluline samm tuvastatud merepildi (*Recognized Maritime Picture*, RMP) loomisel, mis ühendab teavet mitmest sensorist ja suudab tuvastada tahtlikult varjatud liikumist.

1.3. Huygensi printsiip ja Kelvini laineteooria

Huygensi printsiibi ja Kelvini laineteooria põimumine selgitab laevajälje teket viisil, kus liikuva laeva teekonna iga punkti vaadeldakse uue ringlainete allikana (Yih *et al.*, 1989, lk 18). Keskkonna iga punkt, milleni häiritus on jõudnud, on ise elementaarlainete allikaks.

Need lugematud elementaarlained interfereeruvad omavahel, kuid püsiv ja füüsikaliselt äratuntav lainemuster moodustub vaid seal, kus lained on liikuva laeva suhtes statsionaarsed. Ehk elementaarlained on üksteisega samas faasis ning toimub konstruktiivne interferents, mis aga juhtub ainult seal, kus laine faasikiirus on võrdne laeva liikumiskiiruse (U) komponendiga laine leviku suunas ($c_p = U \cos \theta$) (Yih *et al.*, 1989, lk 18; Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 7; Torvsik *et al.*, 2015, lk 234).

Veepinnale tekkiva mustri aluseks (joonis 1) on lineaarne dispersiooniseadus, mis sügavas vees määrab, et lainete faasikiirus (c_p) sõltub nende lainepikkusest, kusjuures laineenergia levimiskiirus ehk rühmakiirus (c_g) on täpselt pool faasikiirusest ($c_g = c_p/2$). Pikemad lained liiguvad kiiremini kui lühemad. Dispersiooniseadus tuleneb dünaamilistest tingimustest veepinnal ja seda väljendatakse matemaatiliselt valemiga $\omega^2 = gk$, kus ω^2 on laine ringsagedus, g on gravitatsioonikiirendus ja k laine arv ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, kus λ on lainepikkus) (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 7; Torvsik *et al.*, 2015, lk 234).

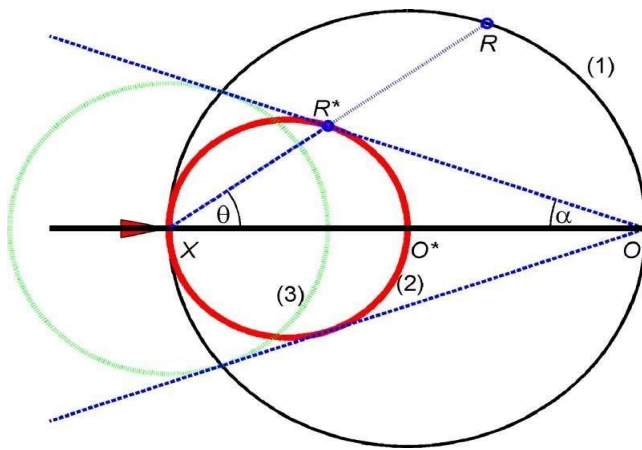


Joonis 1. Laeva taha veepinnale tekkinud muster (Ship Wave Trail, 2015)

Dispersiooniseaduse mõjul koosneb veepinnale tekkinud muster kahest erinevast süsteemist: ristlained (*transverse waves*) ja kaldlained (*divergent waves*) (Rätsep *et al.*, 2021, lk 10; Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 189). Matemaatiliselt on tõestatud, et Kelvini kiilu sees vastavad igale ruumipunktile just need kaks lainesüsteemi, mis rahuldavad statsionaarse faasi tingimust (Torvsik *et al.*, 2015, lk 236).

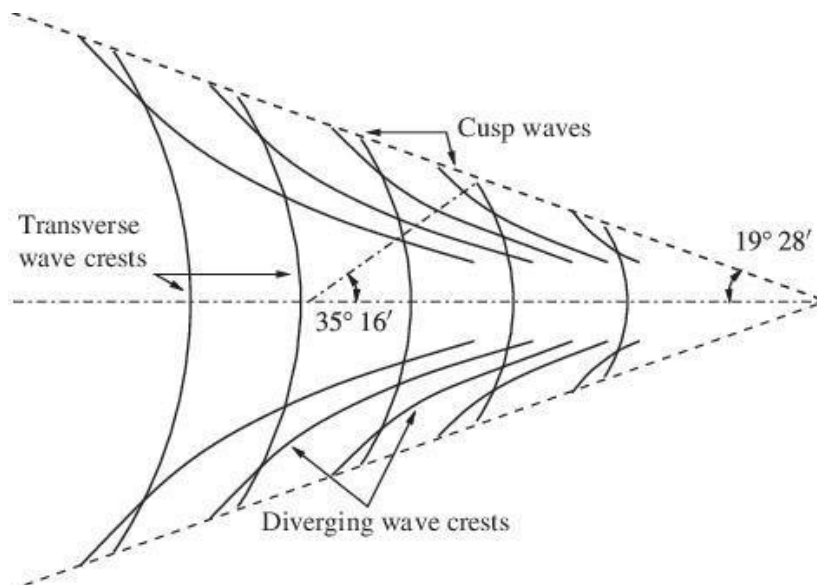
Ristlained (*transversal waves*) levivad peaaegu laeva liikumise suunas ning nurk θ ehk nurk laeva liikumissuuna ja lainete levimissuuna vahel on vahemikus 0 kraadist kuni 35,3 kraadini ja läheneb nullile (joonis 2) (Rätsep, 2025, lk 10). Kuna $\cos\theta$ on sellisel juhul maksimaalne (≈ 1), peab nende lainete faasikiirus olema peaaegu võrdne laeva enda kiirusega. Dispersiooniseaduse järgi saavad nii kiiresti liikuda ainult pikad lained, mistõttu on ristlained laevajälje kõige pikemad komponendid. Ristlaine terminit kasutatakse seetõttu, et nende laineharjad on laeva sõidujoonega risti.

Kaldlained (*divergent waves*) levivad laeva sõidujoonest eemale suurema nurga all, tavaliselt $\theta > 35,3$ kraadi (joonis 2) (Torvsik *et al.*, 2015, lk 234). Suurema nurga puhul on kiiruskomponent $U\cos\theta$ oluliselt väiksem. Et laine liiguks aeglasemalt, peab see dispersiooniseaduse järgi olema lühema lainepikkusega. Kaldlainete harjad on laeva sõidujoone suhtes kaldu ning kaarduvad laeva liikumissuuna suhtes väljapoole. Kuna kaldlained on lühemad lained, on nende kiirus väiksem ja nad jäävad laevast maha, liikudes samal ajal lehvikuna laiali.

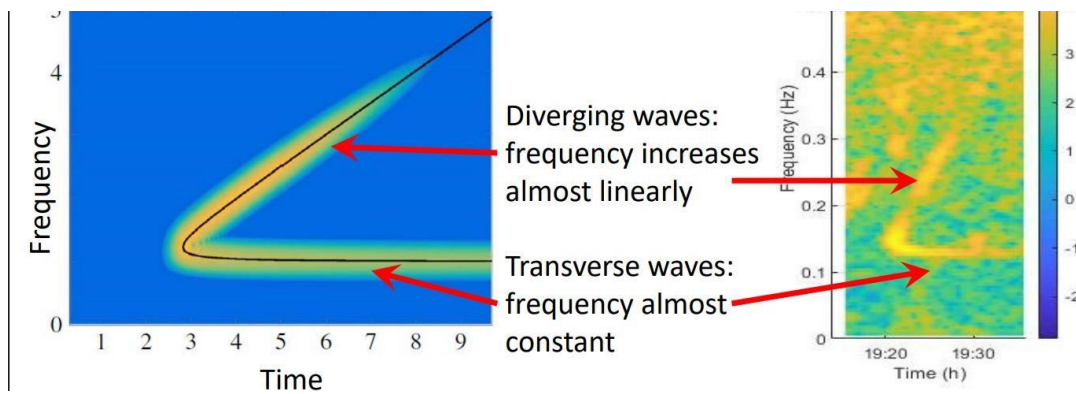


Joonis 2. Erinevate süsteemide skeem Kelvini kiilus (Soomere, 2007)

Ala, kuhu need lained on koondunud, on kolmnurkne Kelvini kiil, mille poolnurk on sügavas vees alati konstantne, $\alpha = 19,47$ kraadi (joonis 3). See spetsiifiline väärtus tuleneb puhtalt geometriast ja dispersiooniseosest: mähisjoon, mis ühendab kõiki laeva teekonnal külvatud elementaarlainete rindeid (ringlainete ühine puutuja (joonis 2)), moodustub nurga all, mille siinus on täpselt $1/3$ ($\sin \alpha = 1/3$) (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 7). Mähisjoon (*cusp waves*) moodustub kiilu servas rist- ja kaldlainete kohtumisel ning üksteise tugevdamisel, moodustades süsteemi kõige märgatavamaid liitlaineid, mis levivad laeva liikumistee suhtes ligikaudu $35,3$ -kraadise nurga all ehk $\theta \approx 35,3$ kraadi (joonis 3) (Rätsep *et al.*, 2021, lk 234; Torvsik *et al.*, 2015, lk 10). Liitlained on süsteemi kõige märgatavam osa, sest nende amplituud sumbub kõige aeglasemalt. Kui vahemaa liitlaine alguspunktist (laevast) mööda mähisjoont suureneb, siis liitlaine kõrgus väheneb proportsionaalselt selle vahemaa kuupjuurega. Kui aga laev sõidab madalas vees ja läheneb kriitilisele kiirusele, siis Kelvini kiil laieneb ja lainemuster muutub tugevalt mittelineaarseks (Rätsep, 2025, lk 11; Soomere, 2007, lk 121).



Joonis 3. Kelvini kiil (liitlained, kaldlainete ja ristlainete harjad) (Rätsep, 2025)



Joonis 4. Kald- ja ristkomponendid spektrogrammil (Soomere, Parnell, 2023)

See geomeetriline ja füüsikaline jaotus on otseselt aluseks spektrogrammi tehnikale. Kaldlained tekitavad spektrogrammil ajas kasvava sagedusega liugrežiimi (*sliding frequency mode*), samas kui ristlained kuvatakse ühtlasel kiirusel liikuva laeva puhul konstantse sagedusega horisontaalse joonena (joonis 4) (Rätsep *et al.*, 2021, lk 12; Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 18). Nende kahe süsteemi kohtumispunkt spektrogrammil tähistabki liitlainete saabumise hetke, moodustades koos iseloomuliku L-kujulise signatuuri, mis võimaldab hinnata laeva kiirust ja kaugust (Rätsep *et al.*, 2021, lk 25; Torvsik *et al.*, 2015, lk 237).

1.4. Spektrogrammi meetod

Spektrogramm on kasulik viis pinnakõrguse mõõtmiste või rõhuandurite andmete visualiseerimiseks, kasutades diskreetset Fourier' teisendust (*Short-Time Fourier Transform*) (Rätsep, 2025, lk 12). See visualiseerib pinna kõrguse või rõhu ajasõltuvat sagedusspektrit. Juhul, kui laev liigub ühtlase kiirusega, on ristkomponendi (*transverse waves*) sagedus konstantne.

Spektrogrammi mustrite sobitamine lineaarse dispersioonikõveraga võimaldab hinnata laeva kiirust ja kaugust andurist. Laeva kiirust (U) saab hinnata ristlainete piirsageduse ($f_{t\infty}$) abil. Kaugust (L) saab hinnata kaldlainete sageduse muutuse kiiruse alusel. Spektrogrammi mustrite uurimine aitab ka tuvastada mittelineaarseid efekte (nt solitonlained (*precursor solitary waves*)) ning arvestada laeva kiirenduse mõju spektrogrammi kujule (Pethiyagoda *et al.*, 2021, lk 25–28).

Spektrogrammidega seotud uuringud (nagu selles uurimistöös) eeldavad püsivat kiirust, sest laeva kiirendamine või aeglustamine muudab teadaolevalt spektrogrammi struktuuri (nt ristlaine komponent ei ole enam horisontaalne, vaid sagedus muutub ajas). See teeb parameetrite (kiiruse ja kauguse) hindamise lineaarsete mudelite abil keeruliseks.

1.5. Laeva kiiruse arvutamine

Laeva kiiruse (U) arvutamine laevajälje andmete põhjal tugineb lineaarsele Kelvini laevalainete teooriale, mis seostab lainete sageduse, nende levikunurga ja laeva liikumiskiiruse (Torvsik *et al.*, 2015, lk 234).

1.5.1. Liitlainete sagedusel põhinev meetod

Liitlained (*cusp waves*) tekivad Kelvini kiilu servas, kus rist- ja kaldlained kohtuvad ning üksteist tugevdavad (*ibid.*, lk 234). Valemiks on $U = \sqrt{\frac{3}{2}} \times \frac{g}{2\pi f_P}$ (*ibid.*: lk 237). Liitlained levivad laeva sõidujoone suhtes kindla nurga $\theta = \phi_P$ all, kusjuures sügavas vees on $\cos \phi_P = \sqrt{2/3}$ (Torvsik *et al.*, 2015, lk 234). Kuna see nurk on konstantne, määrabki just laeva kiirus, millise sagedusega (f_P) need lained andurini jõuavad (*ibid.*, lk 237). Meetodi kasutamiseks tuleb spektrogrammil tuvastada punkt, kus kaldu asuv kaldlainete signaal ja horisontaalne ristlainete signaal kohtuvad (L-kujulise signatuuri „nurk“) ning lugeda sealt vastav sagedus f_P (*ibid.*, lk 237).

1.5.2. Ristlainete piirsagedusel põhinev meetod

Ristlained (*transverse waves*) on lained, mille harjad on risti laeva sõidutrajektooriga ning mis liiguvad laevaga samas suunas. Meetodi valem on $U = \frac{g}{2\pi f_{t\infty}}$ (*ibid.*, lk 237). Laeva sõidutrajektooriga on laine levikunurk $\theta = 0^\circ$, mis tõttu valemis $\cos 0^\circ = 1$ ning sagedus sõltub otseselt vaid kiirusest ja raskuskiirendusest g (*ibid.*, lk 234). Piirsagedus $f_{t\infty}$ tähistab sagedust, millele ristlained lähenevad pika aja jooksul pärast laeva möödumist (Rätsep, 2025, lk 25). Spektrogrammil kuvatakse ristlained horisontaalse joonena, kiiruse arvutamiseks tuleb leida selle horisontaalse osa keskmine sagedus (Rätsep, 2025, lk 27).

1.5.3. Üldine sageduse ja kiiruse seos

Kõik statsionaarsed laevalained peavad täitma tingimust, et nende faasikiirus on võrdne laeva kiiruse projektsiooniga laine levikusuunale (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 6). Valem on $f = \frac{g}{2\pi U \cos \theta}$ (Torvsik *et al.*, 2015, lk 234). Antud tingimus tuleneb vee dispersiooniseosest sügavas vees ($\omega^2 = gk$), kus laine sageduse ja pikkuse suhe on määratud raskuskiirendusega (*ibid.*, lk 234). See on teoreetiline alus, millest on tuletatud kõik ülaltoodud praktilised arvutusmeetodid (Rätsep, 2025, lk 12; Wu, 1991).

1.6. Laeva kauguse arvutamine mõõtekohast

Laeva kauguse arvutamine statsionaarsest mõõtekohast tugineb peamiselt hüdrodünaamilise lainejälje (Kelvini kiilu) geomeetrial ja selle spektraalsel esitusel ehk spektrogrammil. Teaduslikes allikates kirjeldatud meetodid võimaldavad määrata laeva lühimat kaugust

sõidujoone ja anduri vahel (Y) või distantssi anduri ja laeva asukoha vahel laine tekkimise hetkel (L). Üldiselt arvutatakse laeva kaugust andurist laine tekkimise hetkel valemiga $L = \sqrt[2]{6} U \Delta t$ (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 238). Meetodite erinevused tulenevad laeva kiiruse U arvutamisest ning Δt määramisest. Lühimat ristsuunalist kaugust sõidujoone ja anduri vahel arvutatakse alati valemiga $Y = \sqrt[2]{\frac{1}{3}} L$, mis tuleneb Kelvini kiilu serva nurgast ($\phi_P \approx 35,3^\circ$) sügavas vees (Torvsik *et al.*, 2015, lk 237).

1.6.1. Kaldlainete sageduse muutumisel põhinev meetod

Meetod, mis kasutab spektrogrammil nähtavat iseloomulikku *chirp*-signaali ehk kaldlainete ajas kasvavat sagedust, on laeva kauguse leidmiseks mõõtekohast kõige levinum. Kauguse arvutamine tugineb asjaolule, et kõrgsageduslikud lained liiguvad aeglasemalt kui madalsageduslikud lained (dispersioon), mistõttu venib lainejälg pikal teekonnal ajas laiali (*ibid.*, lk 237). Kauguse määramiseks on vaja teada laeva kiirust (U). Seejärel tuvastatakse spektrogrammil kaks ajahetke. Esialgu tuvastatakse aeg t_1 , kui liitlained sagedusega f_P jõuavad andurini (L-kujulise signatuuri nurgas, liitlained tekivad rist- ja kaldlainete interferumisel). Järgmisena tuvastatakse aega t_2 , kui andurini saabub kaldlaine komponent sagedusega f_Q , kus $f_Q = \sqrt[2]{2} f_P$ (*ibid.*, lk 238). Distantssi L laeva asukohast (laine tekkimise hetkel) kuni andurini arvutatakse valemiga $L = \sqrt[2]{6} U (t_2 - t_1)$.

1.6.2. Ristlainete piirsagedusel põhinev meetod

Antud meetodit peetakse kõige stabiilsemaks, kuna see tugineb spektrogrammi horisontaalsele osale, mis on vähem tundlik mürale. Meetod kasutab laeva liikumissuunas levivate ristlainete asümptootilist piirsagedust ($f_{t\infty}$), mis püsib pika aja jooksul peaaegu konstantsena. Esmalt arvutatakse laeva kiirus U valemiga $U = \frac{g}{2\pi f_{t\infty}}$. Seejärel tuletatakse

teoreetiline liitlainete sagedus $f_P = \sqrt[2]{\frac{3}{2}} f_{t\infty}$, mida kasutatakse algpunktina ajavahemiku Δt mõõtmiseks kaldlainete harul (Rätsep, 2025, lk 27). Ajavahe Δt on aeg hetkest t_1 (mil saabus f_P) kuni hetkeni t_2 , mil sagedus on kasvanud väärtuseni $\sqrt[2]{2} f_P$ (*ibid.*, lk 237). Valem on nagu eelmiseski meetodis $L = \sqrt[2]{6} U (t_2 - t_1)$. Laeva kauguse arvutamiseks on ristlainete piirsagedusel põhinev meetod kaldlainete sageduse muutumisel põhinevast meetodist täpsem, sest võimaldab luua stabiilset alguspunkti Δt arvutamiseks. Ristlainete piirsagedusel põhinev meetod on sageli eelistatud, sest otsene liitlainete sageduse tuvastamine on keeruline. Piirsagedus $f_{t\infty}$ on spektrogrammil aga pikaajaliselt püsiv ja selgelt piiritletud, andes täpsema sisendi distantssi arvutamiseks.

2. SPEKTROGRAMMIDELT ANDMETE ARVUTAMINE JA ANALÜÜSIMINE

2.1. Pythoni kood spektrogrammide genereerimiseks

Töö tugineb Tallinna Tehnikaülikooli 2022. aastal omavahel sünkroniseeritud ja kalibreeritud rõhuanduritega tehtud lainete mõõtmistele (lisa 1). Mõõtmised toimusid 4 m sügavusel Skulte vallas (Liivi laht) vahemikus 02.08.2022–06.09.2022 ning kasutusel oli üheksa rõhuandurit. Spektrogrammide loomise aluseks kasutati CSV-faile, mida on iga päeva kohta 24 tükki ehk iga fail vastab ühele tunnile. Igas failis on ühe päeva kindla tunni kohta välja toodud ühe sekundi haaval rõhuanduri sügavus vee all, anduri orientatsioon, andurile avaldatud absoluutne rõhk (*pressure raw*), ülerõhk (*pressure norm*) ning keskkonna temperatuur. Kasutades Pythonit genereeriti spektrogramme (lisa 2), mida kokku tuli 7776 ehk ühe anduri kohta 864.

Programm genereerib spektrogrammid automaatselt kõigi valitud sensorite andmetest. Kõigepealt loeb ta konfiguratsioonifailist andmete asukoha, väljundkausta ning töödeldavate sensorite nimekirja. Seejärel käib ta iga sensori kaustas läbi kõik andmefailid (CSV), loeb need sisse ning määrab igale failile proovivõtusageduse ajatempli veeru (*time*) järjestikuste väärtuste keskmise ajavahe põhjal.

Spektrogrammi koostamiseks kasutatakse rõhusignaali veergu *pressure(Pa)raw*. Andmed puhastatakse (eemaldatakse puuduvad väärtused) ning signaal standardiseeritakse, et vähendada erinevate failide ja mõõteseeriade tasemelisi erinevusi. Seejärel filtreeritakse signaali, rakendades järjestikku madalpääsfiltrit (0,4 Hz) ja kõrgepääsfiltrit (0,05 Hz), mille tulemusel jääb sagedusvahemik, mis on uuritava nähtuse seisukohast kõige olulisem.

Järgmisena arvutatakse lühiajalise Fourier' teisenduse (STFT) abil signaali ajas muutuv sagedusspekter. STFT tagastab sagedused (*f*), ajapunktid (*t*) ja komplekspektri (*Zxx*), millest arvutatakse amplituud ja teisendatakse see logaritmilisele dB skaalale. Lõpptulemus visualiseeritakse soojuskaardina, kus horisontaaltelg näitab aega, vertikaaltelg sagedust ning värvitoon signaali tugevust. Spektrogrammid salvestatakse pildifailidena ning failinimi moodustatakse mõõteseeria algusaja järgi, mis tagab tulemuste üheselt mõistetava ja kronoloogilise korrastatavuse (failide nimed on kujul YYYYMMDDssss).

Genereeritud spektrogrammidest sorteeriti välja need, kus on horisontaalne ristkomponendi lainejälg (laeva kiirus on konstantne) ning selge L-kujuline lainejälg, mida on selgelt näha sama ajavahemiku spektrogrammil igal üheksal anduril. Üldiselt vähesel määral, aga esines ka näiteid, kui ühe anduri kindla ajavahemiku spektrogrammil on näha laeva möödumist, aga teise anduri sama ajavahemiku spektrogrammil on L-kujuline lainejälg selle pealt arvutamiseks liiga nõrk või hajunud. Järgnevates peatükkides välja toodud andmete tabelites on esitatud just

nende spektrogrammide pealt arvutatud andmed, mille ristlaine lainejäljed olid horisontaalsed, kaldlained jõudsid sageduseni $f_Q = \sqrt[2]{2}f_P$ ja L-kujulised signatuurid olid väga selged igal üheksal anduril, eesmärgil võrrelda erinevatelt anduritelt saadud tulemusi. Selliseid spektrogramme leidis 10. Tegelikult esines lisaks veel kaks paari spektrogramme, mis rahuldavad ülaltoodud tingimusi, aga mõlema spektrogrammi paari laine kestis kahe spektrogrammi vältel ning selle kaldkomponendi sagedus kasvas ülimalt aeglaselt, mis omakorda põhjustas suure Δt ja seetõttu ka laeva kauguse andurist. Antud näidete puhul olid laevade kaugusteks andurist vahemikus 35–40 km, mis on aga klassikaliste Kelvini lainete jaoks liiga suur, kuna tavaliste lainete amplituud sumbub distantiga $r^{-1/2}$ ja need kaovad müra. Sellised spektrogrammid on ebatavalised ning neid tulemuste võrdlemisel kasutusele ei võetud.

2.2. Pythoni kood spektrogrammilt andmete arvutamiseks

Kirjutatud Pythoni kood (lisa 3) võimaldab arvutada spektrogrammidelt laevalainetega seotud parameetreid poolautomaatselt, kasutades ristlainete piirsagedusel põhinevat meetodit. Programm loeb etteantud kaustast järjest kõik varem välja sorteeritud spektrogrammi pildid ning kuvab iga pildi Matplotlibis. Iga spektrogrammi kohta märgib kasutaja hiirega kolm iseloomulikku punkti: 1) ristlainete horisontaalne riba, millest saadakse piirsagedus ($f_{t\infty}$), 2) laevalaine haru ristumine f_P sagedusjoonega (ajahetk t_1) ja 3) ristumine sagedusjoonega f_Q (ajahetk t_2).

Klikitud pildikoordinaadid teisendatakse füüsikalisteks suurusteks, kasutades eelnevalt fikseeritud telgede vahemikke, sagedus 0–1 Hz ja aeg 0–3600 s. Sagedus leitakse pildi y-koordinaadi põhjal (sagedustelg on vertikaalne), ning aeg leitakse x-koordinaadi põhjal lineaarselt. Seejärel arvutatakse teoreetiliste seoste abil $f_P = \sqrt[2]{\frac{3}{2}}f_{t\infty}$ ja $f_Q = \sqrt[2]{2}f_P$, need sagedusjooned kuvatakse kontrolliks samaaegselt spektrogrammil. Ajahetkedest t_1 ja t_2 leitakse ajavahe $\Delta t = t_2 - t_1$. Lõpuks arvutatakse laeva kiirus piirsageduse kaudu valemiga $U = \frac{g}{2\pi f_{t\infty}}$ ning kaugus valemiga $L = \sqrt[2]{6}U\Delta t$. Kõigi spektrogrammide tulemused salvestatakse koondtabelina CSV-vormingus, mis võimaldab teha edasist võrdlevat ja statistilist analüüsi.

2.3. Kiiruste tulemuste analüüs ja mõõtemääramatuse hindamine

Antud tabelis (tabel 1) on ajavahemikud esitatud kujul MMDDHHmm. Üldiselt vaadates tabelis esitatuid tulemusi on loogiline, et kiirused jäid umbes 5 m/s kanti, see on päris tavaline kaubalaevade ja kalalaevade kiirus sadama lähistel. Oluline on märkida, et kiiruste leidmise protsess on mitmeetapiline ning erinevates etappides tekkivat viga või mõõtemääramatust on

raske adekvaatselt iseloomustada. Mõõtesüsteemi juhusliku mõõtemääramatuse hindamiseks arvutati iga ajahetke puhul kõigepealt kiiruse aritmeetilise keskmise ning seejärel anduritevahelise standardhälbe, kasutades valemit $s = \sqrt{\frac{\sum (v_i - \bar{v})^2}{n-1}}$, kus $n = 9$ on andurite arv.

Selle põhjal leiti keskmise väärtuse standardse mõõtemääramatuse $u(\bar{v}) = \frac{s}{\sqrt{n}}$.

Tabel 1. Laevade kiirused (m/s) ning tulemuste keskmised (m/s ja sõlmed)

Aeg	H01	H02	H03	H04	H05	H06	H07	H08	H09	Kesk (m/s / sõlmed)
08100800	5,50 2	5,45 1	5,55 4	5,55 4	5,60 6	5,66 0	5,60 6	5,55 4	5,55 4	5,560 / 10,81
08100900	5,60 6	5,55 4	5,66 0	5,55 4	5,55 4	5,55 4	5,50 2	5,45 1	5,50 2	5,549 / 10,79
08101400	5,45 1	5,45 1	5,40 2	5,60 6	5,50 2	5,50 2	5,66 0	5,66 0	5,66 0	5,544 / 10,78
08141600	5,03 4	4,86 8	4,71 3	5,07 7	4,82 8	4,82 8	5,12 1	4,86 8	4,82 8	4,907 / 9,54
08171600	4,00 9	4,12 1	3,95 6	4,06 4	4,00 9	3,95 6	3,95 6	3,98 2	3,98 2	4,004 / 7,78
08231700	3,98 2	3,98 2	4,00 9	4,03 7	3,95 6	3,87 8	4,09 3	4,00 9	3,90 3	3,983 / 7,74
08281700	4,12 1	4,17 9	4,12 1	4,17 9	4,17 9	4,15 0	4,06 4	4,23 9	4,15 0	4,154 / 8,07
08291600	4,17 9	4,06 4	4,09 3	4,06 4	4,03 7	4,12 1	4,12 1	4,09 3	4,15 0	4,102 / 7,97

Näiteks ajahetkel 08100800 olid üheksa anduri näidud vahemikus 5,451–5,660 m/s. Nende aritmeetiline keskmine oli 5,560 m/s, standardhälve 0,061 m/s ning sellest tulenev keskmise standardne mõõtemääramatus 0,020 m/s ($\approx 0,039$ sõlme). See näide illustreerib mõõtemääramatuse hindamise metoodikat.

Sama arvutus tehti kõigi kaheksa analüüsitud mõõtejuhtumi kohta. Anduritevaheline standardhälve varieerus vahemikus 0,045–0,137 m/s, millele vastavad keskmise standardsed mõõtemääramatused jäid vahemikku 0,015–0,046 m/s. Kuna mõõtemääramatus hinnati iga sõltumatu mõõteseria jaoks eraldi, kasutati kogu andmestikku iseloomustava hinnanguna nende standardsete mõõtemääramatuste aritmeetilist keskmist, milleks oli 0,024 m/s. Valides katteteguriks $k = 2$ (ligikaudu 95% usaldusnivoo), saadi kogu andmestikku iseloomustavaks laiendatud mõõtemääramatuseks $U \approx \pm 0,048$ m/s, mida võib ümardatult esitada kujul $\pm 0,05$ m/s ($\approx \pm 0,09$ sõlme).

Anduritevahelise hajuvuse erinevus mõõtejuhtumite lõikes viitab sellele, et mõõtetulemuste täpsus sõltub konkreetse spektrogrammi kvaliteedist ja lainejälje selgusest. Suurema

hajuvusega juhtudel oli ka mõõtemääramatus suurem, samas kui selgema lainejäljega spektrogrammid andsid omavahel paremini kooskõlas olevaid tulemusi. Seetõttu kirjeldab esitatud laiendatud mõõtemääramatus kogu analüüsitud andmestiku keskmist mõõtetäpsust, mitte üksiku mõõtmise tulemust.

Käesoleva andmestiku põhjal võib järeldada, et spektrogrammimeetod võimaldas määrata laevade kiirusi suhteliselt väikese anduritevahelise mõõtemääramatusega.

2.4. Kauguste tulemuste analüüs ja mõõtemääramatuse hindamine

Laevade kauguste väärtused (tabel 2) on Skulte rannikulähedases piirkonnas suurusjärguna usutavad. Oluline on aga rõhutada, et tabelis esitatud kaugus ei pea tähendama kaugust laevateeni, vaid on mõistlik interpreteerida seda kui efektiivset kaugust mõõtekohast selleni, kus tekkis esimene tuvastatav lainepakett, mis moodustab osa kogu laevalainete salvestusest. Selline efektiivne kaugus sõltub laeva trajektoorist (sadamasse sisse/välja, piki randa), lähenemissuunast (põhi/lääs/lõuna) ja sellest, milline möödumise löik tekitab lainepaketi, mis jõuab mõõtepunkti esimesena. Seetõttu võivad isegi sama tüüpi sadamasse suunduvad laevad anda väga erineva efektiivse kauguse: põhja või loode poolt tulles on võimalik mööduda mõõtekohale lähemalt, edela poolt tulles jääb möödumine rannikust ja mõõtekohast sageli kaugemale (joonis 5). Väärtused 0,5–1 km on sellise geomeetria korral loomulikud, ning ka < 200 m väärtused ei ole tingimata võimatud (nt väiksemad kalalaevad), kuid neid tuleb käsitleda suurema ettevaatusega.

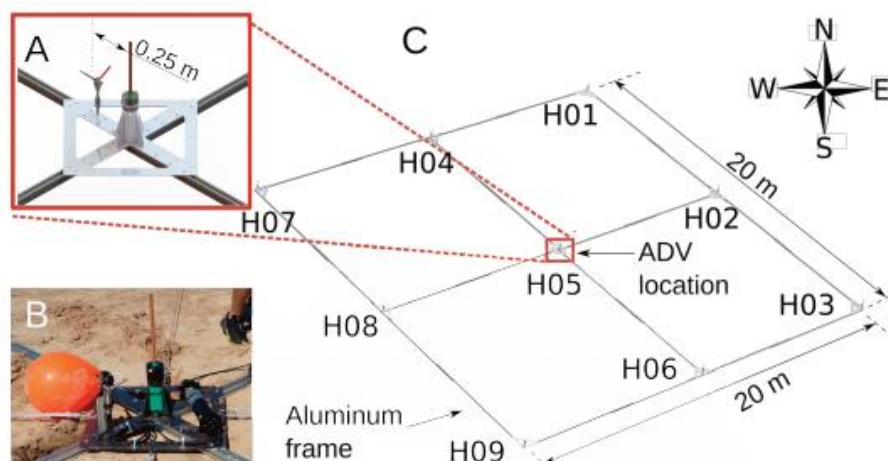
Tabel 2. Laevade kaugused kolme esimese tüvekoha täpsusega (m)

	H01	H02	H03	H04	H05	H06	H07	H08	H09
08100800	1500	1170	1120	1410	1230	1140	1140	1250	1080
08100900	1140	1140	865	1030	1170	857	1150	844	853
08101400	1310	1060	1140	1530	1270	1390	1150	1010	1420
08141600	1360	1520	1460	1380	1390	1460	1340	1080	1470
08171600	462	421	233	570	354	412	453	322	316
08231700	195	351	229	118	154	224	254	253	253
08281700	831	814	682	569	615	673	675	963	615
08291600	901	870	808	778	969	1000	923	773	762



Joonis 5. Andurite paiknemine kaardil, Skulte sadama kõrval (Soomere, Eelsalu, Parnell, Piho, 2026)

Andurite paigutus (joonis 6) ($20\text{ m} \times 20\text{ m}$, maksimaalne vahe $\sim 29\text{ m}$) tähendab, et puhtalt hüdroastide erinev asukoht ei saa tekitada sadade meetrite suurust erinevust. Kuna laevalainete saabumissuund pole määratud ning kaugus leitakse spektrogrammidelt ajamuutuste ja kiiruste hinnangutest, siis H01–H09 erinevused peegeldavad eeskätt meetoodika ja signaalitõlgenduse hajuvust. Kauguse leidmise protseduur sisaldab mitme suuruse hinnangut joonistelt (ning igaühe puhul on teatav mõõtemääramatus), seetõttu on loogiline, et eri hüdroastide abil tehtud kauguse hinnangud erinevad omavahel rohkem kui kiiruste hinnangud (tabel 3).



Joonis 6. Andurite paiknemine üksteise suhtes (Soomere, Eelsalu, Parnell, Piho, 2026)

Tabel 3. Kauguste hajuvused erinevate ajahetkede kaupa (standardhälve SD ja suhteline hajuvus CV = SD/keskmine)

Aeg	Keskmine (m)	Min-Max (m)	SD (m)	CV (%)
08100800	1227	1080-1500	133,7	10,9
08100900	1005	844-1170	139,7	13,9
08101400	1253	1010-1530	165,4	13,2
08141600	1384	1080-1520	121,8	8,8
08171600	394	233-570	93,8	23,8
08231700	226	118-351	63,1	27,9
08281700	715	569-963	120,1	16,8
08291600	865	762-1000	83,9	9,7

Tabelist joonistub välja, et suuremate kauguste ($\approx 0,8\text{--}1,5$ km) korral on suhteline hajuvus enamasti $\sim 9\text{--}15\%$, kuid lühikeste kauguste ($\approx 0,2\text{--}0,4$ km) korral kasvab see $\sim 25\text{--}30\%$ -ni. See toetab järeldust, et lähitsooni ($< 200\text{--}300$ m) kaugused on tundlikumad nii signaali segunemisele (mitu lainet/mitu allikat) kui ka lainepaketi „esimese“ algushetke määramisele ning vajavad suuremat ettevaatlikust.



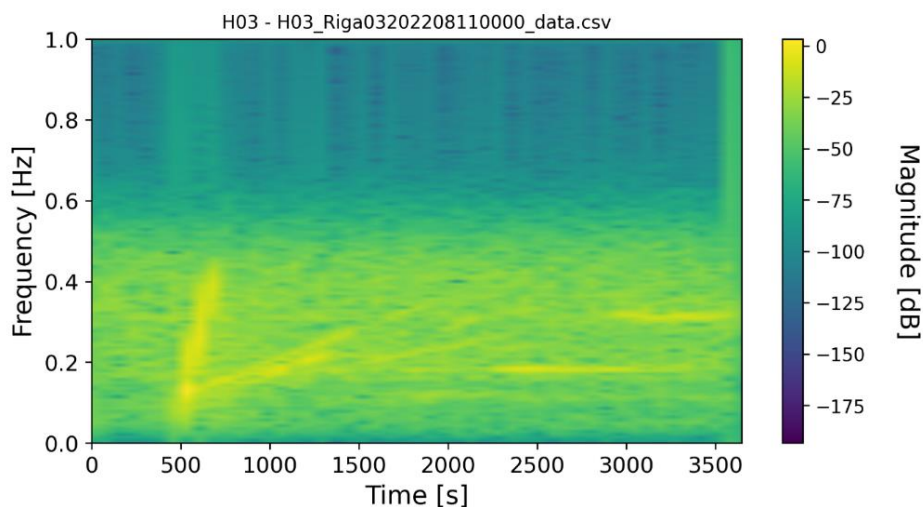
Joonis 7. Laevade asukohad mõõtepunkti ümber, lähtudes keskmistest laevade kaugustest ajavahemike kaupa

Kaardile (joonis 7) kantud kaugusvööndid näitavad, et mõõtepunkt paikneb vahetult ranniku ja Skulte sadama läheduses ning osa võimalikest laeva asukohtadest langeb piirkondadesse, kus nende tegelik paiknemine on ruumiliselt piiratud. Siiski paikneb suurem osa ringjoontest loogiliselt (nt sügavuse mõttes). Saab järeldada, et spektrogrammi meetodi abil saab tuvastada ka laevade kaugusi, kuid saadud tulemuste usaldusväärsus on kindlasti palju väiksem kui laevade kiirustel. Väga oluline on mainida, et madalamas vees on dispersiooniseos teistsugune ning laeva kaugust sellises olukorras ei saagi lihtsate valemitega arvutada. Seetõttu tuleb osa mõõtmistulemuste hajuvusest sellest, et eri kohtades tekkinud

lained jõudsid mõõtepunkti üle erineva sügavusega merealade ning kasutatud tehnoloogia raames ei saanudki seda arvestada.

2.5. Spektrogrammide analüüs, huvitavad näited

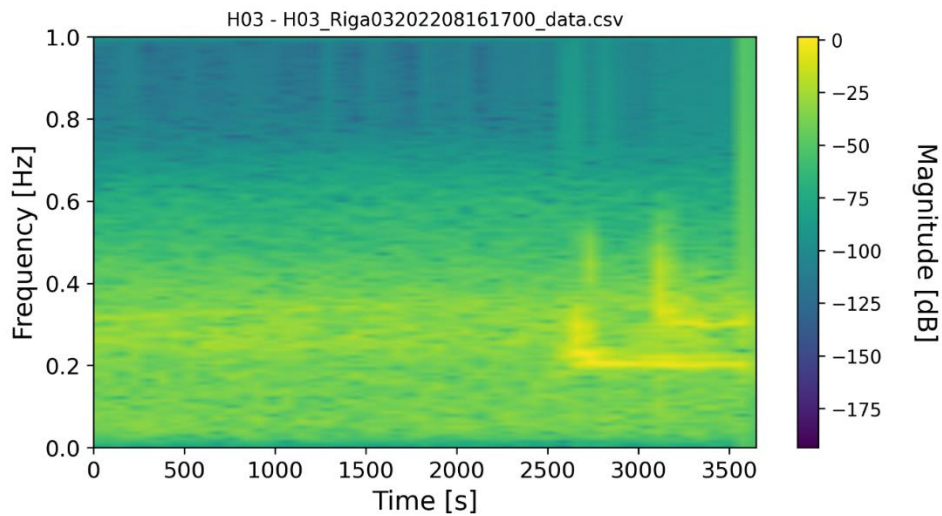
Tavaliselt on ühtlase kiirusega liikuva laeva puhul ristlained (*transverse waves*) spektrogrammil nähtavad horisontaalse ja peaaegu konstantse sagedusega lainejäljena (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 189). See vastab klassikalisele lineaarsele lainejäljeteooriale, kus püsikiirusel tekkiv ristlainete komponent on vaateleja jaoks peaaegu monokromaatne signaal. Teatud juhtudel võib aga spektrogrammil märgata, et see haru ei ole horisontaalne, vaid selle sagedus kasvab ajas (joonis 8). Peamine füüsikaline selgitus sellisele hälbele on laeva kiirendamine vahetult enne andurist möödumist. Kuna aeglasemalt liikuv laev tekitab kõrgema sagedusega ristlaineid ning need lained on tekitatud laeva poolt ajaliselt varem kui hilisemad kaldlained, põhjustab laeva kiiruse kasvamine spektrogrammi alumise haru n-ö tõusmist ehk sageduse suurenemist ajas (*ibid.*, lk 203). Praktikas on seda nähtust dokumenteeritud näiteks Tallinna lahes sadamast väljuvate reisilaevade (nt *Star* ja *Superstar*) puhul, mis andurite piirkonda jõudes alles suurendasid oma sõidukiirust, tekitades spektrogrammil iseloomuliku tõusva ristlaine haru (Rätsep, 2025, lk 13).



Joonis 8. Kiirendava laeva spektrogramm

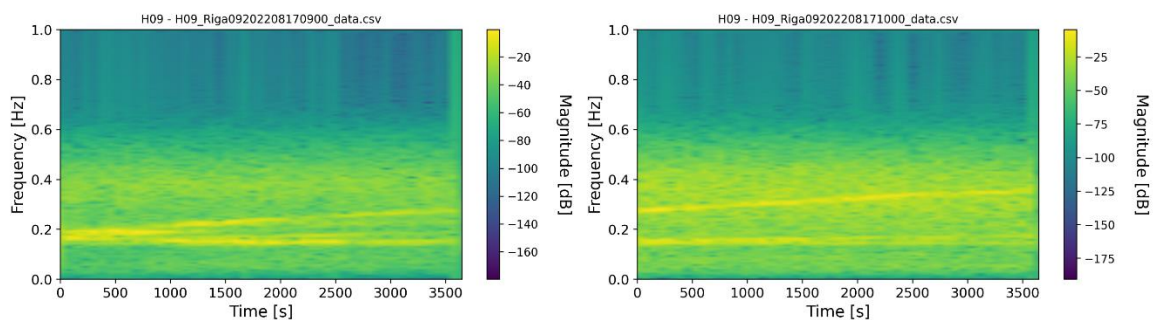
Tiheda laevaliiklusega piirkondades on tavaline, et ühele spektrogrammile satuvad korraga mitme laeva signatuurid (joonis 9). Kui spektrogrammil on näha kaks L-kujulist signatuuri, kus üks asub sagedustel kõrgemal, viitab see selgelt erinevatele sõiduparameetritele. Kuna laeva kiirus on pöördvõrdeline tekitatud lainete piirsagedusega, siis kõrgemal sagedusel asuv horisontaalne haru tähistab aeglasemalt liikuvat laeva. Samuti asub antud näite aeglasem laev andurile lähemal, sest kaldlainekomponendi lainejälje sagedus kasvab peaaegu vertikaalselt (väga kiiresti) ehk sellelt arvutatud Δt (aeg, mille jooksul kasvab liitlainete sagedus $\sqrt[2]{2}$ korda) on väike. Kauguse valemist teame, et kaugus on võrdelises seoses Δt ehk see laev asub

andurile üsna lähedal. Sellised liitsignatuurid, mis ei ole omavahelises harmoonilises seoses, on allikate kohaselt tüüpilised juhtudel, kus anduri lähedal viibib samal ajal teine, sageli aeglasem laev (Pethiyagoda *et al.*, 2017, lk 207).



Joonis 9. Spektrogrammil on korraga näha kahte erinevat laeva

Suur osa tulemustest on kergesti interpreteeritavad, aga mõned aspektid on siiski üllatavad. Kõige märkimisväärsim leid antud uuringus on kahe ekstreemse lainejälje tuvastamine, mis mõlemad kestsid üle kahe tunni ja kandusid ühelt spektrogrammilt teisele (joonis 10). Nende lainete kaldkomponendi sagedus kasvas ülimalt aeglaselt, mis põhjustas valemis $L = \sqrt[2]{6} U (t_2 - t_1)$ hiiglasliku ajavahe Δt ning andis laeva arvutuslikuks kauguseks andurist 35–40 km. See tulemus on erakordne, kuna senistes praktilistes katsetes on rõhuandurite meetodi tuvastamise piiriks peetud maksimaalselt 12 km (Soomere, 2007, lk 132).



Joonis 10. Kahel spektrogrammil on sama L-kujuline signatuur

Füüsikaliselt ei saa sellist pikaajalist püsivust seletada klassikaliste Kelvini lainetega, kuna nende amplituud sumbub distantiga tempos $r^{-1/2}$ ja need kaoksik sellisel kaugusel mürrasse. Antud nähtus viitab mittelineaarsetele kauglevi struktuuridele, nagu ümbrik-solitonid (*envelope solitons*) või soliton-eellained (*precursor solitons*). Need on peaaegu mitte-disperseeruvad lained, mis võivad säilitada oma kuju ja sageduse tunde ning levida üle avamere kümnete kilomeetrite kaugusele. Selliste laineosade fikseerimine 40 km kauguselt rõhuanduritega on

märgiline saavutus, tõestades, et laeva „sageduslik allkiri“ on püsivam, kui seni praktikas dokumenteeritud.

KOKKUVÕTE

Käesoleva uurimistöö eesmärk oli uurida ja praktiliselt rakendada veealuste rõhuandurite võre ning ajasagedusanalüüsi (spektrogrammide) meetodit laevade liikumisparameetrite, eeskätt kiiruse ja kauguse, määramiseks ning hinnata meetodi täpsust reaalses meres. Töö lähtepunktiks oli arusaam, et laeva tekitatud laineid ei ole võimalik vältida ka siis, kui muud seiresüsteemid on häiritud või tahtlikult välja lülitatud, mistõttu laevalainete spektraalanalüüs võib olla oluline alternatiivne seireviis.

Uurimisküsimusteks püstitati: (1) kuidas arvutada rõhuanduritega tehtud lainete salvestistest laevade kiirusi ja kaugusi, kasutades spektrogramme; (2) kui täpselt saab sellistest salvestistest kiirusi ja kaugusi hinnata; (3) kui asjakohane on spektrogrammimeetod praktilises rakenduses. Hüpoteesiks oli, et meetod võimaldab laevade kiiruse määramist usaldusväärselt spektrogrammil eristuva ristlainete tunnuse põhjal ning annab kauguse kohta kasutatava, kuid suurema veaga hinnangu, sest kauguse leidmine sõltub tugevamalt signaali tõlgendamisest ja levikutingimustest.

Metoodiliselt tugines töö klassikalisele Kelvini laineteooriale ja sellele, kuidas laeva tekitatud rist- ja kaldlained avalduvad spektrogrammil. Ühtlase kiirusega liikumisel moodustab ristlainete komponent spektrogrammil horisontaalse, peaaegu konstantse sagedusega joone, mille põhjal saab hinnata laeva kiirust. Kauguse hindamine põhineb omakorda kaldlainete ajas muutuvatel omadustel ning kahel ajahetkel (t_1 ja t_2) spektrogrammil, mille vahe Δt seotakse teoreetilise valemiga laeva asukoha kauguse leidmiseks laine tekkimise hetkel.

Praktilises osas kasutati Skulte rannikulähedases piirkonnas paiknevat üheksast sünkroniseeritud ja kalibreeritud andurist koosnevat võret. Andmetöötluse jaoks koostati Pythonis poolautomaatne lahendus, mis võimaldas spektrogrammidelt vajalikud karakteristikud punktid hiireklikkidega märgistada ning seejärel arvutada ühtse algoritmiga kiiruse ja kauguse hinnangud; tulemused koondati statistiliseks analüüsiks. Kauguste hajuvuse analüüs näitas, et pelgalt andurite ruumiline paiknemine (20 m × 20 m, maksimaalne vahe ~29 m) ei selgita suurte erinevuste teket; domineerivaks osutub metoodika ja signaalitõlgenduse hajuvus, sest kauguse leidmine sõltub mitme suuruse määramisest spektrogrammilt ja nende ühismõjust.

Esimesele uurimisküsimusele saab vastata, et kiiruse ja kauguse arvutamine on võimalik, kui spektrogrammil on selgelt eristatavad ristlainete horisontaalne osa ning kaldlainete haru. Samas eeldab lihtsaim lähenemine võimalikult püsivat laeva kiirust: kiirendamine või aeglustamine muudab spektrogrammi kuju ja suurendab määramatust.

Teise uurimisküsimuse põhjal selgus, et kiiruse määramine on suhteliselt täpne: süsteemi laiendatud mõõtemääramatus esitati kujul $v = \bar{v} \pm 0,05 \text{ m/s}$ ($k = 2$). Kauguse hinnangud olid oluliselt ebakindlamad: suuremate kauguste korral jäi suhteline hajuvus enamasti ~9–15%

vahemikku, kuid lühemate kauguste puhul suurenes see ~25–30%-ni. Seetõttu tuleb kauguse hinnanguid tõlgendada ettevaatlikumalt, eriti lähitsoonis. Olulise järelalusena rõhutati, et arvutatud „kaugus“ kirjeldab pigem efektiivset kaugust mõõtekohast lainepaketi tekkekohani, mitte tingimata kaugust laevateest, sest tulemust mõjutavad laeva trajektoor ja lähenemissuuna geomeetria.

Kolmanda uurimisküsimuse osas kinnitas töö meetodi praktilist asjakohasust: spektrogrammid näitasid tundlikkust laeva dünaamika suhtes (nt ristlainete haru sageduse muutumine ajas viitas kiirendamisele) ning tiheda liikluse korral oli võimalik eristada ka mitme laeva signatuure. Lisaks tuvastati kaks ebatavalist juhtumit, kus lainejälj püsis üle kahe tunni ja andis arvutuslikult väga suure kauguse (35–40 km); neid käsitleti eranditena, mis vajavad eraldi selgitamist ja edasist uurimist.

Kokkuvõttes on rõhuandurite ja spektrogrammide meetod rakendatav laevaliikluse seireks: laeva kiiruse saab määrata usaldusväärselt ja väikese mõõtemääramatusega, kuid kauguse hinnangud on suurema veaga ning tundlikumad signaali ja geomeetria mõjudele. Hüpotees leidis osalise kinnituse: kiiruse määramine osutus töökindlaks, samas kui kauguse määramine on küll võimalik, kuid vähem täpne ja vajab metoodika edasist täpsustamist. Edasised uuringud võiksid keskenduda kauguse leidmise robustsemaks muutmisele (sh automaatsem ajamomentide tuvastus), manöövrite arvestamisele mudelis ning kauglevi erandnähtuste süstemaatilisele analüüsile.

KASUTATUD ALLIKAD

- Pethiyagoda, R., McCue, S. W., Moroney, T. J. 2017. Spectrograms of ship wakes: identifying linear and nonlinear wave signals. *Journal of Fluid Mechanics*. Kättesaadav: <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.753> (14.10.2025).
- Pethiyagoda, R., Moroney, T. J., Macfarlane, G. J., McCue, S. W. 2021. Spectrogram analysis of surface elevation signals due to accelerating ships. *Physical Review Fluids*. Kättesaadav: <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.104803> (12.09.2025).
- Rätsep, M., Parnell, K. E., Soomere, T., Kruusmaa, M., Ristolainen, A., Tuhtan, J. A. 2021. Surface vessel localization from wake measurements using an array of pressure sensors in the littoral zone. *Ocean Engineering*. Kättesaadav: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109156> (12.09.2025).
- Rätsep, M. 2025. Surface Vessel Localization from Wake Measurements [doktoritöö]. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
- Ship Wave Trail 2015. Kättesaadav: <https://forums.odforce.net/topic/24601-ship-wave-trail/> (04.01.26).
- Soomere, T., Eelsalu, M., Piho, L., Parnell, K. 2026. Estimates of the typical wave approach angle from wave-induced water velocity directions in the nearshore of the Gulf of Riga, eastern Baltic Sea. Under review in *Oceanologia*. [teadustöö]. Tallinna Tehnikaülikool.
- Soomere, T. 2007. Nonlinear Components of Ship Wake Waves. *Appl. Mech. Rev* vol 60, lk 120–138.
- Soomere, T., Parnell, K 2023. Vessel detection, localization and identification based on wake measurements.
- Torsvik, T., Soomere, T., Didenkulova, I., Sheremet, A. 2015. Identification of ship wake structures by a time–frequency method. *Journal of Fluid Mechanics* vol 765, lk 229–251.
- Wu, Z. 1991. On the Estimation of a Moving Ship's Velocity and Hull Geometry Information from its Wave Spectra [doktoritöö]. Ann Arbor: Michigani Ülikool.
- Yih, C., Zhu, S. 1989. Patterns of Ship Waves. *Quarterly of Applied Mathematics* vol 47, lk 17–33.

LISA 1. Tallinna Tehnikaülikooli 2022. aastal tehtud lainete mõõtmised Skulte vallas

Lisa on leitav lingilt: https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1VU-gg0Nv-y-8RB17WNWEN3z7bWrdvd_n

LISA 2. Kood spektrogrammide genereerimiseks

Lisa on leitav lingilt:

<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1H2hoc7UsN63RSa7qeC6e33XKkKL-md7q>

LISA 3. Kood kiiruste ja kauguste arvutamiseks

Lisa on leitav lingilt:

<https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1oqEy6iykuqiJE458lxdFqHVLQbw6gfZ7>

RESÜMEE

Laeva kiiruse ja kauguse määramine mõõtekohast laevalainete salvestuste alusel (lähtudes klassikalisest Kelvini laineteooriast)

Antud uurimistöös hinnatakse veealuste rõhuanduritega salvestatud laevalainete põhjal laeva kiiruse ja kauguse määramist mõõtekohast. Meetodi väärtus seisneb selles, et lainevälja olemasolu ei sõltu tavapärase seiresüsteemide (nt AIS/GPS/radar) kättesaadavusest. Töö eesmärk oli rakendada ajasagedusanalüüsi (spektrogramme) ning hinnata saadud tulemuste mõõtemääramatust. Töös käsitleti kolme küsimust: kuidas arvutada salvestistest kiirust ja kaugust, kui täpsed on need hinnangud ning kas meetod sobib praktiliseks kasutuseks. Hüpoteesiks seati, et kiirus on spektrogrammidelt määratav usaldusväärsemalt kui kaugus, sest kauguse leidmine sõltub rohkem trajektoori geomeetriast ja levikutingimustest ning mitmest erinevast suurusest.

Metoodika tugines klassikalisele Kelvini laineteooriale ja laevalainete avaldumisele ajasagedusruumis. Kiiruse leidmiseks kasutati ristlainete ajas vähe muutuvat komponenti, kauguse hindamiseks aga kaldlainete osa, millelt määrati arvutuseks vajalikud ajamomendid ja nende vahe. Andmetöötlusel märgistati spektrogrammidelt vajalikud tunnused ning arvutati kiirused ja kaugused sama algoritmiga, et tulemusi saaks andurite löikes võrrelda.

Välitööde andmestik pärines Skulte rannikulähedasest mõõtealast, kus kasutati üheksast sünkroniseeritud ja kalibreeritud rõhuandurist koosnevat võret. Tulemused näitasid, et kiiruse hinnangud olid stabiilsed ning mõõtemääramatus väike (laiendatud määramatus $\pm 0,05$ m/s, $k = 2$). Kauguse hinnangud hajusid rohkem, eriti väikeste distantside korral. Lisaks selgus, et arvutatud kaugus kirjeldab efektiivset distantssi mõõtekohast esimese eristatava lainepaketi tekkekohani, mitte kaugust laevateest.

Kokkuvõttes on rõhuandurite ja spektrogrammide meetod rannikumeres rakendatav, eeskätt laeva kiiruse hindamiseks. Hüpotees leidis osalise kinnituse: kiirus määrati töökindlalt, kuid kauguse hinnangutes esines suurem määramatus ning need vajavad ettevaatlikku tõlgendamist ja metoodika edasist täpsustamist.

ABSTRACT

Determining a Ship's Speed and Distance from the Measurement Site Based on Recorded Ship-Wave Signals (Based on Classical Kelvin Wave Theory)

This paper examines whether ship speed and distance from a measurement site can be estimated from ship-wave signals recorded by underwater pressure sensors. Because the wave field does not rely on conventional vessel-tracking systems such as AIS, GPS, or radar, the approach can complement coastal vessel-traffic monitoring. Time–frequency analysis using spectrograms is applied, and the uncertainty of the resulting estimates is evaluated.

The method relies on classical Kelvin wave theory and the appearance of ship wakes in the time–frequency domain. Ship speed is derived from the nearly time-invariant transverse-wave component, while distance is estimated from the divergent-wave component by identifying characteristic time instants and their difference. A standardized semi-automated workflow marks features on spectrograms and computes speed and distance consistently across sensors.

Field measurements were conducted near Skulte using an array of nine synchronized and calibrated pressure sensors. The results show stable speed estimates with low uncertainty (expanded uncertainty ± 0.05 m/s, $k = 2$), whereas distance estimates show larger scatter, particularly at short ranges. The calculated distance most likely represents an effective distance to the origin of the first clearly detectable wave packet rather than the distance to the shipping lane.

Overall, the method is suitable for coastal applications, particularly for estimating ship speed. The hypothesis is partially confirmed: ship speed can be determined reliably, whereas distance estimates remain less certain and require further refinement.