

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2022

Kaisa Ahonen

VEDENALAISEN ÄÄNEN LEVIÄMINEN JA MITTAAMINEN

– mittaussuositukset Airistolle



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2022 | 62 sivua, 2 liitesivua

Kaisa Ahonen

Vedenalaisen äänen leviäminen ja mittaaminen

– mittaussuositukset Airistolle

Tämä opinnäytetyö tehtiin Turun ammattikorkeakoulun Rakennetun ympäristön tutkimusryhmälle perehdyttämään heitä vedenalaisen äänen ominaisuuksiin, leviämiseen ja mittaamiseen. Kirjallisuudesta kerättyjen tietojen lisäksi suoritettiin vedenalaisen äänen testimittaus Airistolla.

Ääni etenee vedessä pitkittäisenä aaltoliikkeenä hyvin nopeasti. Suoraviivaisen leviämisen lisäksi ääni heijastuu, taittuu, siroaa ja vaimenee vedessä. Ääntä mitataan hydrofonilaitteistolla, jolle soveltuvin asennustapa pitkäaikaisiin mittauksiin on pohjaan ankkurointi.

Testimittaukseen yhdistettiin 14 tunnin meriliikenteen seuranta.

Mittaustuloksista havaittiin, että ohi ajavat alukset nostavat vedenalaisia äänitasoja merkittävästi, mutta vain hetkellisesti. Myös valikoitujen alusten aiheuttaman äänen taajuusspektri selvitettiin.

Mittaussuositukseen on kerätty parhaat käytännöt äänimittausten suorittamiseen Airistolla. Lopuksi todetaan, että standardin kehittäminen yleistä vedenalaisen äänitason mittaamista varten olisi tärkeää mittausmenetelmien yhtenäistämiseksi.

Asiasanat:

akustiikka, ääni, vedenalainen tutkimus, mittausmenetelmät, hydrofonit

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and Environmental Engineering

2022 | 62 pages, 2 pages in appendices

Kaisa Ahonen

Propagation and measurement of underwater sound

– Recommendations for the measurements in the Airisto area

This thesis was made for the Built Environment research group at the Turku University of Applied Sciences to familiarize them with the characteristics, propagation, and measurement of underwater sound. In addition to information found in literature, an experiment in measuring underwater sound was conducted in Airisto.

Sound travels very fast in water as a longitudinal wave. Besides linear propagation, sound is also reflected, refracted, scattered, and absorbed in water. Sound is measured with a hydrophone system. The most appropriate method for long-term measurements are bottom-mounted deployments.

During the measuring experiment, a 14-hour long observation of marine traffic was carried out. The results showed a significant but instantaneous increase in underwater sound pressure levels during passing shipping. The frequency spectrum of the noise of selected vessels was also studied.

The best practices for measuring underwater sound in Airisto are summarized in the recommendations. Lastly, it is stated that a standard for measuring underwater sound levels is needed to harmonize the measuring methods.

Keywords:

acoustics, sound, underwater research, measuring methods, hydrophones

Sisältö

Käytettyjä lyhenteitä	7
1 Johdanto	8
2 Perustietoa vedenalaisesta äänestä	9
2.1 Ääni aaltoliikkeenä vedessä ja sen eteneminen	9
2.2 Äänen nopeus vedessä	11
3 Äänen mittaaminen vedessä	13
3.1 Mittauslaitteet ja niiden kalibrointi	13
3.2 Mittausjärjestelyt	15
3.3 Mittaustulosten esittäminen	18
4 Testimittaus Airistolla	21
4.1 Mittausjärjestelyt	21
4.2 Mittauspaikka ja -olosuhteet	23
4.3 Meriliikenteen seuranta	29
4.4 Mittausaineiston käsittely	32
4.5 Mittaustulokset	32
4.6 Mittausepävarmuudet	49
5 Mittaussuosituksset Airistolle	52
6 Jatkotutkimuskohteet	57
Lähteet	59

Liitteet

Liite 1. Hydrofonilaitteiston kalibrointitodistukset.

Kaavat

Kaava 1. Logaritmisen absorptiokertoimen määrittäminen (Urick 1983, s. 103).	11
Kaava 2. Äänenpainetason laskeminen (Robinson ym. 2014, s. 17).	18
Kaava 3. Äänenpaineen RMS-arvon laskeminen (Robinson ym. 2014, s. 12).	18

Kuvat

Kuva 1. Havainnollistus pitkittäisestä aaltoliikkeestä.	9
Kuva 2. Esimerkki hydrofonilaitteiston asennuksesta (Robinson ym. 2011, s. 77) (CC BY-NC-ND 2.5).	16
Kuva 3. Mittauspaikka Airistolla on merkitty karttaan punaisella pisteellä (Maanmittauslaitos ei pvm.).	21
Kuva 4. Vasemmalla pohjapainona käytetty kivi, keskellä hydrofonilaitteisto ja pinnanalainen koho, oikealla pintakohot.	23
Kuva 5. Mittauspaikka ja sitä lähellä olleet esteet (Maanmittauslaitos ei pvm.).	24
Kuva 6. Veden syvyys mittausalueella (Maanmittauslaitos ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.	25
Kuva 7. Mittausalueen merenpohjan kovat ja pehmeät alueet (GTK ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.	26
Kuva 8. Mittausalueen merenpohjan maalajit (GTK ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.	27
Kuva 9. Mittauspäivän otolliset olosuhteet.	28
Kuva 10. Tarkkailupaikan sijainti on merkitty vihreällä ja hydrofonin sijainti punaisella pisteellä (Maanmittauslaitos ei pvm.).	29
Kuva 11. Meriliikenteen seurannassa käytetyt väylät (Maanmittauslaitos ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.	30
Kuva 12. Airiston alue on merkitty karttaan punaisella ellipsillä (Maanmittauslaitos ei pvm.).	52

Kuviot

Kuvio 1. Ensimmäisen tunnin tulokset.	33
Kuvio 2. Toisen tunnin tulokset.	34
Kuvio 3. Kolmannen tunnin tulokset.	35
Kuvio 4. Neljännen tunnin tulokset.	36
Kuvio 5. Viidennen tunnin tulokset.	37
Kuvio 6. Kuudennen tunnin tulokset.	38
Kuvio 7. Seitsemännen tunnin tulokset.	39
Kuvio 8. Kahdeksannen tunnin tulokset.	40
Kuvio 9. Yhdeksännen tunnin tulokset.	41
Kuvio 10. Kymmenennen tunnin tulokset.	42
Kuvio 11. Tulokset 11. tunnilta.	43
Kuvio 12. Tulokset 12. tunnilta.	44
Kuvio 13. Tulokset 13. tunnilta.	45
Kuvio 14. Tulokset 14. tunnilta.	46
Kuvio 15. Taajuusspektrikuvaaja.	47

Taulukot

Taulukko 1. Likimääräiset arvot äänen nopeuden muutokselle vedessä lämpötilan, suolapitoisuuden ja syvyyden kasvaessa (Allen ym. 2017, s. 811).	12
Taulukko 2. Alusten jaottelu meriliikenteen seurannassa.	31
Taulukko 3. Selittävä taulukko kuvioon 15.	48

Käytettyjä lyhenteitä

Lyhenne	Lyhenteen selitys
dB	desibeli, dimensioton logaritminen suhteellinen yksikkö, jota käytetään muun muassa äänenpainetasoa kuvaamaan
GTK	Geologian tutkimuskeskus
Hz	hertsi, taajuuden yksikkö, värähdystä sekunnissa [1/s]
kn	solmu, nopeuden yksikkö, meripeninkulmaa tunnissa [mpk/h \approx 0,5 m/s]
m/s	metriä sekunnissa, nopeuden yksikkö
Pa	pascal, paineen yksikkö [N/m ²]
ppt	tuhannesosa (parts per thousand), vastaa promillea

1 Johdanto

Ihmisellä on jo pitkään ollut mielenkiinto vedenalaista ääntä kohtaan. Ensimmäiset sitä todistavat merkinnät ulottuvat aina Leonardo Da Vinciin 1400-luvun lopulle asti. Hänen käyttämänsä tekniikkaa vedenalaisen äänen kuuntelemiseen hyödynnettiin vielä niinkin myöhään kuin ensimmäisen maailmansodan aikana. Modernin vedenalaisen äänen tutkimisen voidaan katsoa alkavan toisesta maailmansodasta, jolloin aiheesta tehtiin tarkkaa määrällistä tutkimusta, jotta opittiin täsmällisemmin paikantamaan sukellusveneitä. Vedenalaisen akustiikan tiedon karttuessa on kehitetty erilaisia sovelluksia, kuten kaikuluotausta. (Urick 1983, s. xi, 2–8.)

Nyttemmin on havahduttu tutkimaan, miten ihmisperäiset äänet veden alla ovat lisääntyneet ja miten ne vaikuttavat vedenalaisiin elinympäristöihin (HELCOM ei pvm.). Tämä on tärkeää, koska ihmisen aiheuttamilla vedenalaisen ääniympäristön muutoksilla voi olla sellaisiakin merkittäviä vaikutuksia, joita ei vielä edes osata ajatella. Tähän mennessä tutkimuksissa on käynyt ilmi esimerkiksi, että meriliikenteen aiheuttama matalataajuinen ääni kasvattaa valaiden stressitasoja, mikä voi pitkällä aikavälillä aiheuttaa muutoksia jopa populaatiotasolla (Rolland ym. 2012). Vedenalaisen äänen lisääntymisen on havaittu myös vaikuttavan valaiden kommunikointitapoihin: mitä meluisampaa meressä on, sitä vähemmän mutta toisaalta kovaäänisemmin valaat kommunikoivat keskenään (Fournet ym. 2018).

Jotta vaikutuksia vedenalaisiin elinympäristöihin ja merieliöihin voidaan tutkia, pitää tuntea vedenalaisen äänen ominaispiirteet ja osata mitata sitä luotettavasti ja jäljitettävästi. Myös Turun ammattikorkeakoulun Rakennettu ympäristö -tutkimusryhmä on laajentamassa akustiikan osaamistaan ilmajälitteisestä äänestä vedenalaiseen ääneen. Tämä opinnäytetyö perehdyttää heitä vedenalaisen äänen ominaisuuksiin, leviämiseen ja mittaamiseen. Työhön liitetyn testimittauksen avulla teorian päälle kerätään käytännön kokemusta mittaamisesta.

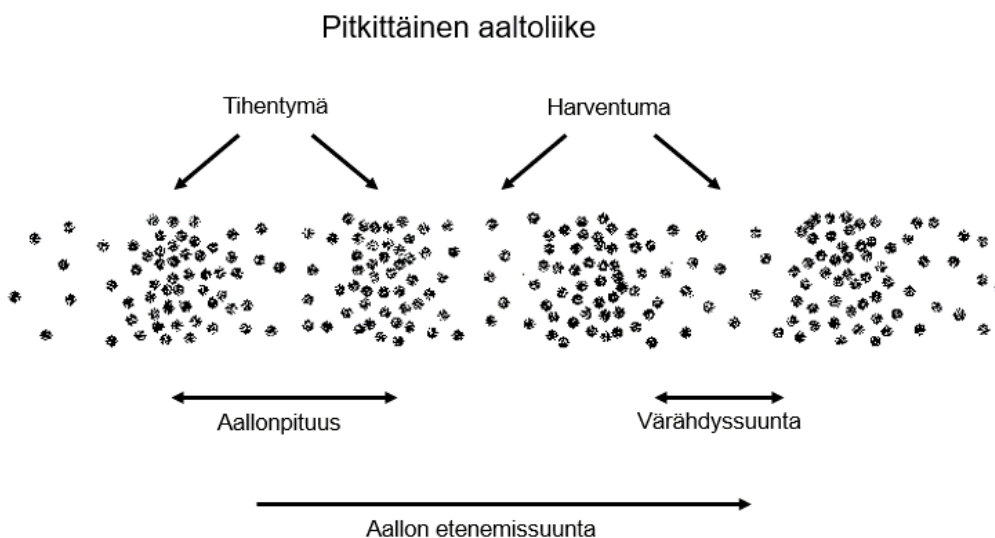
Tässä työssä paneudutaan siis vedenalaisen äänen ominaispiirteisiin ja mittaamiseen, eikä melun vaikutuksia eliöihin ole otettu mukaan. Aihe on rajattu mataliin merialueisiin, kuten Itämereen, mutta äänen leviämistä jääpeitteen alla ei käsitellä. Erityisenä mielenkiinnon kohteena on meriliikenteen aiheuttama vedenalainen jatkuva melu, joten impulssimaiset äänilähteet, kuten räjähdykset, on jätetty käsittelystä pois.

2 Perustietoa vedenalaisesta äänestä

Ääni tarvitsee aina väliaineen edetäkseen. Tässä käsitellään vettä väliaineena välillä verraten sitä ilmaan väliaineena. Moninaiset merialueet aiheuttavat suuria epävarmuustekijöitä äänen etenemisen arvioimiseen (Urick 1983, s. 29).

2.1 Ääni aaltoliikkeenä vedessä ja sen eteneminen

Ääni etenee vedessä pitkittäisenä aaltoliikkeenä, jossa vesimolekyylit liikkuvat edestakaisin äänen etenemissuunnassa luoden paikallisia paineen vaihteluja (Kuva 1). Nämä paineen vaihtelut etenevät poispäin äänilähteestä kokoavaruuden suuntaisesti, jos esteitä ei ole. Luonnon vesialueilla on kuitenkin aina esteitä. Myös pohjanmuodot ja veden syvyys vaihtelevat. Lisäksi vesi itsessään on jatkuvassa liikkeessä. Nämä aiheuttavat häiriöitä äänen suoraviivaiselle etenemiselle. (Urick 1983, s. 11, 29, 99–101.)



Kuva 1. Havainnollistus pitkittäisestä aaltoliikkeestä.

Vedessä ääni eteneekin aina monin eri tavoin. Suoraviivaisen liikkeen lisäksi tapahtuu muun muassa heijastumista, taittumista, sirontaa, vaimentumista ja jälkikaiuntaa.

Jälkikaiunta tarkoittaa eri heijastuneiden ja sironneiden ääniaaltojen summaa, ja se luo veteen hitaasti vaimenevan tonaalisen eli soinnillisen äänen. Heijastumista tapahtuu paitsi ääniaallon osuessa esteisiin myös vedessä esiintyvien lämpötila- ja suolapitoisuuskerrostumien yhteydessä. Näihin kerrostumiin osuessaan usein osa ääniaallosta heijastuu ja osa taittuu. (Urlick 1983, s. 23–25, 29, 99, 117–118, 237.)

Äänen heijastumista tapahtuu vedessä myös pohjasta ja vedenpinnasta. Matalissa vesissä eli suunnilleen alle 150 m syvillä merialueilla vedenpinnan ja pohjan heijastusvaikutukset ovat havaittavissa koko syvyydellä. Täysin tynestä vedenpinnasta ääni heijastuu lähes täydellisesti. Vedenpinnan eläessä ääniaallot heijastumisen lisäksi siroavat eli hajoavat eri suuntiin. Siroamista lisää entisestään vedenpinnan aaltojen veteen sotkemat ilmakuplat. Äänen heijastuessa aaltoilevasta vedenpinnasta ääniaallon taajuus voi muuttua, koska vedenpinnan vertikaalinen liike sekoittuu ääniaaltoon. (Urlick 1983, s. 128–130, 136, 172, 249–250.)

Meren pohjasta ääniaaltojen heijastuminen ja siroaminen on vielä vedenpintaa monimutkaisempaa, koska eri pohjan laaduilla on erilaiset akustiset ominaisuudet. Meren pohja on harvoin tasalaatuista, vaan siinä on erilaisia kerrostumia ja koostumuksia. Mitä kovempi pohjan koostumus on, sitä vahvemmin se heijastaa ääntä. Mitä rosoisempi pohja on, sitä enemmän se siroaa ääntä eri suuntiin. Erityisesti pehmeä mutapohja voi tietyillä ääniaallon tulokulmilla estää äänen heijastumisen kokonaan. Tällöin ääni absorboituu mutapohjaan. Absorptio tarkoittaa ääniaallon energian muuttumista väliaineen lämmöksi. Kaikki eri pohjan laadut absorboivat ääntä jonkin verran. (Urlick 1983, s. 102, 136–143.)

Vedessä tai muussa väliaineessa edetessään ääni vaimenee jo pelkästään geometrisen leviämisen takia, ja vapaassa kentässä äänenpaine puolittuu etäisyyden kaksinkertaistuessa. Vaimentumista aiheuttaa lisäksi äänen absorboituminen veteen. Absorptio kasvaa etäisyyden kasvaessa logaritmisesti absorptiokerroimen osoittaman määrän verran. Logaritminen absorptiokerroin α määritetään kaavan 1 avulla, jossa I_1 on äänen intensiteetti etäisyydellä r_1 ja I_2 on äänen intensiteetti etäisyydellä r_2 . Sen yksikkönä käytetään dB/km. Äänen intensiteetti kuvaa ääniaallon tehoa pinta-alaa kohden ja sen yksikkö on W/m^2 . (Urlick 1983, s. 13, 100–103.)

$$\alpha = \frac{10 \log_{10}(I_1) - 10 \log_{10}(I_2)}{r_2 - r_1}$$

Kaava 1. Logaritmisen absorptiokertoimen määrittäminen (Urlick 1983, s. 103).

Vedessä logaritminen absorptiokerroin vaihtelee suolapitoisuuden, happamuuden, syvyyden ja lämpötilan mukaan. Mitä suurempi suolapitoisuus, happamuus ja lämpötila ja mitä pienempi syvyys, sitä vahvempaa äänen absorboituminen on. Absorptiokerroin on vahvasti taajuusriippuvainen. Valtamerivedessä se on luokkaa 0,001–10 dB/km taajuusalueella 0,1–50 kHz nousten melko lineaarisesti. Korkeammat äänen taajuudet absorboituvat siis huomattavasti vahvemmin, ja siksi matalat taajuudet leviävät vedessä huomattavasti pidemmälle. (Urlick 1983, s. 23, 100–111.) Ilmaan verrattuna äänen absorboituminen vedessä on kuitenkin merkittävästi heikompaa ja siksi ääni lähtökohtaisesti leviää vedessä pidemmälle kuin ilmassa (Berg ei pvm.).

2.2 Äänen nopeus vedessä

Ääniaallot kulkevat vedessä hyvin nopeasti. Vedessä äänennopeus on suuruusluokaltaan 1500 m/s, kun ilmassa se on noin 340 m/s (Seppänen ym. 2009, s. 91). Ääni mekaanisena aaltona kulkeutuu sameassa ja suolapitoisessa vedessä jopa nopeammin kuin sähkömagneettinen säteily eli esimerkiksi näkyvä valo tai radioaallot. Tällaisissa olosuhteissa ääni onkin tehokkain etenijä kaikista tunnetuista aaltoliikkeistä. (Urlick 1983, s. 1.)

Äänen nopeus vedessä riippuu veden lämpötilasta, suolapitoisuudesta sekä hydrostaattisesta paineesta, joka on suoraan verrannollinen siihen, kuinka syvällä ääni etenee. Muiden fysikaalisten muuttujien ei ole havaittu vaikuttavan äänen etenemisnopeuteen vedessä. Erityisesti veden lämpötilan vaikutuksesta johtuen maantieteellinen sijainti, vuodenaika ja jopa kellonaika vaikuttavat äänen nopeuteen vedessä. Lisäksi biologiset organismit ja pintavedessä olevat ilmakuplat vaikuttavat nekin äänen nopeuteen. (Urlick 1983, s. 111–113.) Matalassa vedessä rannikkoalueilla äänen nopeusprofiilista tulee yleensä epäsäännöllinen muun muassa pintaveden

lämpötilamuutosten takia. Siksi sen ennustaminen on erityisen haastavaa. (Urlick 1983, s. 120.)

Vedenalaisen äänen nopeuden tarkka määrittäminen muuten kuin mittaamalla ei siis ole helppoa, mutta tietyt lainalaisuudet pätevät. Äänen nopeus kasvaa, kun veden lämpötila, suolapitoisuus ja syvyys kasvavat. (Urlick 1983, s. 114.) Nyrkkisääntönä voidaan pitää taulukon 1 arvoja (Allen ym. 2017, s. 811). Suolapitoisuuden yksikkö ppt tarkoittaa tuhannesosaa ja se kuvaa, kuinka monta grammaa suolaa on kilogrammassa vettä.

Taulukko 1. Likimääräiset arvot äänen nopeuden muutokselle vedessä lämpötilan, suolapitoisuuden ja syvyyden kasvaessa (Allen ym. 2017, s. 811).

	Lämpötila	Suolapitoisuus	Syvyys
Muutos äänen nopeuteen vedessä	$+4 \frac{m}{s}/^{\circ}C$	$+1,4 \frac{m}{s}/ppt$	$+0,016 \frac{m}{s}/m$

Taulukon 1 perusteella suurin vaikutus äänen nopeuteen on lämpötilan muutoksilla. Valtamerissä syvyyden vaikutus muuttuu merkittävämmäksi. Äänen nopeuden vaihteluilla on vaikutusta äänen leviämiseen vedessä, koska ääniaallot taittuvat kohti hitaamman nopeuden kerroksia (Urlick 1983, s. 118).

3 Äänen mittaaminen vedessä

Yksittäisten laivojen säteilemän äänen mittaamiseen vedessä on vahvistettu yksi kansallinen standardi SFS-ISO 17208-1:2016. Sen kansainvälistä kakkososaa ISO 17208-2:2019 ei ole vielä vahvistettu osaksi suomalaista kansallista standardistoa. Ne molemmat kuitenkin käsittelevät äänen mittaamista syvässä vedessä eikä matalammilla rannikkoalueilla. ISO 17208 -standardiin on vasta työn alla kolmas osa, joka käsittelee meriliikenteen aiheuttaman vedenalaisen äänen mittaamista matalissa vesissä. ISO 17208 -standardissa syvällä vedellä tarkoitetaan vähintään 150 metrin syvyyttä. (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 3, 10.)

Näiden standardien lisäksi NPL (National Physical Laboratory) on koonnut kattavan vedenalaisen äänen mittausmenetelmien oppaan, joka on julkaistu ennen edellä mainittuja standardeja mutta jonka perusteena on 10 kansainvälistä tai yhdysvaltalaisista erilaista pääasiassa vedenalaiseen äänen mittaamiseen liittyvää standardia (Robinson ym. 2014, s. 8–9). NPL on Ison-Britannian johtava mittauslaboratorio (NPL 2022). Tässä luvussa käytetään näitä dokumentteja pääasiallisina lähteinä soveltuvin osin.

3.1 Mittauslaitteet ja niiden kalibrointi

Vedenalaista ääntä mitataan hydrofonilla, joka aistii ääniaallon paineen vaihtelut vedessä (Urick 1983, s. 11). Tärkeimpiä hydrofonin ominaisuuksia ovat sen herkkyys, taajuusvaste, suuntaavuus, sähköinen kohina ja dynaaminen alue. Hydrofonin herkkyydellä kuvataan, kuinka tarkkaan se reagoi mittaamiinsa paineen vaihteluihin. Jos tarkoituksena on mitata hiljaisia ääniä, herkkyyden pitää olla suuri. Jos taas tarkoituksena on mitata kovia ääniä, matalampi herkkyys on suositeltava, jotta mittaustuloksista saa selvää. Taajuusvaste tarkoittaa hydrofonin herkkyyttä eri ääniaaltojen taajuuksilla. Hydrofonille määritetyn taajuusvasteen tulisi olla laajempi kuin taajuusalue, jolla äänimittaus aiotaan suorittaa, jotta mittaustulokseen voidaan luottaa. Hydrofonin näytteenottotaajuus asetetaan kaksinkertaiseksi verrattuna suurimpaan ääniaallon taajuuteen, joka halutaan mitata. Näytteenottotaajuus kuvaa, kuinka monta näytettä hydrofonilaitteisto ottaa sekunnissa. (Robinson ym. 2014, s. 23–24, 34.)

lhanteellinen hydrofoni pystyisi vastaanottamaan ääniaaltoja joka suunnasta, mutta erityisesti hydrofonin elektronisten osien säilytyskotelo estää sen. Hydrofoni pitää asentaa mittausjärjestelyissä niin, että sen kotelo ei ole tarpeettomasti ääniaaltojen tiellä.

Hydrofonilaitteiston sähköinen kohina eli laitteiston itsensä luoma ääni määrää pienimmän äänenpainetasoa, jonka hydrofoni voi mitata. Sähköisen kohinan lisäksi on huomioitava myös hydrofonilaitteiston kiinnityssysteemien veteen luoma ääni. Korkeita äänenpainetasoja mitatessa sähköinen kohina ja kiinnityssysteemien luoma ääni muuttuvat merkityksettömiksi. Dynaamisella alueella tarkoitetaan sitä äänenpainetasojen aluetta, jolla mittaus voidaan suorittaa luotettavasti. Sen alarajan määrää sähköinen kohina ja kiinnityssysteemien luoma ääni ja ylärajan hydrofonin herkkyys. Herkkyyden pitää pysyä lineaarisena koko dynaamisella alueella. (Robinson ym. 2014, s. 25–27.)

Hydrofonin lisäksi tarvitaan datan tallennin sekä datan käsittelyvälineistö (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 9). Kaikkein edistyneimmät mittauslaitteistot lähettävät mittausdataa jo mittauksen aikana joko kaapelia tai satelliittiyhteyttä pitkin. Niitä ei kuitenkaan ole valmiina kaupallisesti saatavilla, ja siksi yleisin ja kustannustehokkain tapa on käyttää tallentavaa laitteistoa, josta mittausdata on saatavilla vasta jälkepäin. (Robinson ym. 2014, s. 36.) Data on paras tallentaa ilman pakkaamista, jotta sen laatu ei huonone. Usein mittausdataa joudutaan kuitenkin pakkaamaan tallennustilan ja mittausjakson maksimoimiseksi, mutta tällöin muutokset datan laatuun tulee tietää. Tavallinen tallennusmuoto on WAV eli Waveform Audio -tiedostotyyppi, mutta mitään standardoitua tallennusmuotoa ei ole. Mittausdatan yhteyteen tulee tallentaa tarvittavat meta- ja kalibrointitiedot, jotta ne pysyvät yhdessä. (Robinson ym. 2014, s. 33.)

Hydrofonilaitteisto tulee kalibroida ennen jokaista mittausta. Sen voi tehdä kenttäolosuhteissa. Jos mittauksia tehdään useampi päivässä, yksi kalibroitikerta päivässä riittää. Laboratoriossa suoritettava kalibrointi tulee tehdä vuosittain. (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 10) Laboratoriokalibroinnissa selvitetään hydrofonin herkkyys koko sillä taajuusalueella, jolla äänimittauksia aiotaan suorittaa. Kalibrointi voidaan suorittaa altistamalla hydrofoni tunnetuille äänenpainetasoille eri taajuuksilla ja vertaamalla tunnettuja arvoja hydrofonilaitteiston antamiin arvoihin. Kenttäolosuhteissa riittää, että hydrofoni altistetaan hydrofonikalibraattorin yksitaajuiselle äänenpainetasolle, jolloin mittausdataan saadaan yksi varma tulos ennen varsinaista mittausta. Yleensä taajuutena käytetään 250 Hz:iä. Koska tämä kenttäkalibrointi on nopea suorittaa, se suositellaan

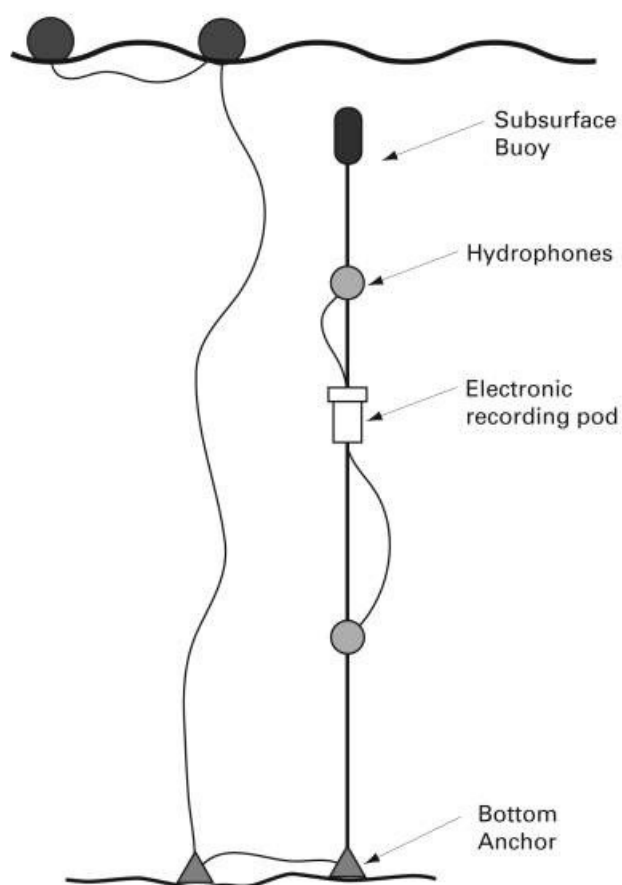
tehtäväksi myös mittauksen jälkeen ja eri mittausten välillä. (Robinson ym. 2014, s. 29–32.)

3.2 Mittausjärjestelyt

Vedenalaisen äänen mittauksia voidaan suorittaa joko veneestä käsin tai jättämällä hydrofonilaitteisto mereen mittauksen ajaksi. Molemmissa tavoissa pitää minimoida mittausjärjestelyistä syntyvä ääni, mikä on usein helpompaa jälkimmäisenä mainitussa tavassa. (Robinson ym. 2014, s. 35–42.) Tässä keskitytään näihin staattisiin asennuksiin.

Staattiset hydrofonilaitteistojen asennukset luovat parhaan mahdollisuuden pitkäaikaisiin mittauksiin, mutta sallivat luonnollisesti mittauksen vain yhdessä paikassa kerrallaan. Lisäksi ne ovat alttiita ilkeille ja varkauksille. Niiden soveltuvin asennustapa on pohjaan ankkurointi, koska tällöin vältetään vedenpinnan aaltojen aiheuttama liplatus suoraan hydrofoniin liitettyyn pintakohoon. Vaikka pintakoho aiheuttaa liplatusta, hydrofonista irrallaan oleva pintakoho on kuitenkin välttämätön, jos hydrofonilaitteisto on mittauspaikalla vaarana jäädä esimerkiksi meriliikenteen tai kalastajien tielle. Lisäksi pintakoho helpottaa mittauslaitteiston löytymistä, jos se on kaikesta huolimatta päässyt siirtymään kovan merenkäynnin takia. Mittauslaitteistoon kannattaakin aina merkitä yhteystiedot katoamisen varalta. Myös GPS-paikanninta voidaan hyödyntää ja pintakohoon liittää tutkaheijastimia. (Robinson ym. 2014, s. 36–39, 43–44.)

Kuvassa 2 on esimerkki hydrofonilaitteiston asentamisesta veteen. Siinä on valittu käyttää kahta hydrofonia eri syvyyksillä. Pinnanalainen koho kannattelee mittauslaitteiston oikeassa asennossa ja pohja-ankkuri pitää mittaussysteemin paikallaan. Tässä mittaussysteemissä pintakohot on erotettu suorasta kontaktista hydrofoniin, ja ne ovat välttämättömät, koska niiden avulla mittaussysteemi nostetaan ylös. Pintakohojen käyttö voidaan välttää käyttämällä akustista laukaisinta pohjapainon yläpuolella. Akustinen laukaisin katkaisee yhteyden pohjapainoon saadessaan tietyn akustisen signaalin, jolloin mittaussysteemi nousee pinnanalaisen kohon avulla pintaan. Tällöin ankkurina toimiva pohjapaino jää siis meren pohjaan. (Robinson ym. 2014, s. 36–39.) Akustinen laukaisin kannattaa sijoittaa vähintään metrin verran pohjapainon yläpuolelle, jotta se ei uppoa mutaan, jos merenpohja alueella on hyvin pehmeää (Verfuß ym. 2015, s. 33).



Kuva 2. Esimerkki hydrofonilaitteiston asennuksesta (Robinson ym. 2011, s. 77) (CC BY-NC-ND 2.5).

Jotta hydrofonilaitteiston kiinnityssysteemit loisivat mahdollisimman vähän ääntä, kaikki kiinnitykset tulee tehdä niin, ettei mikään pääse veden liikkeiden mukana hankaamaan tai hakkaamaan mihinkään. Kiinnityksessä käytetään ehdottomasti köysiä tai vaijereita kettinkien sijaan. Hydrofonin pystysuuntainen liike pitää estää, koska jo 10 cm muutos hydrofonin syvyydessä, aiheuttaa noin 1 kPa muutoksen hydrostaattisessa paineessa, mikä vastaa 180 dB re 1 μ Pa (Kaava 2). Mittauspaikka tulisi mahdollisuuksien mukaan valita niin, ettei siinä esiinny vahvoja virtauksia, koska virtaukset aiheuttavat hydrofoniin matalataajuista huminaa, joka ei kuitenkaan ole todellista ääntä vedessä. Tätä voi verrata ilmassa tuulen mikrofoniin aiheuttamaan huminaan. Mittausjärjestelyistä syntyvän äänen minimoiminen on tärkeää, koska sitä voi olla mahdoton havaita ja erottaa mittausdatasta jälkeinpäin. (Robinson ym. 2014, s. 39–42.)

Kustannustehokkain ja yksinkertaisin tapa on käyttää vain yhtä hydrofonia äänimittauksessa. Kahden hydrofonin käyttämisessä etuna on esimerkiksi se, että niihin voidaan valita erilaiset dynaamiset alueet, jolloin pystytään mittaamaan äänenpainetasoja laajemmalla skaalalla. Suositeltava syvyys, johon hydrofoni asennetaan matalassa vedessä, on $\frac{1}{2}$:n ja $\frac{3}{4}$:n välillä veden syvyydestä vedenpinnasta mitattuna. Tällöin vedenpinnan vaikutukset ääniaaltoihin häiritsevät vähiten. Vedenpinnan vaikutukset ovat vahvimmillaan $\frac{1}{4}$ ääniaallonpituuden päässä vedenpinnasta. 100 Hz taajuiselle ääniaallolle se tarkoittaa noin 3,7 m ja 1 kHz taajuiselle ääniaallolle vain noin 37 cm. Jos merenpohja on hyvin heijastavaa, suositellaan hydrofoni asennettavaksi veden syvyyden puoleen väliin. (Robinson ym. 2014, s. 37–38.)

Mittaustaajuuden valitseminen riippuu siitä, millaista äänilähdettä halutaan tutkia. Meriliikenteen aiheuttamaa ääntä mitatessa taajuusalue pitää olla vähintään 10–20 000 Hz (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 9). Meressä on aina myös tietty taustäänitaso, jonka tarkkaa äänilähdettä ei pystytä selvittämään. Taustääntä aiheuttavat muun muassa merieläimet, merivirrat, aallokko, sade, kaukana liikkuva meriliikenne ja seisminen toiminta meren pohjassa. Sitä esiintyy kaikilla taajuuksilla, mutta yleensä se on vahvempaa matalilla taajuuksilla. Yleensä meren taustääni kuulostaa matalilla taajuuksilla kumealta jylinältä ja korkeammilla taajuuksilla ei-tonaaliselta kohinalta. Matalissa vesissä rannikolla ja saaristossa taustäänitaso tyypillisesti vaihtelee paikan ja ajan suhteen enemmän kuin valtamerissä. Taustäänitasoa mitatessa kaikki muut äänilähteet tulee sulkea pois. Myös hydrofonin oma sähköinen kohina sekä hydrofonin kiinnityksestä syntyvä ääni pitää eliminoida tai saada merkityksettömän pieneksi. (Urick 1983, s. 202–233.)

Varsinaisen äänimittauksen lisäksi on tarpeen tehdä muita havaintoja ja mittauksia, jotka voivat vaikuttaa äänimittauksen tuloksiin. Näitä ovat tuulen nopeus, aallonkorkeus, sademäärä ja ilman lämpötila. Lisäksi selvitetään merenpohjan tyyppi, veden lämpötila, syvyys, happamuus ja suolapitoisuus sekä hydrofonin asennussyvyys ja GPS-sijainti. Monet näistä tiedoista voi selvittää erilaisista tietokannoista, kuten Ilmatieteen laitoksen tai GTK:n sivuilta, mutta ne voi selvittää myös paikallisesti itse mittaamalla. Tällöin on varmistuttava, ettei näistä mittauksista synny ääntä. (Robinson ym. 2014, s. 42–43.) Laivamelua tutkittaessa on suositeltavaa, että tuulen nopeus ei ylitä 10 m/s, jotta taustäänitasot vedessä eivät nouse liian korkeiksi (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 12).

Myös äänen nopeusprofiili on tapana selvittää, mutta matalissa vesissä äänen nopeus ei yleensä vaihtele merkittävästi (Robinson ym. 2014, s. 42–43, 70). Äänen nopeus vedessä voidaan mitata esimerkiksi CTD-luotaimen avulla, joka veden sähkönjohtokyvyn (conductivity), lämpötilan (temperature) ja syvyyden (depth) avulla määrittää äänen nopeuden veden syvyyden funktiona. Sähkönjohtokyky riippuu veden suolaisuudesta. (Ilmatieteen laitos 2021.)

3.3 Mittaustulosten esittäminen

Mitattua ääntä kuvataan numeerisesti äänenpainetasolla. Se on soveltuvin suure kuvaamaan jatkuvaa ääntä, jollaista esimerkiksi laivamelu on. Äänenpainetaso (SPL, sound pressure level) vedessä lasketaan samalla kaavalla kuin ilmvälitteisen äänen yhteydessä (Kaava 2), mutta referenssiarvo p_0 on eri. Vedessä se on 1 mikropascal. Kaavassa \tilde{p} tarkoittaa äänenpaineaallon RMS-arvoa eli neliöllistä keskiarvoa (Kaava 3). Sitä laskiessa käytetty aikaintervalli t_1 – t_2 pitää aina ilmoittaa. Äänenpainetason yksikkö on desibeli dB. (Robinson ym. 2014, s. 17–18, 22.)

$$SPL = 10 \log_{10} \left[\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right]$$

Kaava 2. Äänenpainetason laskeminen (Robinson ym. 2014, s. 17).

$$\tilde{p} = \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Kaava 3. Äänenpaineen RMS-arvon laskeminen (Robinson ym. 2014, s. 12).

Vedessä äänenpainetason referenssiarvona p_0 on käytetty eri arvoja, mutta jo 1970-luvulla USA:ssa standardoitiin käytettäväksi vedessä referenssiarvona 1 mikropascalialia, ja se on sen jälkeen vakiintunut käyttöön. Hyötynä on muun muassa se, että 1 mikropascalin

vertailuarvolla todella harvoin saadaan negatiivisia desibeliarvoja. (Urlick 1983, s. 14–16.) Nykyisin vedessä käytettävä referenssiarvo 1 mikropascal mainitaan myös kansainvälisessä ISO-standardissa ISO 1683:2015, joka on vahvistettu myös suomalaiseen standardistoon. On tärkeää huomata, että referenssiarvo on eri kuin ilmavälitteisen äänen kanssa käytettävä, ihmisen kuulokynnystä kuvaava 20 µPa. (SFS-EN ISO 1683:2015, s. 2). Siksi äänenpainetasoja annettaessa on referenssiarvo aina ilmoitettava: dB re 1 µPa (Robinson ym. 2014, s. 18).

Näiden eri referenssiarvojen takia äänenpainetasot vedessä ja ilmassa eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa. Standardissa SFS-EN ISO 1683:2015 kuvataan, että numeerinen ero referenssiarvoilla 20 µPa ja 1 µPa on noin 26 dB:

$$10 \log_{10} \left[\frac{(20 \mu\text{Pa})^2}{(1 \mu\text{Pa})^2} \right] \approx 26 \text{ dB}.$$

Tämän lisäksi on huomioitava väliaineiden ominaisuuksien eroavaisuudet. Akustisella impedanssilla kuvataan väliaineen ominaisuutta vastustaa ääniaallon etenemistä, ja aineen akustinen ominaisimpedanssi saadaan väliaineessa kulkevan äänen nopeuden ja väliaineen tiheyden tulona. Vedelle akustinen ominaisimpedanssi on $1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2\text{s}}$ ja ilmalle akustinen ominaisimpedanssi $42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^2\text{s}}$. (Urlick 1983, s. 11–12.) Veden akustinen ominaisimpedanssi on siis noin 3600 kertaa suurempi kuin ilman. Tästä saadaan 35,5 dB korjauskertoimen:

$$10 \log_{10} 3600 \approx 35,5 \text{ dB}.$$

Näistä kahdesta korjauskertoimesta yhteen laskemalla saadaan 61,5 dB. On ehdotettu, että vedenalaisesta äänenpainetasosta voisi tehdä 61,5 dB suuruisen korjauksen alaspäin, jolloin se kuvaisi vastaavaa äänenpainetasoa ilmassa. Tällä tavalla ilmavälitteiseen ääneen tottunut voi arvioida vedessä mitatun äänen tasoa. Tätä tapaa ei kuitenkaan pidä käyttää tieteellisessä tutkimuksessa, koska se sisältää mahdollisuuden vääriin tulkintoihin eikä se toimi esimerkiksi painotettujen äänenpainetasojen kanssa, joita käytetään usein ilmavälitteisen äänen yhteydessä. Lisäksi tämä tapa ei huomioi maa- ja vesieliöiden erilaisia tapoja aistia ääntä, joten vertailu ei useinkaan ole mielekäästä. (Finfer ym. 2008, s. 465–470.)

Ilmavälitteisen äänen yhteydessä äänenpainetasoja määritettäessä käytetään usein taajuuspainotusta, jolla pyritään kuvaamaan ihmisen kuuloaistia. Vedenalaiseen ääneen ei

ole standardoitu mitään yleistä taajuuspainotuskäyrää, ja siksi taajuuspainotuksen käyttämiselle vedenalaisen äänen yhteydessä ei yleisesti ole perusteita. Joillekin merieläimille on määritetty painotuskäyriä, ja kyseisten eläinten vedenalaista äänympäristöä tutkittaessa niiden käyttäminen on aiheellista. Jos taajuuspainotusta käytetään, on se määriteltävä ja sen käyttö merkittävä asiaankuuluvien alaindeksien. (Robinson ym. 2014, s. 16–18.) Painottamattomien eli lineaaristen äänenpainetasojen yhteydessä käytetään usein alaindeksiä Z, joka tulee englannin kielen sanasta 'zero' eli nolla (Gracey & Associates ei pvm.).

Mitatut äänenpainetasot analysoidaan $\frac{1}{3}$ -oktaavikaistoittain, ja niiden laskemisessa käytetään vähintään 30 sekunnin keskiarvoja, kun kyseessä on jatkuva ääni (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 9, 17). Näistä lasketaan niin sanottu ekvivalenttiäänenpainetaso eli keskiäänenpainetaso, jotta saadaan yksilukuarvo, joka voidaan raportoida (Robinson ym. 2014, s. 53).

Mittaustulosten yhteydessä kerrotaan myös kaikki taustatiedot, kuten mittauspaikka ja -ajankohta, mittauslaitteiston tiedot ja mittausolosuhteet. Mittauslaitteistosta kerrotaan tyyppi ja malli, herkkyys, suuntaavuus, asennussyvyys ja kalibrointitiedot.

Mittausolosuhteet käsittävät sääolosuhteet, meren syvyyden ja pohjan tyyppin sekä veden suolapitoisuuden ja lämpötilan. (SFS-ISO 17208-1:2016, s. 22.)

4 Testimittaus Airistolla

Vedenalaisen äänen testimittaus suoritettiin 4.5.2022 Airistolla Eerikvallanniemen edustalla. Mittauspaikka on merkitty kuvan 3 Maanmittauslaitoksen taustakarttaan punaisella pisteellä.



Kuva 3. Mittauspaikka Airistolla on merkitty karttaan punaisella pisteellä (Maanmittauslaitos ei pvm.).

Mittauspaikka valittiin niin, että se on mahdollisimman avonaisella paikalla lähellä Naantalin väylää eli meriliikenteen sisääntuloväylää Turun ja Naantalin satamiin. Testimittauksen yhteydessä pidettiin 14 tunnin ajan kirjaa ohi ajavasta meriliikenteestä, jotta alusten aiheuttama ääni pystyttiin erottamaan mittaustuloksista.

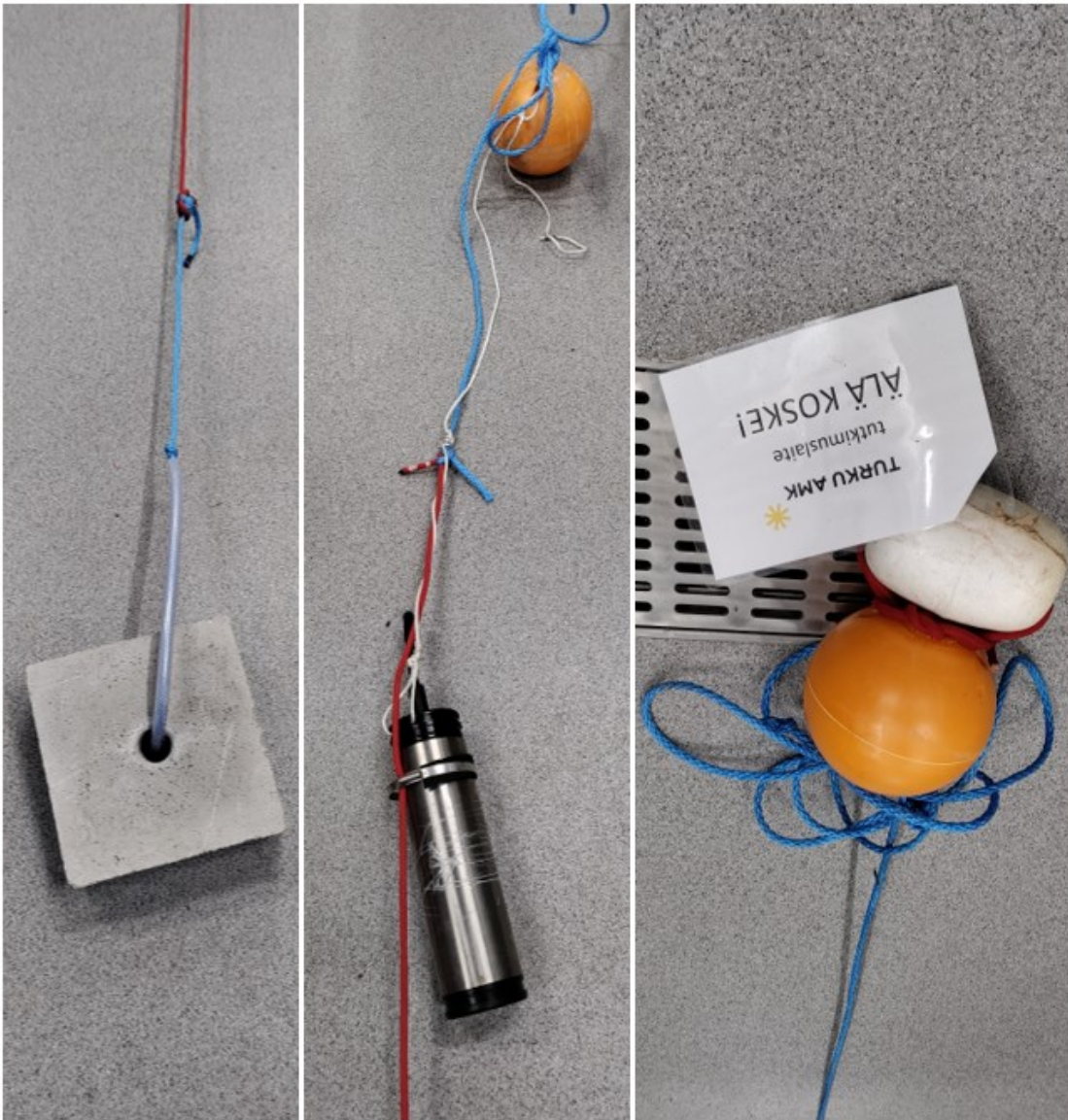
4.1 Mittausjärjestelyt

Mittaus suoritettiin SoundTrap ST500 STD -hydrofonilaitteistolla, joka on akustinen tallennin sisäisellä muistilla ja muistikorttipaikoilla. Sen dynaaminen alue on valmistajan mukaan 36–173 dB re 1 μ Pa. Hydrofonilaitteiston paras mittausalue kattaa taajuudet 20

Hz:stä 60 kHz:iin asti. (Ocean Instruments NZ ei pvm.) Tässä mittauksessa huomioitiin kuitenkin pienellä varauksella myös taajuudet 1–20 Hz, koska meriliikenteen aiheuttaman äänen voidaan olettaa ulottuvan sinne asti. Taajuusalueen ylärajana käytettiin meriliikenteelle soveltuvaa 20 kHz:ä. Siksi näytteenottotaajuus asetettiin 48 kHz:iin, jotta se on yli kaksinkertainen korkeimpaan mitattuun taajuuteen verrattuna. Käytetyn tallentimen sarjanumero oli 5851 ja siihen liitetyn hydrofonin sarjanumero oli 1286. Valmistajan antamat kalibroitiedot niille käyvät ilmi liitteestä 1. Erillistä kalibroitua ei tämän mittauksen yhteydessä suoritettu, koska siihen ei ollut saatavilla soveltuvia laitteita.

SoundTrap ST500 STD -mittauslaite soveltuu äänimittauksiin 200 m syvyyteen asti. Virtalähteenään se käyttää kolmea, kuutta tai yhdeksää 1,5 V:n D-paristoa, ja niiden määrä valitaan mittausjakson pituuden mukaan. (Ocean Instruments NZ ei pvm.) Testimittauksessa käytettiin varmuudeksi kuutta paristoa, vaikka kolmekin olisi riittänyt näin lyhyeen mittaukseen. Lisäksi hydrofonilaitteisto varustettiin kahdella kosteutta imevällä silikageelipussilla. Näillä varusteilla laite painoi 3,8 kg. Hydrofonilaitteistoa kelluttamaan valittiin koho, jonka kantavuus on 7,5 kg. Se asennettiin asettumaan vedenpinnan alle. Pohjapainona käytettiin noin 20 kg painavaa kiveä. Lisäksi käytettiin pintakohoa helpottamaan hydrofonin asennusta ja lisäämään mittausturvallisuutta alueella, jossa veneitä liikkuu paljon. Pintakohoksi valittiin väreiltään valkoinen ja oranssi koho, koska merellä eri sääoloissa vedenpinnasta erottuu paremmin välillä valkoinen ja vuorostaan välillä oranssi väri. Pintakoho kiinnitettiin hydrofonia kelluttavaan pinnanalaiseen kohoosiin niin pitkällä köydellä, ettei pintakoho jäisi kantavaksi ja aiheuttaisi vertikaalista liikettä hydrofoniin. Se synnyttäisi virheellistä signaalia mittauksiin virtauksen ja hydrostaattisen paineen vaihteluiden takia.

Hydrofonilaitteisto kiinnitettiin kiristyspannalla köyteen niin, että itse hydrofonin pää kallistuu köydestä irti, ettei se ota häiriötä köydestä. Hydrofonin kiinnitys varmistettiin vielä toisella köydellä kiristyspannan lisäksi. Asennuksessa hydrofonin kotelo asettuu merenpohjaa päin, jolloin se on mahdollisimman vähän ääniaaltojen tiellä. Koska veden syvyys oli noin 8,5 m mittauspaikalla, asennettiin hydrofoni 3 m korkeudelle pohjasta, jolloin suositeltavan mittaussyvyyden ehto matalassa vedessä toteutuu. Pinnanalainen koho kiinnitettiin 1,5 m hydrofonin yläpuolelle ja pintakohot siitä 4,5 m päähän, jotta köysi jää löysälle kohoosiin. Kiinnityssysteemit näkyvät kuvassa 4.



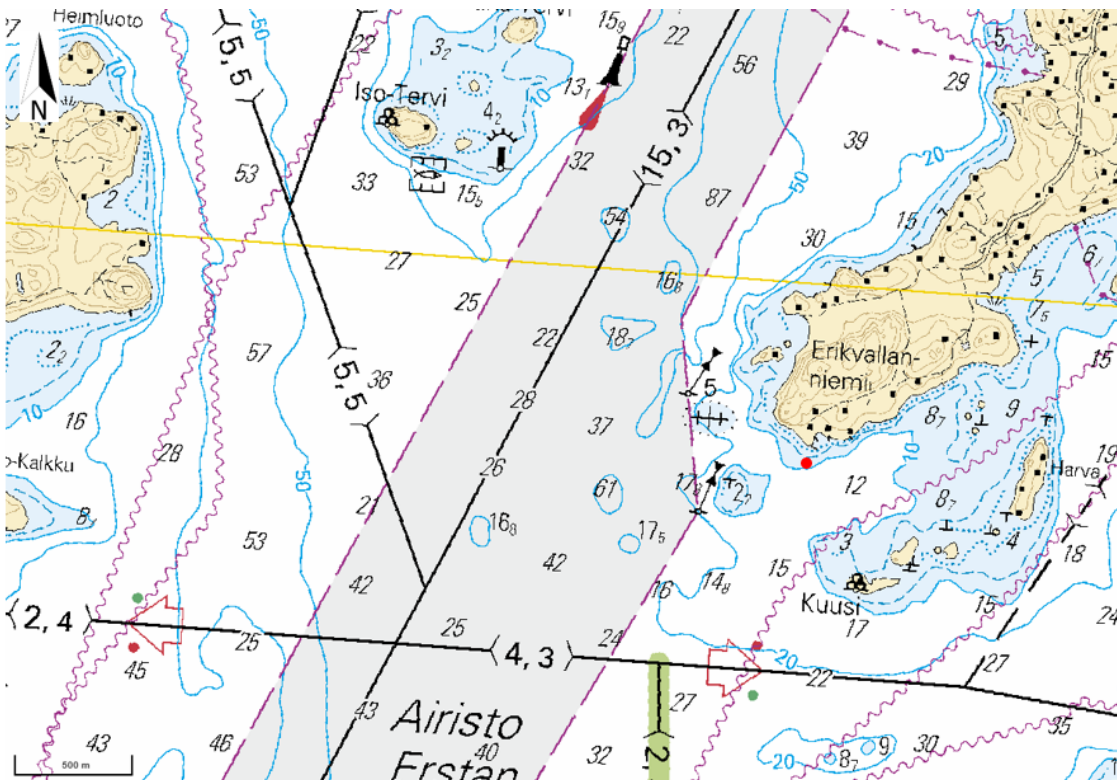
Kuva 4. Vasemmalla pohjapainona käytetty kivi, keskellä hydrofonilaitteisto ja pinnanalainen koho, oikealla pintakohot.

Hydrofonilaitteiston kiinnityssysteemien suunnitteluun ja rakentamiseen apua saatiin Turun ammattikorkeakoulun Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmältä.

4.2 Mittauspaikka ja -olosuhteet

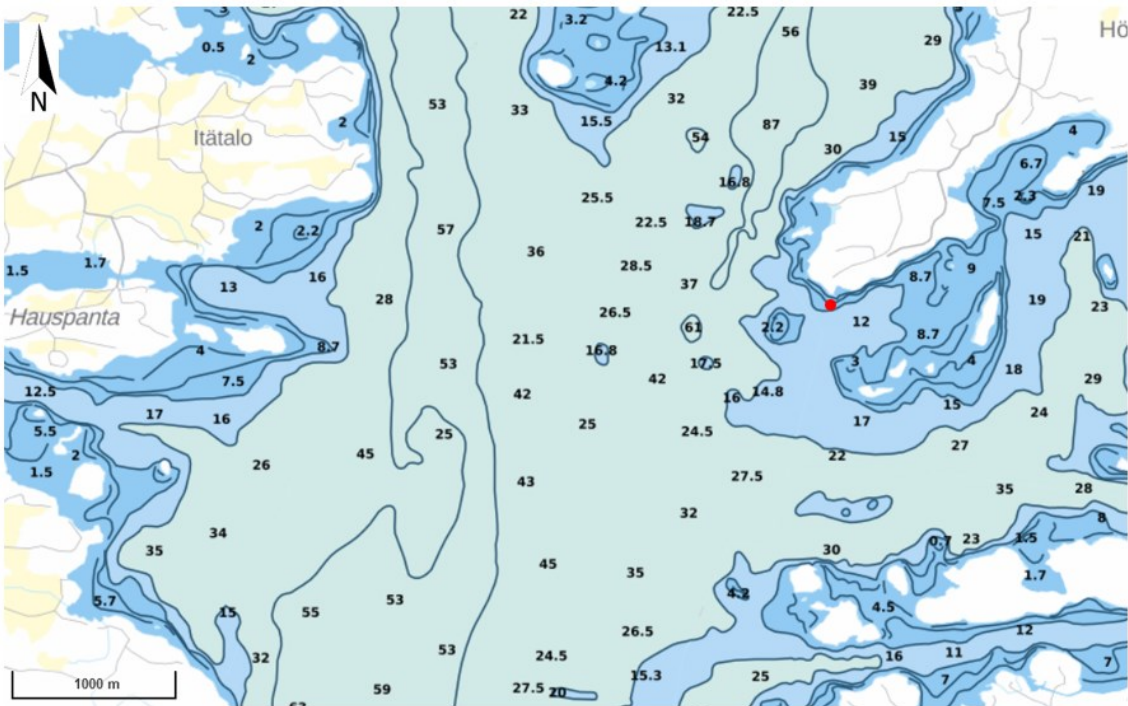
Mittauspaikan GPS-sijainti oli N 60°20,885' E 022°6,104' (WGS84). Hydrofonista Eerikvallanniemen rantaan etäisyyttä oli noin 90 m. Mittauspaikasta oli pääasiassa avointa

vettä erityisesti Naantalın meriväylän suuntaan, joka on merikarttaan merkitty 15,3 m syvä väylä (Kuva 5). Ääniaaltojen esteenä oli vain hydrofonista noin 350 m päässä lounaan suunnassa sijaitseva matalikko ja kivi, joka ulottui mittauspäivän vedenkorkeudella merenpinnan yläpuolelle. Lisäksi hydrofonista noin 450 m päässä luoteen suunnassa 5 m syvyydessä oli hylky. Mittauspaikka on merkitty kuvan 5 Traficomın merikarttasarjaan punaisella pisteellä.



Kuva 5. Mittauspaikka ja sitä lähellä olleet esteet (Maanmittauslaitos ei pvm.).

Mittausalueella veden syvyys oli matala, joten vedenpinnan ja pohjan heijastusvaikutukset vaikuttavat ääniaaltoihin mittauspaikalla merkittävästi. Mittausalueen veden syvyyssarvot käyvät ilmi kuvasta 6, jossa Maanmittauslaitoksen taustakartan päälle on otettu merikarttasarjan syvyysalueet, syvyyssäyrät ja syvyyssiteet. Kuvan 6 ylälaudassa näkyy Airiston syvin kohta: 87 m. Mittauspaikka on merkitty kuvaan punaisella pisteellä.



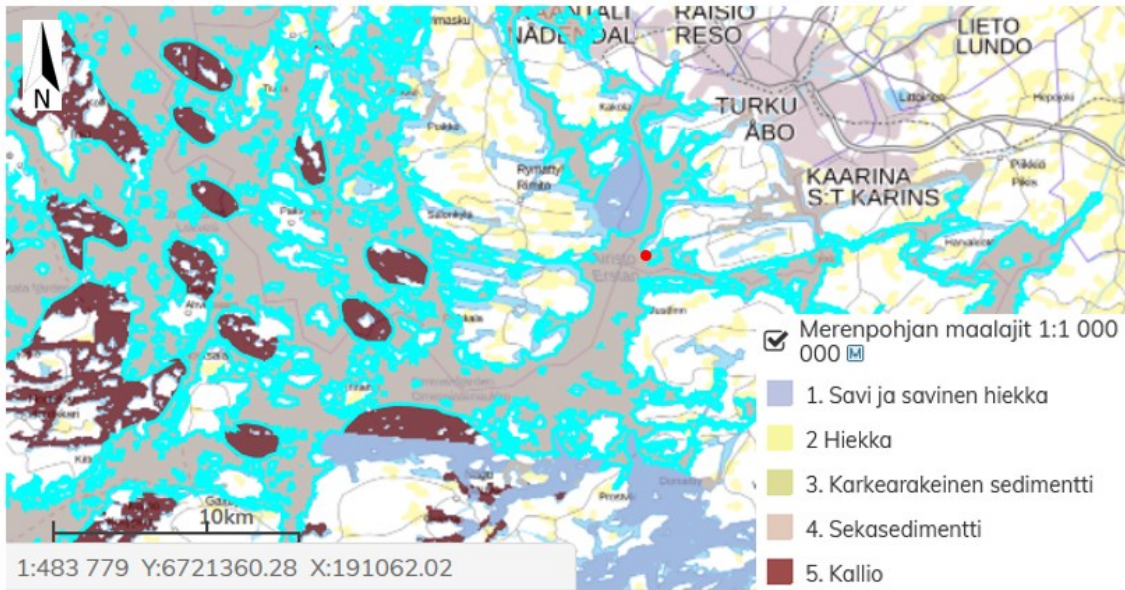
Kuva 6. Veden syvyys mittausalueella (Maanmittauslaitos ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.

Mittauspaikalla oli mutapohja, joka absorboi ääntä voimakkaasti. Mutapohja havaittiin empiirisesti pohjapainona käytetystä kivistä, kun hydrofonilaitteisto nostettiin merestä ylös. Merkittävää vesikasvustoa ei mittauspaikalla havaittu. GTK:n Maankamara-karttapalvelun tietojen perusteella mittausalueen merenpohja koostuu sekä pehmeistä että kovista alueista (Kuva 7). Pehmeisiin alueisiin luokitellaan maalajit liejusta hiekkaan ja koviin alueisiin sora, lohkareet ja kallio (GTK, 2015). Mittauspaikka on merkitty kuvaan 7 punaisella pisteellä. GTK:n merenpohjan tiedot eivät aivan ulotu mittauspaikkaan asti, koska se sijaitsi niin lähellä rantaa.



Kuva 7. Mittausalueen merenpohjan kovat ja pehmeät alueet (GTK ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.

GTK:n laajemmassa mittakaavassa tarjoama merenpohjan maalajien kartta kertoo, että mittausalue on pääasiassa sekasedimenttiä. Mittauspaikasta pohjoiseen on myös alue savea ja savista hiekkaa. (Kuva 8.) Aineisto kuvaa maalajeja merenpohjan pinnasta 30 cm syvyyteen asti (GTK 2016). Sekasedimentti sisältää soraa, hiekkaa ja mutaa sekalaisessa suhteessa (GTK 2014, s. 7). Mittauspaikka on merkitty kuvaan 8 punaisella pisteellä.



Kuva 8. Mittausalueen merenpohjan maalajit (GTK ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.

Mittauspäivän olosuhteet olivat otolliset erityisesti kohtalaisen kevyen tuulen ansiosta (Kuva 9). Kuva on otettu mittauspäivänä klo 10 länteen päin. Kuvan alalaidassa näkyvät hydrofonin pintakohot ja edempänä erottuu kivi, joka sijaitti mittauspaikan ja Naantalin meriväylän välissä.



Kuva 9. Mittauspäivän otolliset olosuhteet.

Mittauspäivänä tuulen nopeus vaihteli 4–6 m/s puhaltaen luoteen ja lännen väliltä. Aallonkorkeus vaihteli 0,1–0,2 m välillä. Päivä oli kirkas, kevyttä yläpilveä oli havaittavissa ja ilman lämpötila vaihteli 3–5 °C välillä. Sää tiedot otettiin Windfinder-sovelluksesta Turun Rajakarin sääasemalta, joka sijaitsee mittauspaikasta noin 3 km pohjoiseen. SoundTrap-hydrofonilaitteisto tallentaa veden lämpötilan, ja se oli 5 °C mittauspaikalla. Veden suolapitoisuus alueella oli 6,1 ‰ mitattuna 10.5.2022 Seilin mittauspisteellä, joka sijaitsee noin 13 km lounaaseen mittauspaikasta aivan Naantalin meriväylän vieressä (Itämeri.fi ei pvm.). Äänen nopeusprofiilia ei määritetty, koska siihen ei ollut laitteita. Äänen nopeusprofiilia ei voitu myöskään laskea, koska veden lämpötilasta ja suolapitoisuudesta ei ollut tietoja syvyyden funktiona. Mittausalueella veden syvyys oli kuitenkin niin matala, ettei merkittävää vaihtelua äänen nopeudessa ole oletettavissa (Robinson ym. 2014, s. 70).

4.3 Meriliikenteen seuranta

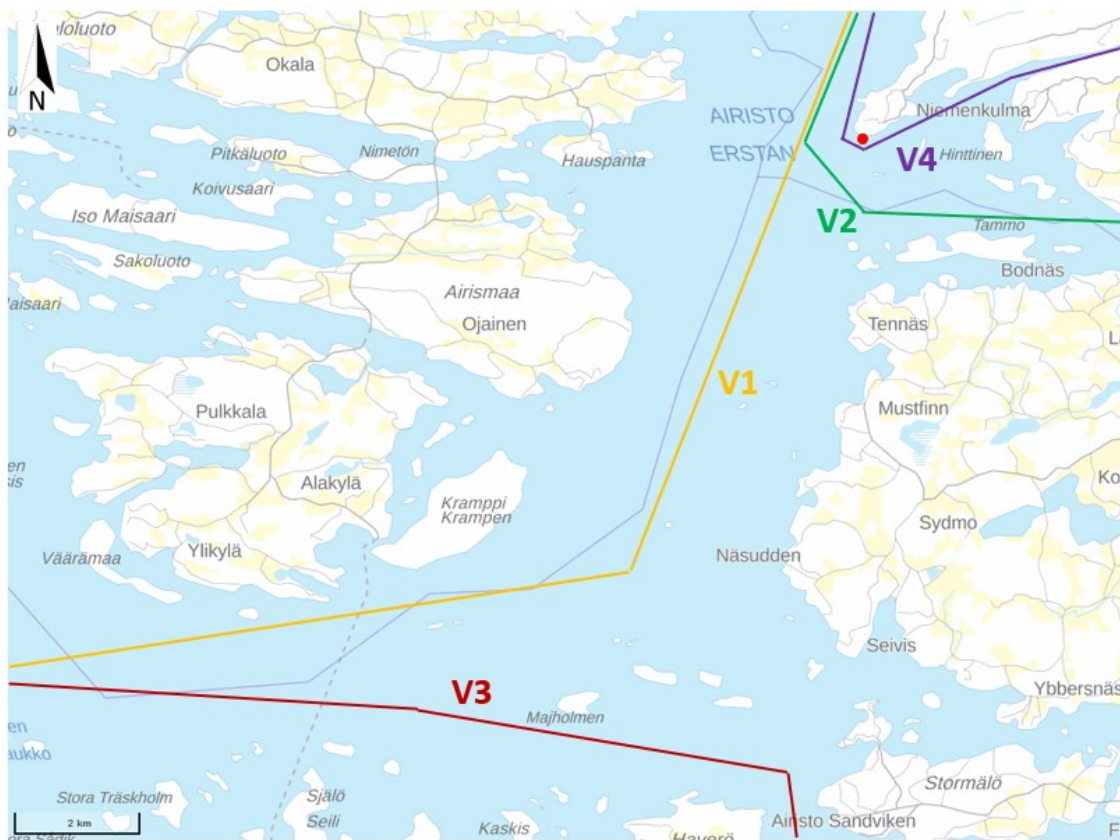
Meriliikenteen seuranta suoritettiin Eerikvallanniemen kärjessä sijaitsevan Airisniemen kartanon aallonmurtajalta. Tarkkailupaikka on merkitty kuvan 10 Maanmittauslaitoksen taustakarttaan vihreällä pisteellä. Tarkkailupaikalta etäisyyttä hydrofoniin oli noin 90 m. Hydrofonin sijainti on merkitty kuvaan 10 punaisella pisteellä. Tarkkailupaikalta oli pitkälle ulottuva vapaa näköyhteys kaikista muista suunnista tuleville aluksille, paitsi pohjoisesta Turun ja Naantalin satamien suunnalta tuleville aluksille. Ne tulivat näkyviin vasta ollessaan lähempänä tarkkailupistettä.



Kuva 10. Tarkkailupaikan sijainti on merkitty vihreällä ja hydrofonin sijainti punaisella pisteellä (Maanmittauslaitos ei pvm.).

Tarkkailupaikalta näkyvissä oleva alue jaettiin seurannassa neljään eri väylään, joita alukset käyttivät. Ensimmäinen väylä V1 kulki väliä Turku–Ahvenanmaa, eli reitti ulottui mittaustaikana pohjoispuolelta Naantalin meriväylää ulos. Lähimmillään reitti kulki noin 600 m päässä hydrofonista. Toinen väylä V2 sijoittui välille Turku–Parainen, eli kaarsi

pohjoisesta mittauspaikan eteläpuolitse Paraisten suuntaan. Lähimmillään tämäkin reitti kulki noin 600 m päässä hydrofonista. Kolmas väylä V3 nimettiin välille Ahvenanmaa–Parainen, eli se kulki Naantalin väylän ulko-osista suoraan Paraisille päin. Lähimmillään reitti oli 10 km päässä mittauspaikasta. Neljäs reitti ei ollut varsinainen väylä, vaan se kulki aivan mittauspaikan vierestä Eerikvallanniemen ohitse. Nämä veneet menivät vain parin kymmenen metrin päästä hydrofonista. Kuvan 11 Maanmittauslaitoksen taustakarttaan on piirretty nämä reitit eri väreillä ja hydrofonin sijainti on merkitty punaisella pisteellä.



Kuva 11. Meriliikenteen seurannassa käytetyt väylät (Maanmittauslaitos ei pvm.). Mittauspaikka on merkitty punaisella pisteellä.

Mittauspäivänä näkyvyys oli hyvä, ja meriliikenteen tarkkailussa apuna käytettiin kiikareita. Niistä aluksista, jotka käyttivät AIS-järjestelmää, saatiin tarkat tiedot MarineTraffic-sovelluksesta. AIS (Automatic Identification System) on isoille aluksille ja kaikille matkustaja-aluksille pakollinen tunnistusjärjestelmä, josta selviää aluksen tunnistetietojen

lisäksi muun muassa nopeus, sijainti ja suunta (IMO 2019). Myös monilla huviveneillä oli vapaaehtoinen AIS-järjestelmä käytössä. Ohi ajaneet alukset jaoteltiin niiden tyypin, etäisyyden ja nopeuden mukaan. Alusten tyyppi arvioitiin silmämääräisesti tai AIS-järjestelmän avulla. Purjein liikkuneet purjeveneet jätettiin huomiotta, koska niiden aiheuttama ääni oletettiin mitättömäksi. Etäisyyksiä kuvattiin aluksen käyttämän väylän avulla. Alusten nopeustiedot otettiin MarineTraffic-sovelluksesta, jos aluksella oli AIS-järjestelmä. Muutoin aluksen nopeus arvioitiin. Nopeuden arvioinnissa suurena apuna oli AIS-järjestelmää käyttävien alusten tarkat nopeustiedot. Alusten jaottelu käy ilmi taulukosta 2.

Taulukko 2. Alusten jaottelu meriliikenteen seurannassa.

Väylät	
V1	Turku–Ahvenanmaa
V2	Turku–Parainen
V3	Ahvenanmaa–Parainen
V4	Eerikvallanniemen ohi mittauspaikan vierestä
Alustyyppit	
T1	Ruotsin-laiva tai iso rahtilaiva
T2	iso työvene, esim. SAR-vene
T3	iso huvivene
T4	pieni huvi- tai työvene
Nopeus	
H	hidas, <8 kn
K	keskinopea, 8–20 kn
N	nopea, >20 kn

Jaottelun perusteella jokaiselle alukselle annettiin koodi, jota käytettiin tulosten raportoinnissa. Esimerkiksi Turku–Ahvenanmaa-reittiä kulkenut Ruotsin-laiva, jonka nopeus osui jaottelun keskinopeaan väliin, sai koodin V1T1K.

4.4 Mittausaineiston käsittely

SoundTrap-hydrofonilaitteiston tallentaman datan analysoinnin teki tutkimusinsinööri Reijo Alakoivu Turun ammattikorkeakoulun Rakennetun ympäristön tutkimusryhmästä. Datan analysointitapa on kuvailtu alla olevassa Alakoivulta saadussa selostuksessa.

Mittausdataa saatiin hydrofonilta WAV-tiedostomuodossa. WAV-tiedostoissa oli yksi audiokanava (mono), näytteenottotaajuus oli 48 kHz ja bittisyvyys oli 16 bittiä. Yhden WAV-tiedoston pituus oli yksi tunti.

Mittausaineistosta analysoitiin yhden minuutin keskiarvona lineaarinen kokonaisäänitaso $L_{Zeq,1min}$ sekä jokaisen minuutin minimi L_{ZFmin} ja maksimi L_{ZFmax} äänenpainetasot Fast-aikapainotuksella. Lisäksi analysoitiin äänenpainetasot $\frac{1}{3}$ -oktaavikaistoittain $L_{Zeq,1min,oct}$ taajuusalueella 1–20 000 Hz. Laskennassa käytettiin referenssipaineena 1 μ Pa, koska mittaus tapahtui vedessä.

Ennen äänitasojen laskentaa määritettiin kalibrointikerroin, jonka avulla saatiin äänitasot oikealle tasolle. Kalibrointikerroin muodostui SoundTrap ST500 -tallentimen ja siihen kiinnitetyn hydrofonin kalibrointi-arvoista. Sekä tallennin että hydrofoni oli tehdaskalibroitu ja kalibrointitodistukset olivat saatavilla valmistajan verkkosivuilta (Liite 1).

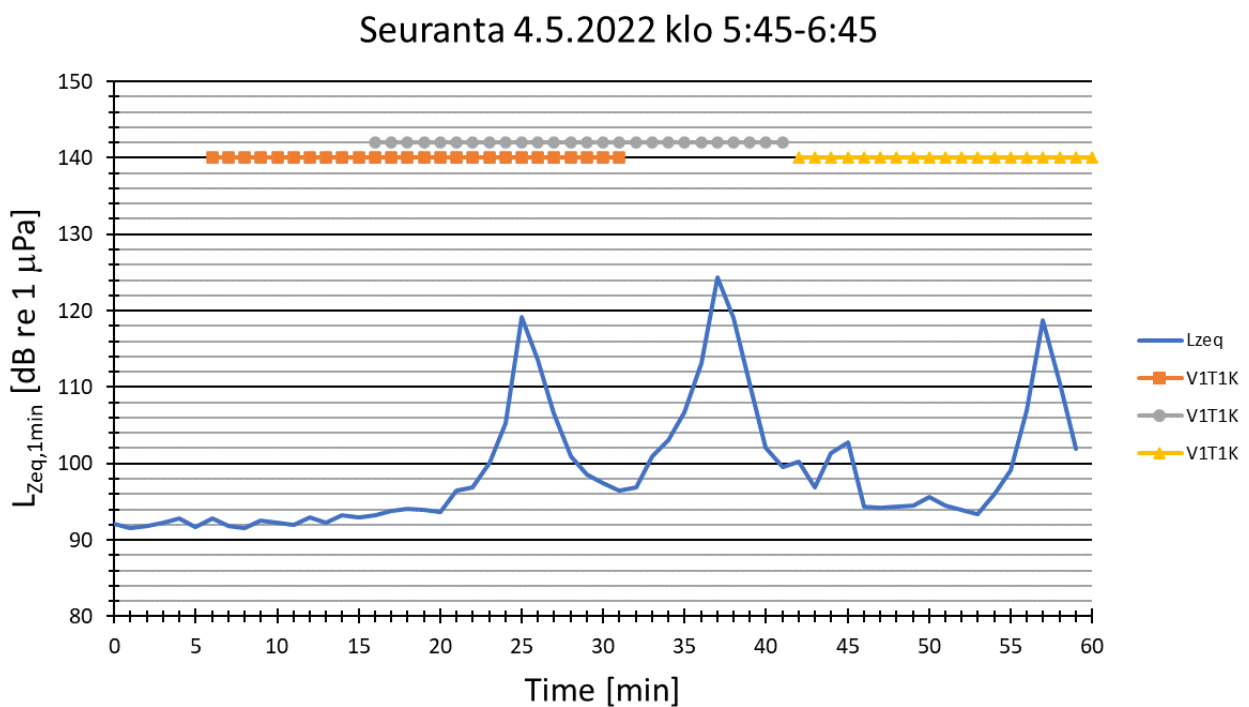
Äänitasojen laskenta suoritettiin MATLAB R2021a -ohjelmalla. Laskennassa hyödynnettiin MATLAB DSP System Toolbox- ja Audio Toolbox -kirjastoja. Lopputuloksena syntyi jokaisesta WAV-tiedostosta Excel-raportti, jossa oli analysoidut äänitasot minuutin keskiarvoina.

Analysoidut äänitasot $L_{Zeq,1min}$ yhdistettiin meriliikenteen seurannan tietoihin ja niistä laadittiin tunnin mittaisia kuvaajia yhteensä 14 kappaletta. Lisäksi $\frac{1}{3}$ -oktaavikaistoittain analysoiduista äänenpainetasoista $L_{Zeq,1min,oct}$ laadittiin taajuusspektrikuvaaja, johon valittiin mielenkiintoisimpia ja mahdollisimman erilaisia ohi ajaneita aluksia.

4.5 Mittaustulokset

Mittauspäivänä meriliikennettä oli melko runsaasti, joten seurantatietoja saatiin paljon. Ensimmäisen tunnin tuloksiksi saatiin kuvion 1 mukainen tilanne, jossa hydrofonin ohittaa ensin Silja Galaxy, sitten Finnswan ja viimeisenä Viking Glory. Ohi ajaneet alukset on merkitty kuvaajiin vaakaviivoin siltä ajalta, kun ne näkyivät tarkkailupisteeseen. Kuvion 1 alukset tulevat Naantalın meriväylää sisään, ja siksi ne näkyivät tarkkailupisteeseen jo ennen kuin niiden aiheuttama ääni ylitti meren taustaäänitason. Näköyhteys avomereltä

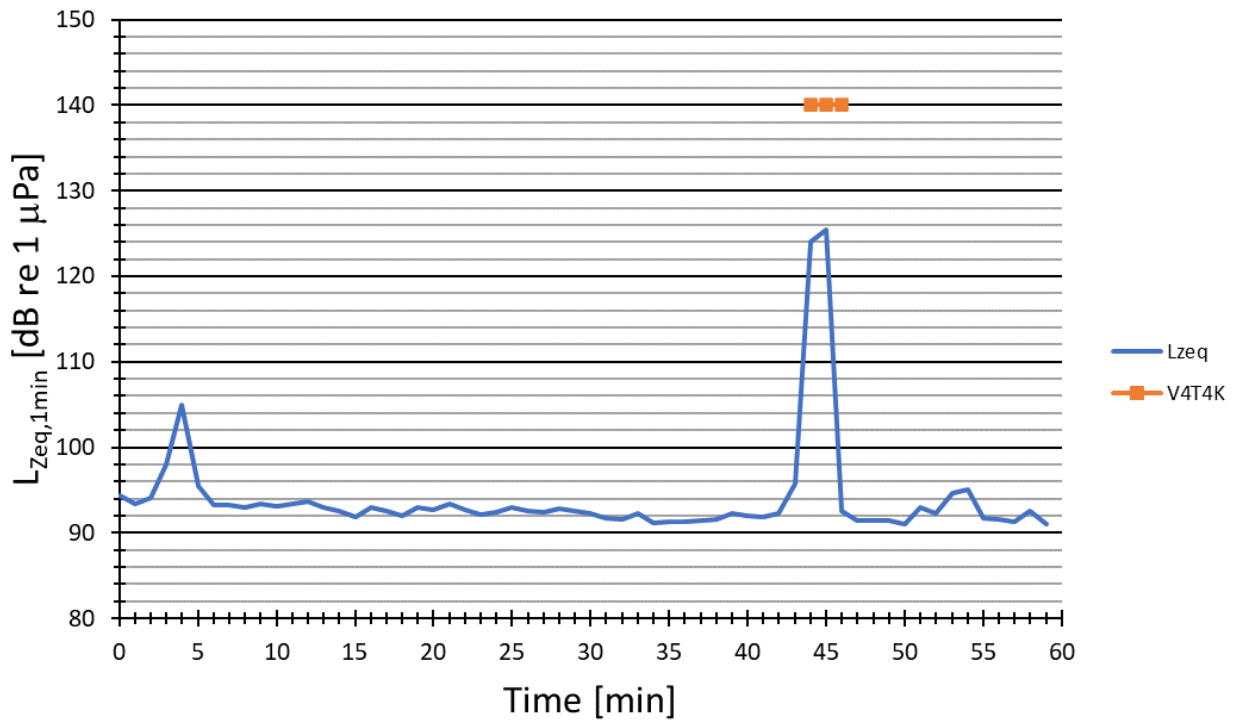
tuleviin aluksiin alkoi yli 10 km päästä, ja vasta alle 5 km etäisyydellä äänenpainetasoissa tapahtuu havaittavaa nousua. Kuviossa 1 huomataan, että alukset aiheuttivat hyvin teräväpiirteisen piikin äänenpainetasossa ollessaan lähimpänä hydrofonia. Kuviossa 1 ohi ajaneiden alusten aiheuttamien äänenpainetasojen nousun lisäksi 32 ja 43 minuutin kohdalla näkyvät pienet äänenpainetasojen nousut johtuivat Silja Galaxy:n ja Finnswanin aaltojen osumisesta hydrofoniin. Pintakohon käyttö hydrofonilaitteiston kiinnityssysteemissä vaikutti varmasti näihin äänenpainetasoihin.



Kuvio 1. Ensimmäisen tunnin tulokset.

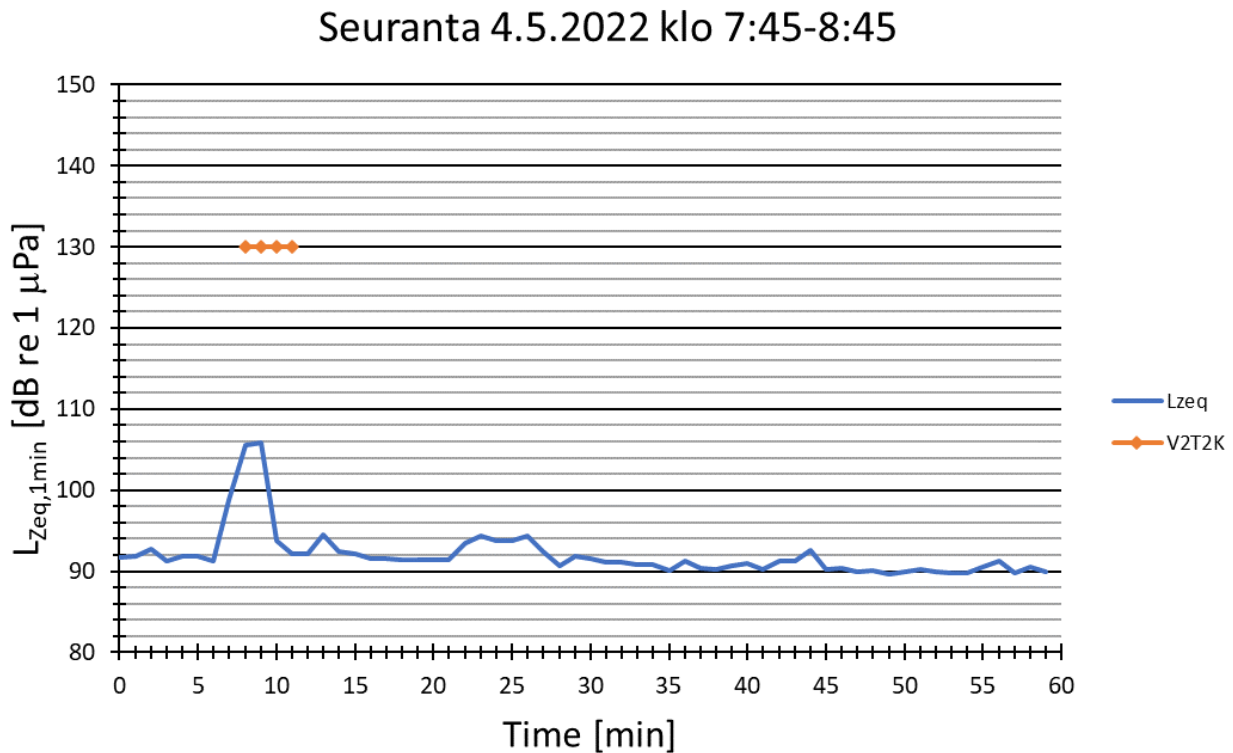
Toinen ja kolmas seurantatunti olivat hiljaisimpia meriliikenteen osalta. Toisen tunnin tulokset näkyvät kuviossa 2. Siinä 4 minuutin kohdalla hydrofoniin osui Viking Glory:n aallot ja 44 minuutin kohdalla aivan hydrofonin vierestä ajoi keskinopea moottorivene, joka nosti äänenpainetasoja huomattavasti. 53 minuutin kohdalla äänenpainetaso nousi hieman, mutta seurannassa ei ole siitä mitään merkintää. Syynä voi olla esimerkiksi tuulen puuska.

Seuranta 4.5.2022 klo 6:45-7:45



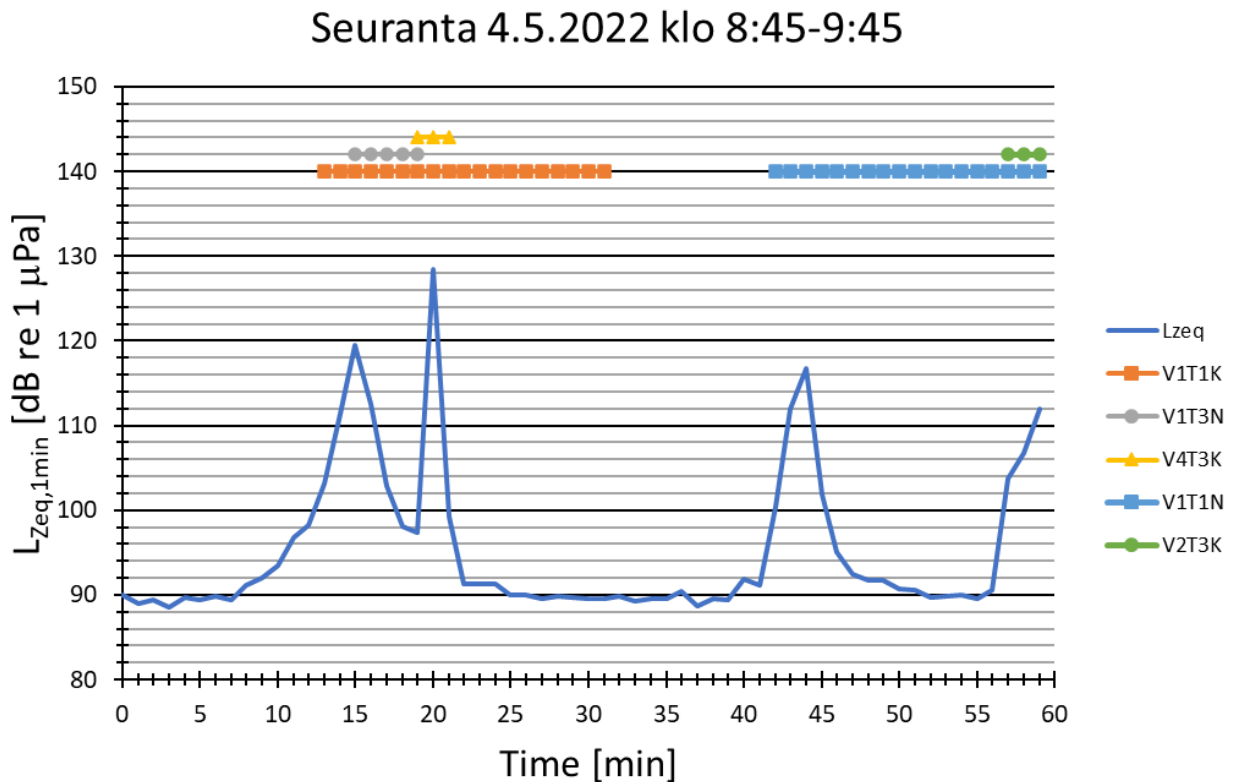
Kuvio 2. Toisen tunnin tulokset.

Myös kolmannen seurantatunnin aikana ohi ajoi vain yksi isompi työvene, joka lähestyi mittauspaikkaa pohjoisesta ja ohitti sen väylän V2 kauempaa reunaa pitkin. Sen aallot osuivat hydrofoniin 13 minuutin kohdalla. 22–27 minuutin kohdalla nähdään pieni nousu äänenpainetasoissa mahdollisesti tuulen puuskan aiheuttamana. Sen jälkeen taustäänitaso lähti hieman laskemaan. (Kuvio 3.)



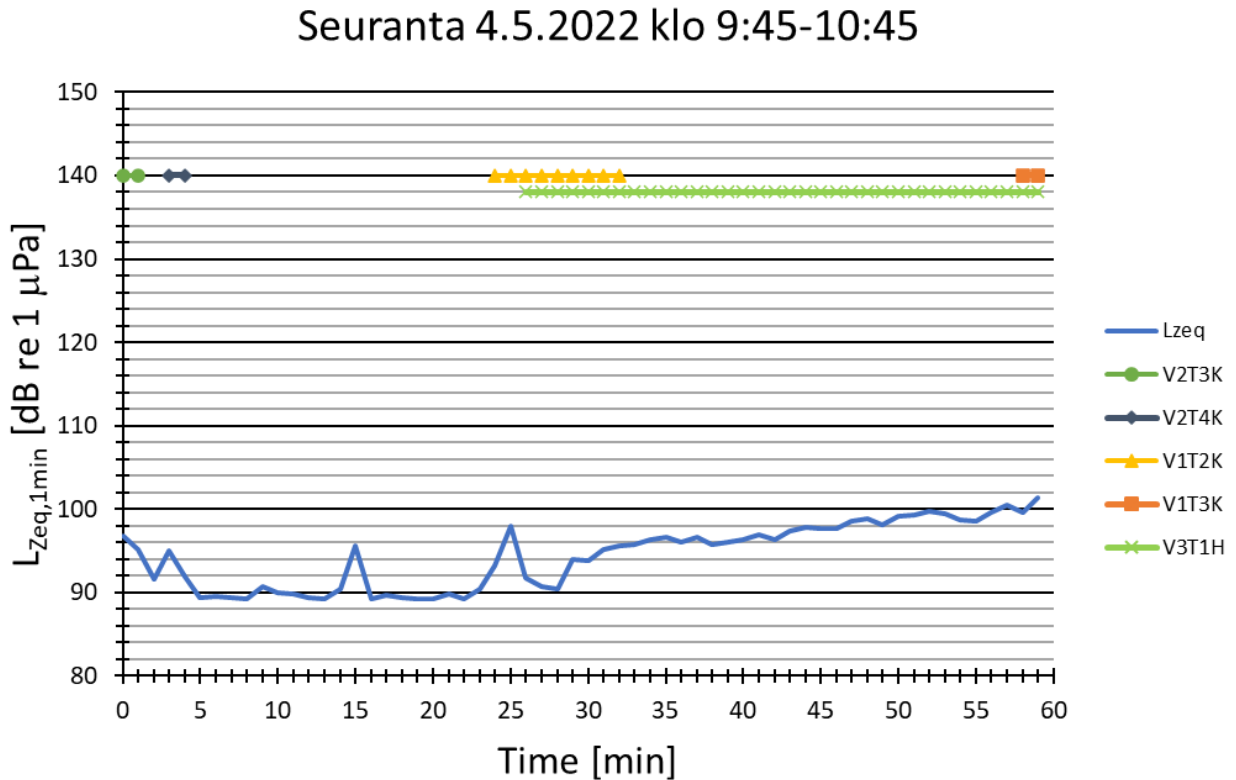
Kuvio 3. Kolmannen tunnin tulokset.

Neljännän tunnin aikana havaittiin koko mittausjakson minimi ja maksimi äänenpainetasoissa. Hiljaisin hetki 88,6 dB re 1 µPa on 3 minuutin kohdalla. Sitä edelsi 54 minuutin jakso, jolloin meriliikennettä ei ollut havaittavissa. Suurin mitattu äänenpainetaso oli 128,5 dB re 1 µPa. Se aiheutui 20 minuutin kohdalla hydrofonin vierestä ajaneesta keskinopeasta isosta huviveneestä. Neljännän tunnin aikana Silja Galaxy (koodi V1T1K) ja Viking Glory (koodi V1T1N) ajoivat uudestaan mittauspaikan ohi käytyään Turun satamassa. Koska ne lähestyivät mittauspaikkaa pohjoisesta, johon tarkkailupaikalta oli näkemäeste, on hydrofoni havainnut nämä alukset ennen kuin ne on nähty. Tähän suuntaan Silja Galaxy ja Viking Glory ajoivat väylän V1 hydrofonin sijaintiin nähden kauempaa reunaan, eli ne olivat jopa 500 m kauempana kuin väylää sisään ajaessaan. Tästä huolimatta äänenpainetasoissa ei ole merkittävää eroa verrattuna kuvioon 1. Silja Galaxyn aallot saavuttivat hydrofonin 23 minuutin kohdalla ja Viking Gloryn aallot 56 minuutin kohdalla – tosin ne jäivät jo seuraavan pohjoisesta lähestyneen aluksen äänen peittoon. (Kuvio 4.)



Kuvio 4. Neljännen tunnin tulokset.

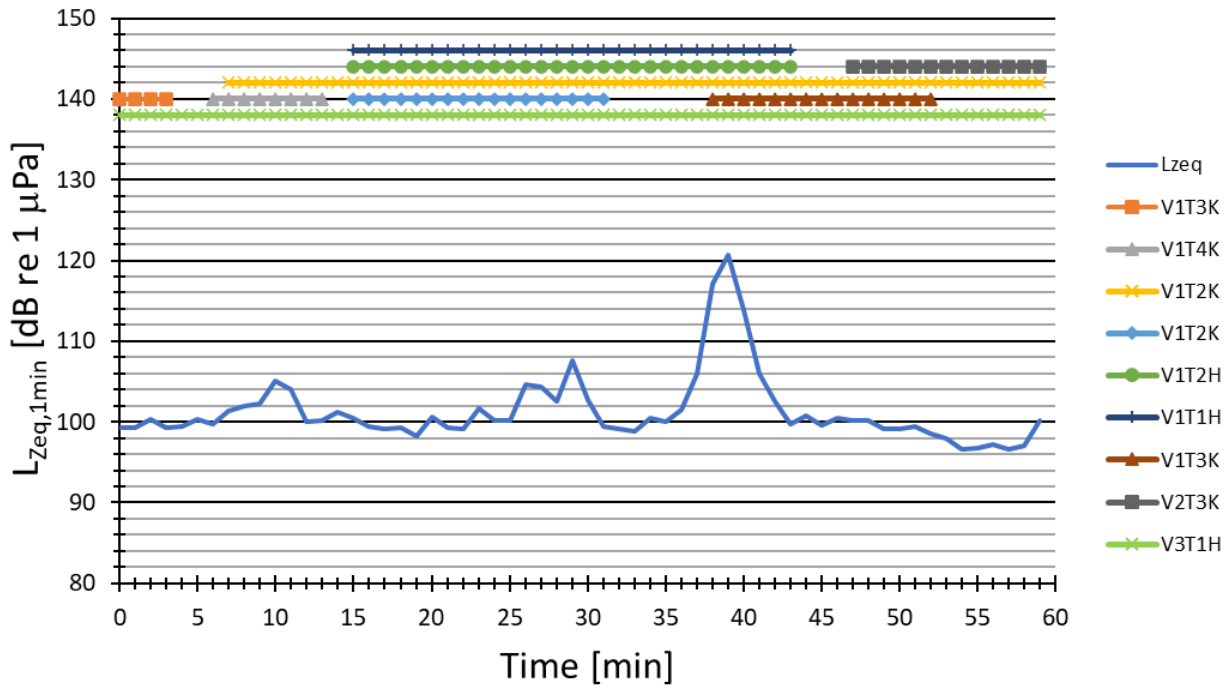
Viidennen tunnin aikana äänenpainetasot jäivät edellisiä matalammiksi. Mittausalueella havaittiin muutama kauempaa ohi ajanut alus, joiden lisäksi Naantalin väylää hitaasti sisään tuli sementinkuljetusalus Furuvik (koodi V3T1H), joka jäi loppupäiväksi mittausalueen eteläosaan Haverön pohjoispuolelle tyhjäkäynnille. Se aiheutti loppupäiväksi taustääänitason kontaminoitumisen ja nosti sen noin 100 dB re 1 μ Pa tienoille. Toisin kuin edellä mainittujen alusten kantautui Furuvikin ääni vedessä siis noin 10 km päästä. Ilmavälitteisesti sitä ei kuullut. 15 minuutin kohdalla nähdään pieni nousu äänenpainetasoissa ehkä tuulen puuskan aiheuttamana. On myös mahdollista, että joku kauempaa ajanut alus on jäänyt huomaamatta. (Kuvio 5.)



Kuvio 5. Viidennen tunnin tulokset.

Kuudes tunti oli vilkkaasti liikennöity. Furuvin (koodi V3T1H) luoman äänenpainetason pystyi havaittavasti ylittämään vain 3 alusta. Ensimmäinen näistä oli 10 minuutin kohdalla väylän V1 kauempaa reunaa kulkenut keskinopea pieni huvivene (koodi V1T4K). Toinen oli 29 minuutin kohdalla myös väylän V1 kauempaa reunaa pohjoiseen kulkenut Arctian väylänhoitoalus MT 5300 (koodi V1T2K sinisellä viivalla). Kolmantena edellisiä huomattavasti korkeamman äänenpainetason 121 dB re 1 μ Pa aiheutti 39 minuutin kohdalla Naantalın meriväylää sisään tullut hinaaja Varma (koodi V1T2H), jolla oli hinauksessa iso alus (koodi V1T1H). (Kuvio 6.)

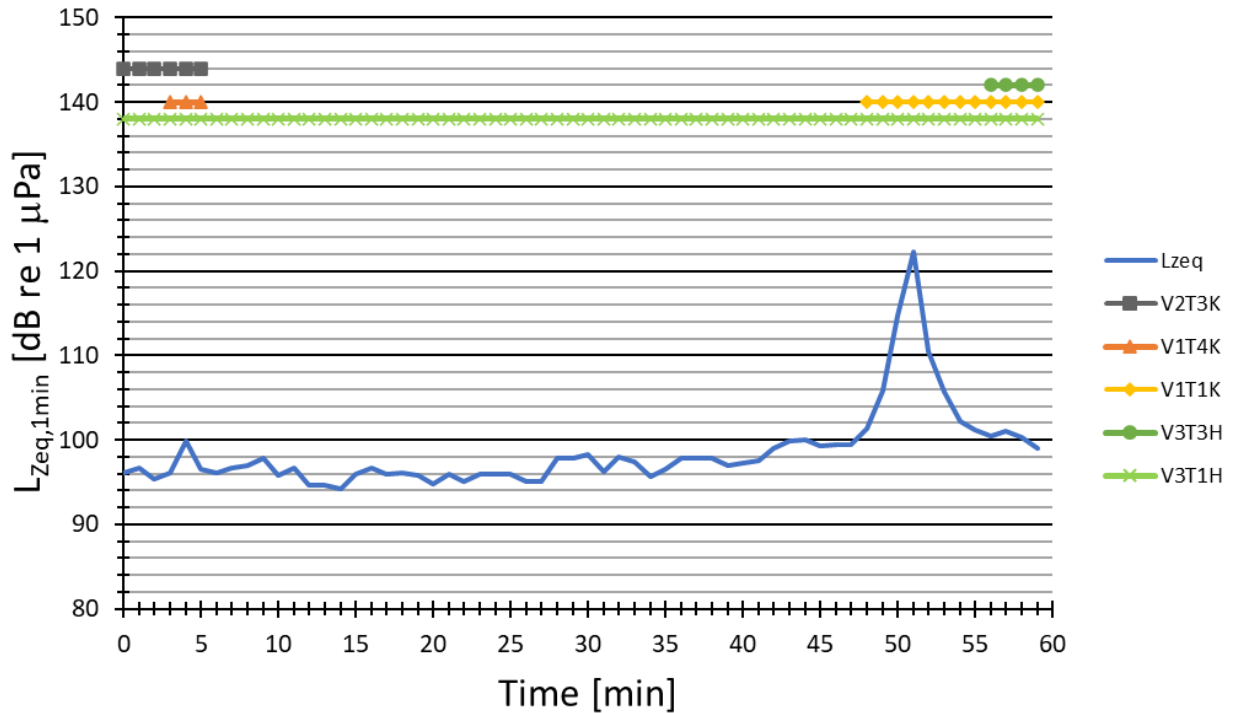
Seuranta 4.5.2022 klo 10:45-11:45



Kuvio 6. Kuudennen tunnin tulokset.

Seitsemännen tunnin aikana Furuvikin (koodi V3T1H) luoma äänenpainetaso laski noin 97 dB re 1 µPa tasolle, jolloin väylän V1 kauempaa reunaa 4 minuutin kohdalla ohi ajaneen pienen huviveneen (koodi V1T4K) pystyi juuri erottamaan taustaäänitasosta. 51 minuutin kohdalla äänenpainetason nousun 122 dB re 1 µPa asti aiheutti pohjoisesta saapuva Finnswan (koodi V1T1K). Sen aallot osuivat hydrofoniin 57 minuutin kohdalla. (Kuvio 7.)

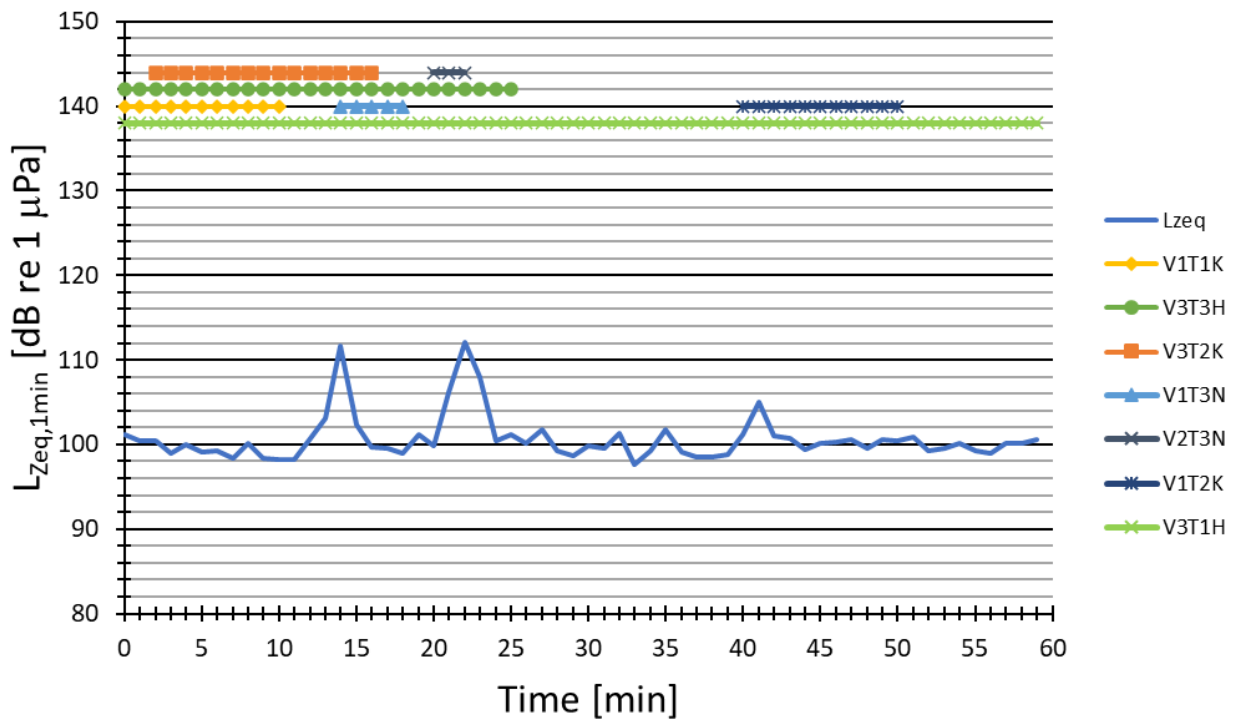
Seuranta 4.5.2022 klo 11:45-12:45



Kuvio 7. Seitsemännenten tunnin tulokset.

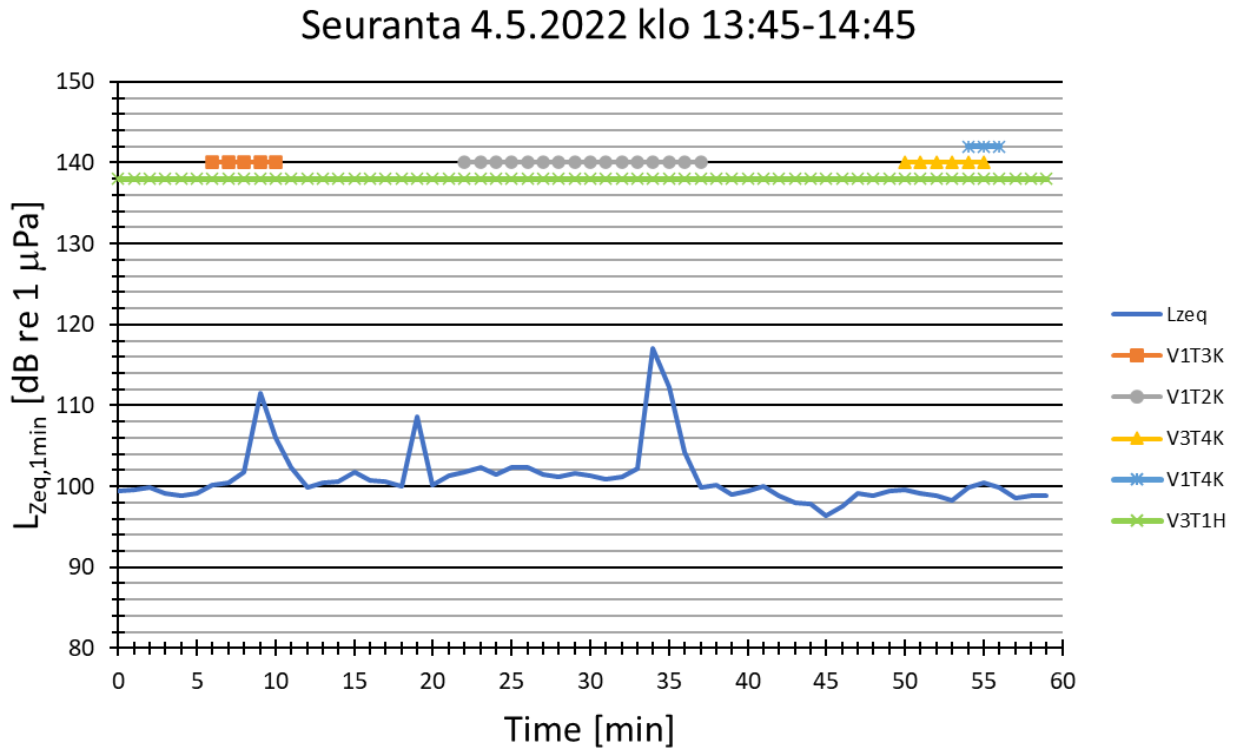
Kahdeksannen tunnin aikana Furuvikin (koodi V3T1H) aiheuttama äänenpainetaso nousi taas noin 100 dB re 1 μ Pa tienoille, ja siitä erottui 3 alusta. Ensimmäinen oli nopea iso huvivene, joka kulki 14 minuutin kohdalla väylän V1 kauempaa reunaa (koodi V1T3N), ja toinen oli nopea iso huvivene, joka kulki 22 minuutin kohdalla väylän V2 lähempää reunaa (koodi V2T3N). Näillä molemmilla oli kovaääninen moottori, jonka ääni kantautui tarkkailupisteelle selvästi myös ilmateitse. Kolmas taustäänestä erottuva alus oli 41 minuutin kohdalla väylän V1 kauempaa reunaa etelään kulkenut Arctian väylänhoitoalus MT 5300 (koodi V1T2K). (Kuvio 8.)

Seuranta 4.5.2022 klo 12:45-13:45



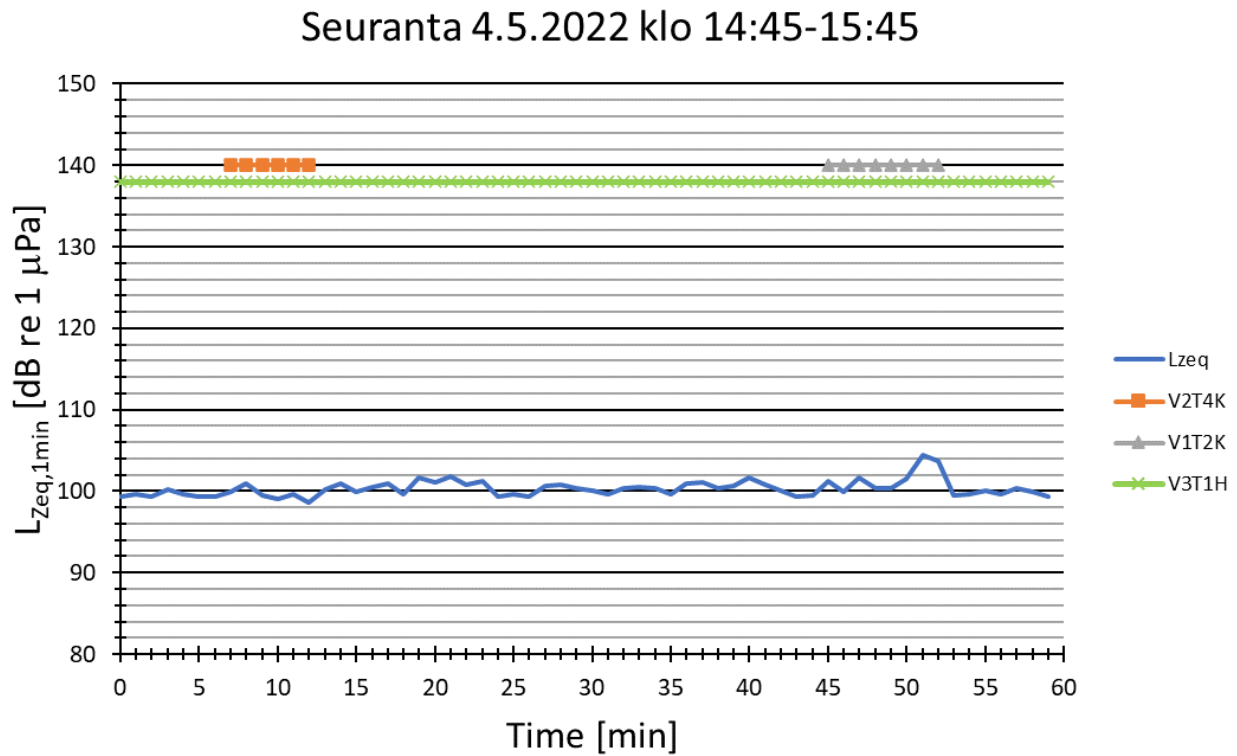
Kuvio 8. Kahdeksannen tunnin tulokset.

Yhdeksännen tunnin tuloksista erottui kaksi alusta Furuvin (koodi V3T1H) äänen yli. Ensimmäinen näistä oli 9 minuutin kohdalla väylän V1 kauempaa reunaa ajanut keskinopea huvivene (koodi V1T3K). Toinen oli 34 minuutin kohdalla Merivoimien kuljetusalus Vänö, joka kulki väylää V1 pohjoiseen (koodi V1T2K). Myös 19 minuutin kohdalla havaitaan äänenpainetasojen piikki, mutta meriliikenteen seurannassa ei ole siitä mitään merkintää. (Kuvio 9.)



Kuvio 9. Yhdeksännen tunnin tulokset.

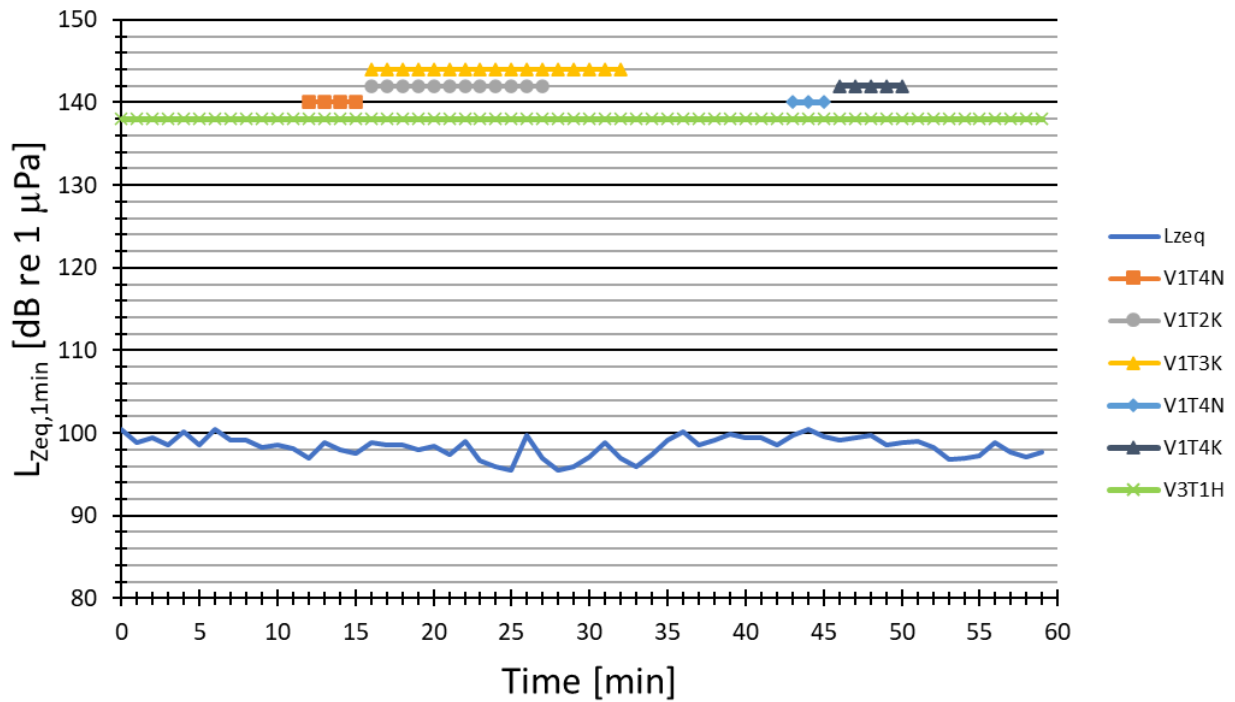
Kymmenennen tunnin seurannassa ei Furuvikin (koodi V3T1H) lisäksi näkynyt kuin kaksi alusta, joista vain toisen voi erottaa taustäänitasosta 51 minuutin kohdalla. Se oli väylän V1 kauempaa laitaa pohjoiseen ajanut iso työvene (koodi V1T2K). (Kuvio 10.)



Kuvio 10. Kymmenennen tunnin tulokset.

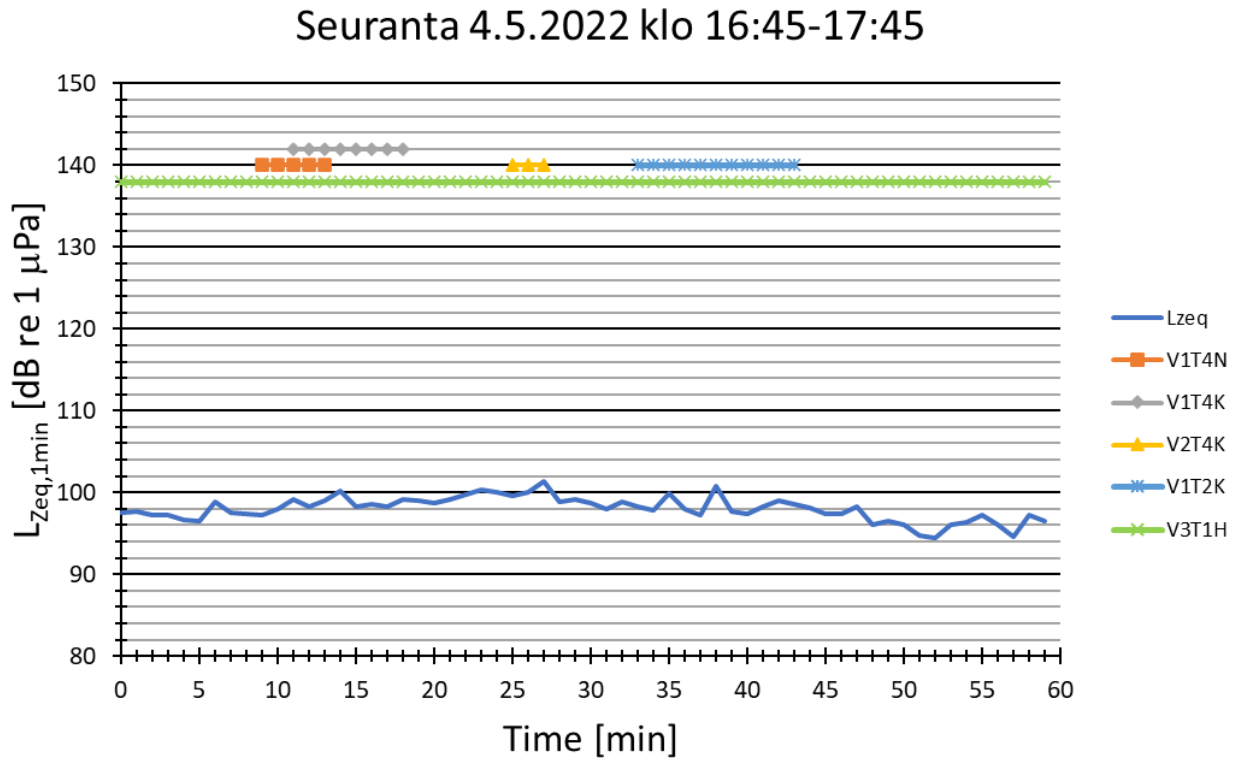
11. seurantatunnin äänenpainetasot ovat kauttaaltaan kontaminoituneet Furuvin (koodi V3T1H) luomasta äänestä, eikä tuloksista pysty erottamaan yhtäkään ohi ajanutta alusta. Yksikään näistä aluksista ei tosin mennyt kovin läheltä hydrofonia. (Kuvio 11.)

Seuranta 4.5.2022 klo 15:45-16:45



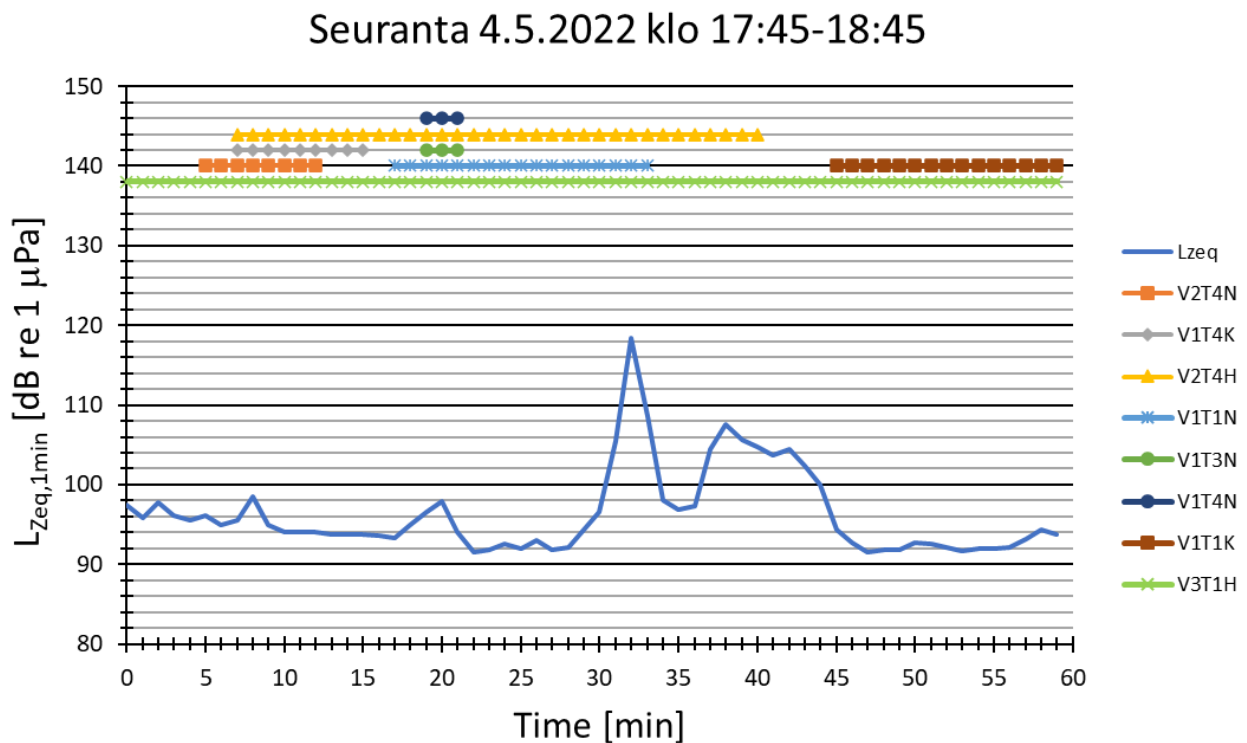
Kuvio 11. Tulokset 11. tunnilta.

12. seurantatunnin tilanne on sama kuin edellisen, eli tuloksista ei pystytä erottamaan yhtäkään ohi ajanutta alusta Furuvikin (koodi V3T1H) takia. Näistäkään ohi ajaneista aluksista yksikään ei tosin mennyt kovin läheltä hydrofonia. (Kuvio 12.)



Kuvio 12. Tulokset 12. tunnilta.

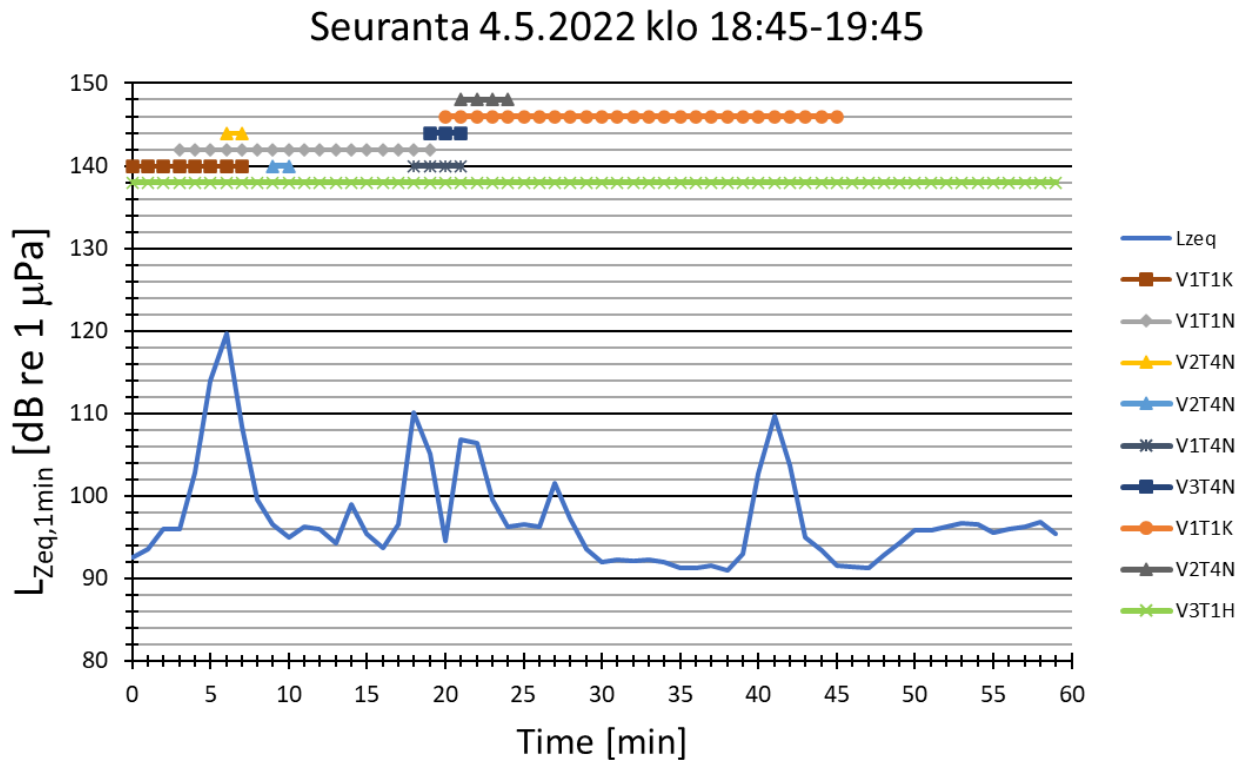
13. seurantatunnin aikana taustaäänepainetaso lähti laskemaan asettuen noin 92 dB re 1 μ Pa tasolle, vaikka Furuvik (koodi V3T1H) oli edelleen samoissa asemissa. Tarkkaa syytä tähän ei tiedetä, mutta on mahdollista, että Furuvik on esimerkiksi laskenut ankkurit ja sammuttanut moottorit. Niinpä ohi ajaneet alukset erottuivat paremmin. 8 minuutin kohdalla havaittiin nopea väylän 2 kauempaa reunaa ajanut pieni huvivene (koodi V2T4N). 20 minuutin kohdalla hydrofonin ohi väylän V1 kauempaa reunaa ajoi kaksi nopea alusta (koodit V1T3N ja V1T4N), joiden yhteisvaikutus on havaittavissa äänenpainetasoissa. Tämän seurantatunnin korkeimman äänenpainetason 118 dB re 1 μ Pa aiheutti Baltic Princess (koodi V1T1N), joka tuli yli 20 solmua Naantalin meriväylää sisään. Sen aallot osuivat hydrofoniin 37 minuutin kohdalla. Kuitenkaan 37–45 minuutin kohdalla olevan kohonneen äänenpainetason aiheuttajasta ei ole varmuutta, koska ohi ajaneen aluksen aaltojen vaikutus kestää tyypillisesti vain 3–4 minuuttia (Kuvio 1 ja 2). Syynä voi olla moottorilla liikkunut pienehkö purjeverene, joka tuli väylää 2 pohjoiseen päin, vaikka se etenikin hyvin hitaasti (koodi V2T4H). (Kuvio 13.)



Kuvio 13. Tulokset 13. tunnilta.

Viimeisen eli 14. seurantatunnin aikana Furuvik (V3T1H) oli edelleen taustalla, mutta edellisen tunnin tapaan se ei nostanut taustäänentasa enää 100 dB re 1 μ Pa tasolle. Seurantatunnin korkeimman äänenpainetason 120 dB re 1 μ Pa aiheutti 6 minuutin kohdalla Naantalin meriväylää sisään seilannut Europalink (koodi V1T1K ruskealla viivalla), jonka aallot osuivat hydrofoniin 14 minuutin kohdalla. Seuraavaksi korkeimmat äänenpainetasot noin 110 dB 1 μ Pa aiheuttivat väylää V1 pohjoiseen ajaneet Viking Grace (koodi V1T1N) 18 minuutin kohdalla ja Fjärdvägen (koodi V1T1K oranssilla viivalla) 41 minuutin kohdalla. Niiden molempien aiheuttama äänenpainetaso jäi kuitenkin yllättävän matalaksi verrattuna muihin T1-tyyppin aluksiin, jotka seurannan aikana ohittivat mittauspisteeseen. Lisäksi tuloksista on havaittavissa 22 minuutin kohdalla väylää 2 pohjoisen päin ajanut nopea pieni huvivene (koodi V2T4N) sekä 27 minuutin kohdalla Viking Gracen aallot. Fjärdvägenin aallot osuivat hydrofoniin 50 minuutin kohdalla, mutta 50–59 minuutin

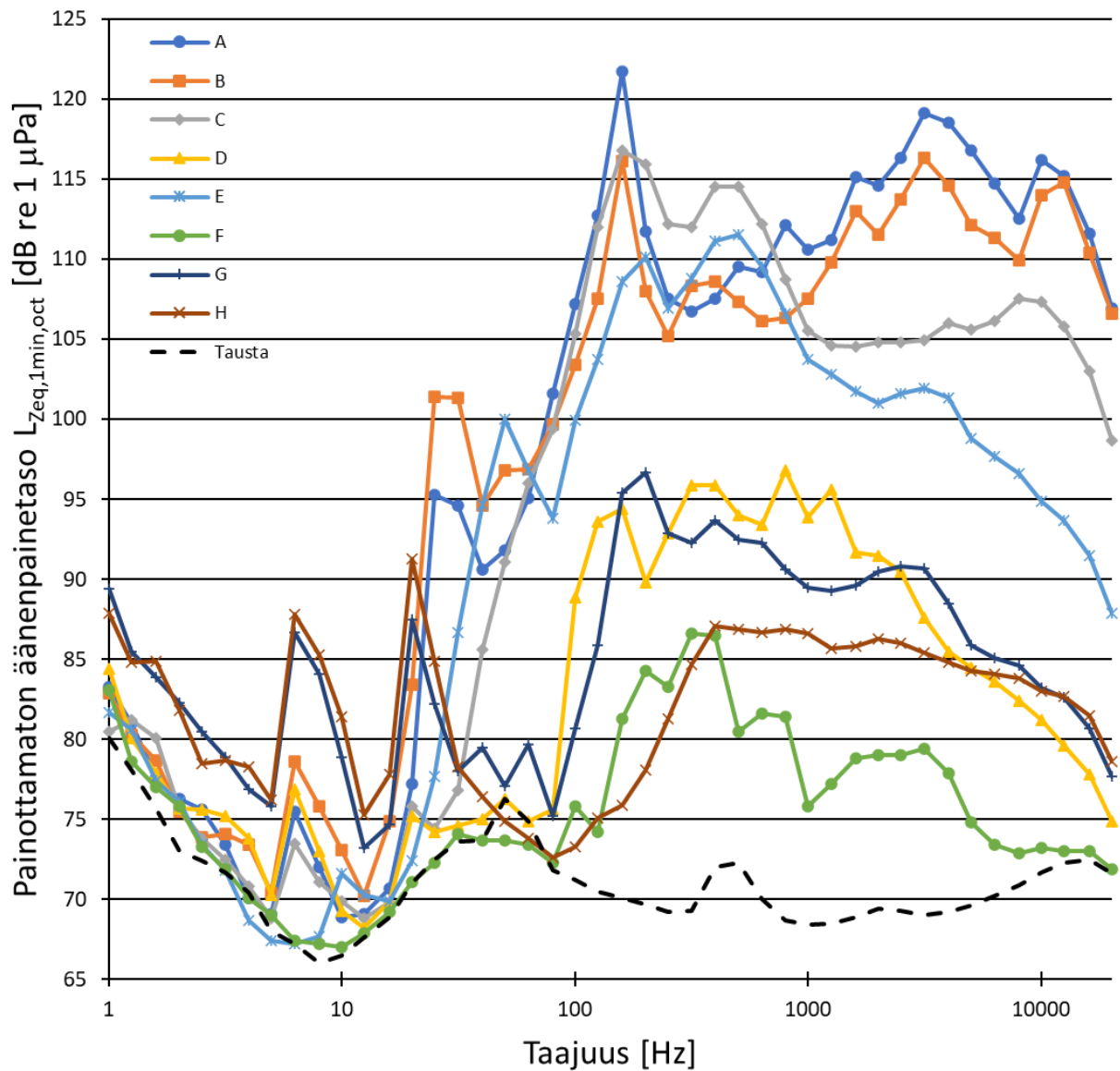
kohdalla olevan kohonneen äänenpainetason aiheuttajasta ei ole varmuutta. Voi esimerkiksi olla, että Furuvik on silloin käynnistänyt moottorinsa. (Kuvio 14.)



Kuvio 14. Tulokset 14. tunnilta.

Edellä esitetyissä kuvioissa $L_{Zeq,1min}$ on minuutin ajallinen keskiarvo painottamattomalle äänenpainetasolle kaikkien $\frac{1}{3}$ -oktaavikaistojen yli. Seuraavaksi tarkastellaan mitattuja äänenpainetasoja $\frac{1}{3}$ -oktaavikaistoittain minuutin keskiarvoina, jotta äänen taajuusspektri selviää. Spektrikuvaajaan valittiin kahdeksan erilaista ohi ajanutta alusta, ja taustäänitasoksi valittiin mittausjakson hiljaisin hetki (Kuvio 15).

Valikoitujen äänilähteiden taajuusspektrit



Kuvio 15. Taajuusspektrikuvaaja.

Kuviossa 15 valikoiduille äänilähteille on annettu kirjainkoodi. Taulukossa 3 avataan nämä koodit ja eritellään valikoitujen äänilähteiden tiedot.

Taulukko 3. Selittävä taulukko kuvioon 15.

Koodi	Ajankohta	Äänilähteen tyyppi	$L_{Zeq,1min}$ koko taajuusalueella [dB]
A	4.5.2022 9:05:35	V4T3K	128,5
B	4.5.2022 7:30:35	V4T4K	125,4
C	4.5.2022 6:22:35	V1T1K	124,3
D	4.5.2022 7:54:35	V2T2K	105,9
E	4.5.2022 9:00:35	V1T3N	119,5
F	4.5.2022 9:48:35	V2T4K	95
G	4.5.2022 13:26:35	V1T2K	105
H	4.5.2022 10:42:35	V2T1H	100,5
Tausta	4.5.2022 8:48:35	Ei näkösällä	88,6

Kuviosta 15 nähdään, että taajuusalueelle 25–20 000 Hz asettuivat suurimmat äänenpainetasot. Äänilähde A oli hydrofonia lähimpää ja kovaäänisimmin ohi mennyt iso huvivene. Sen korkeimman äänenpainetason piikki asettui 160 Hz:iin ja pysyi korkealla sitä ylemmillä taajuuksilla. Hyvin samankaltaisen spektrin antoivat äänilähteet B ja C. Äänilähde B oli toinen alus, joka ohitti hydrofonin vain parin kymmenen metrin päästä. Äänilähde C oli iso Finnswan-alus, joka ohitti hydrofonin väylän V1 lähempää laitaa pitkin. Huomataan, että Finnswanin spektristä oli mahdollisesti ehtinyt absorboitua kaikkein suurimmat taajuudet, mutta muutoin noin 900 metrin etäisyydeltä saadaan vielä tarkat tulokset verrattuna lähietäisyyteen. Myös äänilähteen E taajuusjakauma mukaili äänilähteiden A, B ja C käyrää, mutta siinä yli 1 000 Hz:n äänet olivat vielä vahvemmin absorboituneita. Äänilähde E oli väylän V1 kauempaa reunaa kulkenut nopea huvivene.

Kuviossa 15 äänilähteiden D ja G taajuusjakauma mukaili toisiaan, mutta matalilla taajuuksilla äänilähteellä G oli yli 10 dB korkeammat huiput 6,3 ja 10 Hz:n taajuuksilla. Äänilähde D oli väylän V2 kauempaa reunaa ajanut iso työvene ja äänilähde G väylän V1 kauempaa reunaa kulkenut Arctian väylänhoitoalus MT 5300. Äänilähde H oli sementinkuljetusalus Furuvik, joka liikkui hitaasti noin 10 km päässä mittauspisteestä. Sen taajuuspektri oli alle 40 Hz taajuuksilla samanlainen kuin äänilähteellä G, mutta sitä suuremmilla taajuuksilla havaitaan voimakasta äänen absorboitumista. Äänilähde F oli kaukaa väylää V2 ajanut pieni huvivene, joka kuului hydrofonille heikosti. Sen

taajuuspektri eroaa muista alle 100 Hz:n taajuuksilla, mutta sitä korkeammilla taajuuksilla käyrän huiput osuvat kuta kuinkin samoille taajuuksille kuin muilla äänilähteillä.

Kuten todettu, kuviossa 15 taustääneksi merkitty äänitaso oli mittausjakson alin mitattu äänitaso. Silloin ei ollut ollut näkyvillä olevaa meriliikennettä 54 minuuttiin. Tässä meren taustäännessä on mukana hydrofonin sähköinen kohina sekä hydrofonin kiinnityssysteemien luoma ääni. Pintakoho aiheutti liplattavaa ääntä mittausdataan, ja jatkossa pintakohon käyttö kannattaakin mahdollisuuksien mukaan pyrkiä korvaamaan akustisella laukaisimella. Tällöin pitää varmistua, ettei hydrofonilaitteisto jää meriliikenteen ja kalastajien tielle. Vaikka mittauspäivänä merenkäynti oli rauhallista, silti SoundTrapin äänitallenteella oli kuultavissa pintakohon aiheuttama liplatus. Kovemmallalla tuulella se olisi häirinnyt mittausdataa vielä enemmän.

Kaiken kaikkiaan kuviosta 15 voidaan päätellä, että eri alusten taajuusjakaumien huiput asettuvat paljolti samoille taajuuksille, mutta kauempaa kulkeneiden alusten korkeataajuiset ääniaallot ehtivät absorboitua ennen, kuin ne saavuttivat hydrofonin. Toiset alukset ovat tietenkin jo lähtökohtaisesti kovaäänisempiä kuin toiset, joten käyrien y-akselin suuntainen asema vaihtelee. Lisäksi kuvioista 1–14 huomataan, että mittauspaikan ja Naantalin meriväylän välissä sijainnut kivi ei aiheuttanut havaittavaa häiriötä minuutin keskiäänepainetasoihin. Myöskään jälkikaiuntaa ei havaita, vaan se jää taustäänitason alle.

Yhteenvedon testimittauksesta voidaan havaita, että meriliikenne nostaa vedenalaisia äänitasoja merkittävästi, mutta vain hetkellisesti. Toiset alukset ovat paljon kovaäänisempiä kuin toiset, eikä se täysin lineaarisesti riipu aluksen koosta. Aluksen nopeuden kasvaessa myös äänitasot kasvavat. Aluksista lähtevä ääni riippuukin moottoreista, potkureista sekä aluksen virtaviivaisuudesta ja muusta sen rakenteeseen liittyvistä ominaisuuksista (Urick 1983, s. 332). Nyt kerätty data auttaa jatkotutkimuksissa tunnistamaan laivoille tyypillistä ääntä.

4.6 Mittausepävarmuudet

Mittaamiseen liittyy aina epävarmuuksia. Epävarmuus koostuu mittalaitteista, mittausolosuhteista ja inhimillisistä virheistä. Suurin epävarmuustekijä tässä yhteydessä on se, että mittauskertoja oli vain yksi, joten tuloksia ei voida verrata toisiinsa. Mitatut

äänepainetasot ovat kuitenkin linjassa kirjallisuudesta löytyviin vedenalaisen äänen tasoihin matalassa vedessä väylien läheisyydessä. Lisäksi muutama alus ohitti mittauspaikan samaa väylää pitkin mittausjakson aikana useamman kerran, ja näiden eri kertojen välillä ei esiinny yli 2 dB vaihtelua äänenpainetasoissa. Tämä pieni vaihtelu voi johtua pelkästään siitä, että alus ohitti mittauspisteen eri kerroilla hieman eri etäisyydellä ja nopeudella. Täten ainakaan mittausjakson aikana ei ole tapahtunut yllättäviä muutoksia esimerkiksi mittausjärjestelyissä, jotka olisivat vaikuttaneet mittaustuloksiin. Vaikka mittaus toistettaisiin samalla tavalla, täysin samoja tuloksia ei saataisi, koska meriliikenteen määrä vaihtelee ja myös mittausolosuhteet merellä muuttuvat koko ajan vaikuttaen erityisesti taustäänitasoon. Taustäänitasoon vaikuttaa eniten tuuliolosuhteet, ja muutokset mittausolosuhteissa voivat siirtää taustäänitasoa kymmeniä desibelejä (Robinson ym. 2014, s. 79).

Mittausepävarmuutta lisää se, että mittauksen yhteydessä ei tehty kalibrointia, koska siihen ei ollut saatavilla soveltuvia laitteita. Sen sijaan luotettiin valmistajan antamiin kalibrointitietoihin. Lisäksi tuloksiin otettiin mukaan myös 1–20 Hz:n taajuudet, koska ne olivat mielenkiintoisia, vaikka ne eivät kuulu hydrofonin parhaaseen mittausalueeseen. Niihin pitää suhtautua siis varauksella. Muun ohella pintakohojen käyttö mittausjärjestelyissä loi virheellistä signaalia taustäänitasoon, mutta sen vaikutuksen voimakkuutta on vaikea arvioida. Myöskään hydrofonin sähköistä kohinaa ei tämän mittauksen yhteydessä määritetty. Sähköinen kohina tulisi mitata ympäristössä, jossa ei ole mitään ääntä. Tämä on välttämätöntä, jos halutaan tutkia erittäin hiljaisia ympäristöjä. Tällöin voidaan olla varmoja, että mittauksen yhteydessä saadut signaalit tulevat ympäristöstä eikä itse mittalaitteesta. Tässä mittauksessa ohi ajaneiden alusten aikana äänitasot ylittivät kuitenkin selvästi hiljaisimman hetken taustäänitason, joten mitatut äänitasot johtuvat meriliikenteestä.

Meriliikenteen seurannassa ei erikseen tarkkaan mitattu kunkin ohi ajavan aluksen etäisyyttä hydrofoniin, vaan käytettiin karkeita arvioita väylien etäisyyksistä hydrofoniin, koska tämä koettiin riittäväksi tarkkuudeksi ja tulosten esittämistä haluttiin yksinkertaistaa. Myös hydrofonin asennussyvyudessa voi olla pieni heitto johtuen siitä, että hydrofoni kiinnityssysteemeineen ei asetu täysin pystysuoraan meressä. Toisaalta täysin eksakti asennussyvyys ja täsmälliset etäisyydet meriliikenteeseen eivät tässä mittauksessa olleet oleellisia, vaan tärkeimpänä asiana oli testata äänen mittaamista vedessä ja kerätä siitä

kokemuksia. Kaiken kaikkiaan testimittaus onnistui hyvin. Tulokset olivat johdonmukaisia, eivätkä ne poikkeaa kirjallisuudesta löytyvistä arvoista. Pääosin tuloksiin voi siis luottaa.

5 Mittaussuositukset Airistolle

Koska standardia yleiseen vedenalaisen äänitason mittaamiseen ei ole eikä standardi meriliikenteen aiheuttaman äänen mittaamiseen matalassa vedessä vielä ole saatavilla, on tähän lukuun kerätty suosituksia, miten vedenalaisen äänen mittaaminen Airistolla kannattaisi suorittaa. Airiston alue käsittää likimain 20 km pitkän merenselän Turun, Naantalin ja Paraisten kaupunkien alueella (Kuva 12). Airisto on kauttaaltaan alle 100 m syvää (Kuva 6).



Kuva 12. Airiston alue on merkitty karttaan punaisella ellipsillä (Maanmittauslaitos ei pvm.).

Jos yksittäisen mittauksen sijaan tarkoituksena on luoda kuva koko Airiston alueen vedenalaisesta äänitilanteesta, tarvitaan useampia mittauksia, jotka kattavat koko alueen

mahdollisimman hyvin. Mittauspaikkojen valinnassa kannattaa huomioida, että merenpohjan tyyppi olisi alueelle tyypillistä maalajia. Syvyysolosuhteiden puolesta melko tasaisen veden syvyyden alue on parempi kuin kovin vaihteleva. (Robinson ym. 2014, s. 49.) Airistolla merenpohjan maalajina on pääasiassa sekasedimentti, mutta Vepsän saaren ympärillä on lisäksi halkaisijaltaan noin 5 km levyinen savisen hiekan alue (Kuva 8). Nämä molemmat maalajit kannattaa ottaa mittauksessa huomioon.

Mittauspaikan olisi hyvä olla mahdollisimman avonainen ja hydrofonilaitteiston sijaita mahdollisimman kaukana esteistä, jotta ääniaalloilla on vapaa pääsy hydrofoniin. Toisaalta merkittävien ja laajojen pohjanmuotojen muutosten yhteydessä olisi hyvä suorittaa mittaus tämän luonnonmuodostuman molemmin puolin. Sama pätee suuriin saariin. (Dekeling ym. 2014, s. 23.) Airistolla tämä lisää tarvittavien mittauksien määrää, koska alueella on useita saaria ja niemennokkia sekä erilaisia syvyysalueita. Mittauksien määrää rajoittaa kuitenkin käytössä olevat resurssit niin mittalaitteiden määrän, käytettävissä olevan ajan kuin taloudellisten resurssien osalta (Dekeling ym. 2014, s. 24).

Mittauksien määrää voi hieman rajoittaa tekemällä yleistyksiä. Esimerkiksi pääväylien haarattomien osuuksien yhteydessä vain yksittäiset mittauspisteet lähellä väylää riittävät, koska meriliikenne on niissä yhtenäistä (Dekeling ym. 2014, s. 23). Niinpä Naantalin meriväylän läheisyydessä voidaan joitain äänimittauksia yleistää koskemaan useampaa kohtaa. Toisaalta Airistolla on useita risteäviä väyliä ja lisäksi huviveneitä liikkuu myös väylien ulkopuolella, joten parasta on tehdä useita mittauksia. Lisäksi kun ympäröivällä merialueella esimerkiksi pohjan muodoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia, tarvitaan mittaukset näillä erilaisilla alueilla.

Oletettavasti suurimmat äänenpainetasot Airistolla esiintyvät väylillä. Niinpä ensimmäiset äänimittaukset kannattaa suorittaa lähellä väylää ja siirtyä niistä sitten järjestelmällisesti kohti hiljaisempia alueita. Lähimmät mittaukset suositellaan tehtäväksi 100–500 m päässä väylän lähemmästä reunasta (Dekeling ym. 2014, s. 23). Tällöin useimpien väylien yhteydessä väylän kauempaakin reunaa kulkevat alukset olisivat vain noin 1 km päässä hydrofonista, mikä testimittauksen perusteella antaa vielä tarkat tulokset aluksen äänitasoista ja taajuusspektristä. Naantalin meriväylä on Airiston keskikohdilla yli 1 km leveä, joten äänimittaukset molemmin puolin väylää ovat perustellut.

Matalissa vesissä teoreettinen äänen leviämisen – ja erityisesti sen vaimenemisen – mallinnus on haastavaa, ja siksi äänimittauksia tarvitaan sen empiiriseen selvittämiseen

(Robinson ym. 2014, s. 63). Vaimenemisen havainnollistamiseksi olisi hyödyllistä olla useamman hydrofonin ketju pois päin väylästä ja niiden avulla määrittää äänen vaimenemista ohi ajavan aluksen yhteydessä. Alle 3 km syvien vesialueiden taustamelutasoja määritettäessä suositellaan, että äänimittaus suoritettaisiin laivaväylistä etäisyydellä, joka on 30–100 kertaa alueen veden syvyys (Dekeling ym. 2014, s. 23). Airiston selkä on sen verran kapea ja sitä halkoo moni risteävä väylä, ettei monin paikoin varsinkaan syvyyden 100-kertainen etäisyys väylistä ole mahdollinen. Toisaalta Airiston matalimmissa kohdissa syvyyden 30-kertainen etäisyys onkin alle 500 m päässä väylästä, mikä luetaan väylän lähietäisyydeksi. Kompromissina on suorittaa yhdet äänimittaukset mahdollisimman etäällä väylistä, jotta hiljaisimmatkin alueet tulevat kartoitetuksi.

Hydrofonit asennetaan matalan veden suositellulle syvyydelle eli $\frac{1}{2}$:n ja $\frac{3}{4}$:n välille veden syvyydestä vedenpinnasta mitattuna (Robinson ym. 2014, s. 37). Mittaustaajuusalue kannattaa valita tarpeeksi laajaksi, jotta mittausdatasta ei jää mitään olennaista pois. Laivamelua mitatessa suositeltava taajuusalue on 10–20 000 Hz. Sitä voi hyvin hyödyntää myös yleistä vedenalaista äänitilannetta määrittäessä, koska meriliikenne on yleisin ja pysyvin ihmisen aiheuttama äänilähde vedessä. (Dekeling ym. 2014, s. 22, 29.) Mittaustulosten yhteydessä ei käytetä taajuuspainotusta, kun tarkoituksena on määrittää yleinen äänitaso (Robinson ym. 2014, s. 16).

Äänimittausten keston tulee olla vähintään muutaman viikon, mielellään jopa pidempään, jotta tuloksia voidaan edes jollain tasolla yleistää alueen tyypilliseksi äänitasoksi. Tällöin mittauksen aikana ehtii olla erilaisia säätiloja eikä yksittäinen äänilähde pääse vaikuttamaan tuloksiin liiallisesti. (Robinson ym. 2014, s. 48.) Airistolla suoritetusta testimittauksesta käy hyvin ilmi, miten yksittäiset alukset, kuten Furuvik, pääsevät vaikuttamaan liian merkittävästi äänenpainetasoihin alle vuorokauden kestävässä mittauksessa.

Täydellinen luonnehdinta alueen äänitasosta vaatii entistä pidempiä mittauksia, jotta myös vuodenaikaisvaihtelut tulevat mukaan (Robinson ym. 2014, s. 48). Airistolla meriliikenteen tiheydessä on merkittäviä vaihteluita, kun kesäisin varsinkin huviveneilijöitä on paljon enemmän kuin muulloin. Lisäksi sääoloissa tapahtuu huomattavia muutoksia lämpötila-, tuuli-, sade- ja jääolosuhteissa vuoden mittaan. Loppukesää kohden Itämeressä esiintyy termokliini eli lämpötilan harppauskerros, jossa lämmin pintavesi ei sekoitu sen alla olevan kylmemmän vesikerroksen kanssa. Termokliinin aikana pinta- ja pohjalämpötilojen ero voi

Itämerellä olla yli 10 °C. (Itämeri.fi 2020.) Koska äänen nopeus vedessä kasvaa veden lämpötilan noustessa noin 4 m/s jokaista celsiusastetta kohden, voi Airistollakin loppukesästä esiintyä selkeitä eroja äänen nopeudessa syvyyden suhteen (Allen ym. 2017, s. 811). Tämä vaikuttaa äänen leviämiseen, koska ääni taittuu hitaamman nopeuden kerroksia kohti (Urlick 1983, s. 118). Tällöin äänimittaukset kannattaa suorittaa hitaimman nopeuden syvyydessä (Dekeling ym. 2014, s. 23). Koska termokliinin aikana kylmä vesi on pohjalla, jo edellä todettu matalan veden mittaussyvyysuositus on edelleen pätevä.

Niinpä myös pitkäaikaisten mittausten aikana säätiloja pitää seurata ja liittää nämä tiedot tulosten yhteyteen. Mahdollisuuksien mukaan pitää selvittää, onko mittausalueella mittausaikana tapahtumassa esimerkiksi ruoppausta, seismisiä tutkimuksia tai muuta poikkeuksellista äänenpainetasoihin vaikuttavaa toimintaa. Lisäksi on hyödyllistä tietää, mitä merieläimiä alueella elää ja millaista ääntä ne pitävät, jotta niitä ei sekoiteta ihmisperäisiin ääniin. (Robinson ym. 2014, s. 43.)

Pitkäaikaisissa mittauksissa ei ole mahdollista suorittaa jatkuvaa paikan päällä tapahtuvaa meriliikenteen seurantaa, mutta mittaustulosten aikaprofiiliin tapahtumia voidaan yhdistää AIS-järjestelmästä saataviin tietoihin. Tällöin tosin pienet muut kuin matkustajaliikennettä harjoittavat alukset jäävät tiedoista pois, jos niillä ei ole käytössä vapaaehtoista AIS-lähetintä (IMO 2019). Tilastotietoa ei ole siitä, kuinka suosittu vapaaehtoinen AIS-järjestelmä on, mutta ainakin testimittauspäivän perusteella suurimmalta osalta huviveneistä se puuttuu. Tärkeää on, että hydrofonilaitteiston mittausdatan yhteyteen tallentama päivämäärä ja kellonaika ovat paikkansa pitävät, jotta tiedot voidaan yhdistää AIS-järjestelmän tietojen kanssa. AIS-järjestelmästä haettava historiallinen data on maksullista ja sitä tarjoaa esimerkiksi marinetraffic.com-sivusto CSV-tiedostomuodossa (Marinetraffic.com 2022).

AIS-järjestelmän pieniin aluksiin liittyviin tietoaukkoihin voisi Airistolla hakea ratkaisua Suomen rannikkoalueet kattavasta tutkaverkosta. Tutkaverkon avulla näistä merialueista luodaan tutkatilannekuva Fintrafficin meriliikenteenohjauksessa. (Fintraffic 2022.) Fintraffic on Suomen valtion omistama liikenteenohjausyhtiö, joka toimii liikenne- ja viestintäministeriön omistajaohjauksessa (Liikenne- ja viestintäministeriö ei pvm.). Tutkaja muita tietoja yhdistelemällä Fintraffic luo vielä tarkemman tilannekuvan Suomen rannikon kauppamerenkulun väylistä alusliikennepalvelussaan, joka tunnetaan kansainvälisesti nimellä VTS (Vessel Traffic Service) (Fintraffic ei pvm. A). Niinpä Airiston

alueelle olisi saatavilla tilannekuvaa, josta saa ostaa tallenteita Fintrafficilta (Fintraffic ei pvm. B). Täten näistä tallenteista voisi tarkistaa ainakin ne ajankohdat, jotka ovat mittausdatan perusteella mielenkiintoisimmat ja joihin ei AIS-järjestelmän tiedoista löydy vastinetta. Useita viikkoja kestävien mittauksen ajalta jokaisen hetken tarkistaminen tallenteelta voisi olla jo liian aikaa vievää. Tutkien kattaman alueen ulkopuolella AIS-järjestelmästä puuttuvia aluksia ei luonnollisesti edelleenkään saataisi mukaan seurantaan.

Pidempiaikaisissa vedenalaisen äänen mittauksissa täytyy huomioida mittauslaitteiston akun kesto ja datan tallennuskapasiteetti. Niiden mukaan saatetaan joutua tekemään kompromisseja mittauksen pituuden, näytteenottotaajuuden ja mittaustaajuusalueen suhteen. Yksi keino pidentää akun kestoa on hyödyntää erilaisia käyttöjaksoja. Mittausta voidaan esimerkiksi pätkiä niin, että ensin mitataan 5 minuuttia ja sitten ei mitata 5 minuuttiin ja sitten sykli aloitetaan alusta. Parasta olisi kuitenkin tehdä mittaus jatkuvana. (Robinson ym. 2014, s. 48.)

6 Jatkotutkimuskohteet

Tämä työ on vasta pintaraapaisu vedenalaisen äänen ominaisuuksiin, leviämiseen ja mittaamiseen. Paljon on jouduttu jättämään työn ulkopuolelle. Tästä työstä kannattaisi jatkaa perehtymällä saatavilla oleviin vedenalaisen äänen mallinnusohjelmiin, ja vertailla niiden ominaisuuksia ja rajoitteita äänen leviämisen kuvaamisessa. Rajoitteita esiintyy muun muassa sen suhteen, mitä taajuusalueita ja kuinka pitkiä etäisyyksiä eri mallinnusohjelmat ja niiden käyttämät leviämisteoriat kattavat (Dekeling ym. 2014, s. 37–38). Mallinnusohjelmien avulla voisi myös arvioida tietyn alueen melukartan luomiseen tarvittavien äänimittausten määrää ja tiheyttä.

Vaikka vedenalaisen äänen leviämiseen vaikuttavat tekijät ovat pääosin hyvin selvillä, vielä tarvitaan lisää tutkimusta, jotta sitä pystyttäisiin ennustamaan ja laskemaan entistä paremmin erityisesti ominaispiirteiltään erilaisilla vesialueilla. Esimerkiksi yksi asia, joka kaipaa tarkennusta, on yli 1 kHz taajuuksien heijastuminen merenpinnasta (Ainslie 2010; Dekeling ym. 2014, s. 38 mukaan). Uuden tutkimuksen perusteella myös mallinnusohjelmia kehitetään jatkuvasti.

Äänimittauksiin liittyen olisi hyödyllistä, että luotaisiin standardi yleiseen vedenalaiseen äänitason mittaamiseen, jotta kaikki tekisivät sen samalla tavalla. Standardin luomisessa auttaa, että hyvien mittauskäytäntöjen tarkkaa dokumentointia jatketaan. Esimerkiksi BIAS (Baltic Sea Information on the Acoustic Soundscape) -hankkeessa luotiin omat standardit äänimittauksiin, koska yleisiä standardeja vedenalaiseen äänimittaukseen ei ole (Verfuß ym. 2015, s. 5). Kattavan standardin luomisessa haastetta tuo eri merialueiden hyvin erilaiset ominaispiirteet. Kun standardi on luotu, pitää myös tässä työssä esitetyt mittaussuositukset Airistolle tarkistaa standardin mukaiseksi. Todennäköisesti yleisten äänimittausten standardia ennen julkaistaan jo valmisteilla oleva ISO 17208 -standardin kolmas osa, joka käsittelee yksittäisten laivojen säteilemän äänen mittaamista matalissa vesissä. Myös sen osalta pitää Airiston mittaussuositukset tarkastaa.

Tässä työssä tehdyn testimittauksen tuloksista ja ohi ajaneiden alusten tarkemmista tiedoista olisi mielenkiintoista selvittää, mikä aluksissa aiheuttaa matalat ja mikä korkeat taajuudet. Vielä lisätutkimusta tarvitaan myös siihen, riittääkö standardissa ISO 17208 määritelty taajuusalue 10–20 000 Hz laivamelulle, koska laivojen on todettu aiheuttavan myös korkeataajuisempaa, jopa 100 kHz taajuisia, ääntä johtuen esimerkiksi kavitaatiosta

(Wenz 1962; Veirs ym. 2016, s. 3 mukaan). Tosin korkeat taajuudet eivät etene vedessä kovin pitkälle, joten niiden merkittävyyttä pitää myös pohtia. Toisaalta lähietäisyydellä ne ovat havaittavissa. Veirs ym. (2016, s. 29) ehdottaakin, että laivamelun yhteydessä mittaustaajuus nostettaisiin vähintään 50 000 Hz:iin.

On tärkeä tietää, millaista ääntä merieliöt pitävät valitulla mittaustaajuusalueella, jotta ne osataan erottaa ihmisperäisistä äänistä. Hyvä olisi myös kehittää kätevä tapa kaikenkokoisen meriliikenteen seurantaan pitkäaikaisten äänimittausten ajaksi. Tulevaisuudessa on tarpeellista tutkia lisää ihmisperäisen vedenalaisen äänen vaikutuksia merieliöihin ja selvittää, minkä tyyppinen ihmisperäinen ääni on haitallisinta ja miten erityisesti sitä voitaisiin vähentää.

Lähteet

- Ainslie, M. A. (2010). *Principles of Sonar Performance Modeling*. Berliini: Springer-Verlag.
- Allen, J. T., Keen, P. W., Gardiner, J., Quartley, M., & Quartley, C. (2017). A new salinity equation for sound speed instruments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 15(9), 810–820. <https://doi.org/10.1002/lom3.10203>
- Berg, R. E. (ei pvm.). *Sound absorption*. Noudettu 8. maaliskuuta 2022, osoitteesta <https://www.britannica.com/science/sound-physics/Sound-absorption>
- Dekeling, R. P. A., Tasker, M. L., van der Graaf, A. J., Ainslie, M. A., Andersson, M. H., André, M., Borsani, J. F., Brensing, K., Castellote, M., Cronin, D., Dalen, J., Folegot, T., Leaper, R., Pajala, J., Redman, P., Robinson, S. P., Sigray, P., Sutton, G., Thomsen, F., Werner, S., Wittekind, D., & Young, J. V. (2014). Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas Part II: Monitoring Guidance Specifications. *JRC Scientific and Policy Reports*. <https://doi.org/10.2788/27158>
- Finfer, D. C., Leighton, T. G., & White, P. R. (2008). Issues relating to the use of a 61.5 dB conversion factor when comparing airborne and underwater anthropogenic noise levels. *Applied Acoustics*, 69(5), 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.008>
- Fintraffic. (ei pvm. A). *Fintrafficin meriliikenteenohjaus - Turvallista meriliikennettä*. Noudettu 1. syyskuuta 2022, osoitteesta <https://www.fintraffic.fi/fi/vts>
- Fintraffic. (ei pvm. B). *Tallennepyynnöt*. Noudettu 1. syyskuuta 2022, osoitteesta <https://www.fintraffic.fi/fi/vts/tallennepyynnot-0>
- Fintraffic. (2022). *Suomessa on yksi maailman laajimmista tutkaverkoista – mikä merkitys tutkapalvelulla on Fintrafficin meriliikenteenohjauksen toiminnassa?* Noudettu 1. syyskuuta 2022, osoitteesta <https://www.fintraffic.fi/fi/uutiset/suomessa-yksi-maailman-laajimmista-tutkaverkoista-mika-merkitys-tutkapalvelulla>
- Fournet, M. E. H., Matthews, L. P., Gabriele, C. M., Haver, S., Mellinger, D. K., & Klinck, H. (2018). Humpback whales *Megaptera novaeangliae* alter calling behavior in

response to natural sounds and vessel noise. *Marine Ecology Progress Series*, 607, 251–268. <https://doi.org/10.3354/meps12784>

Gracey & Associates. (ei pvm.). *Sound Level Frequency Weightings*. Noudettu 19. huhtikuuta 2022, osoitteesta <https://www.acoustic-glossary.co.uk/frequency-weighting.htm#z-weighting>

GTK. (ei pvm.). *Maankamara-karttapalvelu*. Noudettu 25. huhtikuuta 2022, osoitteesta <https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>

GTK. (2014). *EMODnet-GEOLOGY 2 Work Package 3: Sea-bed substrate Guidance Document II, Harmonisation and Generalisation*. Saatavissa https://tupa.gtk.fi/metaviite/seabed_substrate_250k_guidelines.pdf.

GTK. (2015). *Merenpohjan kovat ja pehmeät alueet 1:250 000*. Noudettu 25. huhtikuuta 2022, osoitteesta https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/merenpohjan_kovat_ja_pehmeat_alueet_250k.html

GTK. (2016). *Merenpohjan maalajit 1:1 000 000*. Noudettu 25. huhtikuuta 2022, osoitteesta https://tupa.gtk.fi/paikkatieto/meta/seabed_substrate_1m.html

HELCOM. (ei pvm.). *Underwater Noise*. Noudettu 22. helmikuuta 2022, osoitteesta <https://helcom.fi/action-areas/marine-litter-and-noise/underwater-noise/>

Ilmatieteen laitos. (2021). *Lämpötila-suolaisuusluotain - CTD*. Noudettu 15. maaliskuuta 2022, osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ctd-luotain>

IMO. (2019). *AIS transponders*. Noudettu 20. toukokuuta 2022, osoitteesta <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/AIS.aspx>

Itämeri.fi. (ei pvm.). *Vedenlaatu: Suolaisuus*. Noudettu 12. toukokuuta 2022, osoitteesta https://www.itameri.fi/fi-FI/Itameri_nyt/Vedenlaatu/Suolaisuus

Itämeri.fi. (2020). *Suolaisuus, lämpötila ja kerrostuneisuus*. Noudettu 12. toukokuuta 2022, osoitteesta https://itameri.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Suolaisuus_lamportila_ja_kerrostuneisuus

- Liikenne- ja viestintäministeriö. (ei pvm.). *Hallinnonala*. Noudettu 1. syyskuuta 2022, osoitteesta <https://www.lvm.fi/hallinnonala>
- Maanmittauslaitos. (ei pvm.). *Paikkatietoikkuna*. Noudettu 12. huhtikuuta 2022, osoitteesta <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/>
- Marinetraffic.com. (2022). *Historical AIS Data*. Noudettu 10. toukokuuta 2022, osoitteesta <https://www.marinetraffic.com/en/p/ais-historical-data>
- NPL. (2022). Noudettu 9. helmikuuta 2022, osoitteesta <https://www.npl.co.uk/>
- Ocean Instruments NZ. (ei pvm.). *SoundTrap ST500 specification sheet*. Saatavissa <Http://Www.Oceaninstruments.Co.Nz/Wp-Content/Uploads/2018/04/SoundTrap-500-Spec.Pdf>.
- Robinson, S. P., Lepper, P. A., & Hazelwood, R. A. (2014). Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement. *NPL Good Practice Guide No. 133*. Saatavissa <https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg133underwater>.
- Robinson, S. P., Theobald, P. D., Hayman, G., Wang, L. S., Lepper, P. A., Humphrey, V., & Mumford, S. (2011). *Measurement of underwater noise arising from marine aggregate dredging operations*. Saatavissa <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/9610>.
- Rolland, R. M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K., & Kraus, S. D. (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society. B, Biological Sciences*, 279(1737), 2363–2368. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2429>
- Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L., & Meriläinen, P. (2009). *MAOL-taulukot (2.–7. painos)*. Otavan Kirjapaino Oy.
- SFS-EN ISO 1683:2015. *Acoustics. Preferred Reference Values for Acoustical and Vibratory Levels*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.
- SFS-ISO 17208-1:2016. *Underwater Acoustics. Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships. Part 1: Requirements for Precision Measurements in Deep Water Used for Comparison Purposes*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

- Urick, R. J. (1983). *Principles of Underwater Sound* (3rd Edition). Los Altos: Peninsula Publishing.
- Veirs, S., Veirs, V., & Wood, J. D. (2016). Ship noise extends to frequencies used for echolocation by endangered killer whales. *PeerJ*, 4. <https://doi.org/10.7717/peerj.1657>
- Verfuß, U. K., Andersson, M., Folegot, T., Laanearu, J., Matuschek, R., Pajala, J., Sigray, P., Tegowski, J., & Tougaard, J. (2015). *BIAS Standards for noise measurements. Background information, Guidelines and Quality Assurance. Amended version.* Saatavissa https://biasproject.files.wordpress.com/2016/04/bias_standards_v5_final.pdf.
- Wenz, G. M. (1962). Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34. <https://doi.org/10.1121/1.1909155>

Hydrofonilaitteiston kalibrointitodistukset



Calibration Test Results		
Test	Date	14 Sep 2020
	Operator	JA
Device	Model	SoundTrap 500 STD
	Serial No	5851
Source	Model	Center 327
	Serial	130307390
	Frequency	250 Hz
	Coupler	OIC1
	Level	-37.6 dB re. 1 μ Pa
Reference	Model	B&K 2236
	Serial	2015497
Sensitivity		-1.8 dB
Calibration Tone	RTI Level @ 1kHz	-39.4 dB re. 1 V

Lähde: <http://oceaninstruments.azurewebsites.net/> tallentimen sarjanumerolla 5851.



Calibration Test Results		
Test	Date	14 Sep 2020
	Operator	JA
Device	Model	ST500 Hydrophone (STD)
	Serial No	1286
Source	Model	Center 327
	Serial	130307390
	Frequency	250 Hz
	Coupler	OIC1
	Level	120 dB re. 1 μ Pa
Reference	Model	B&K 2236
	Serial	2015497
Sensitivity		178 dB re. 1 μPa/V

Lähde: <http://oceaninstruments.azurewebsites.net/> hydrofonin sarjanumerolla 1286.