

LAIVOJEN VEDENALAISET MELUPÄÄSTÖT

Reijo Alakoivu, Valtteri Hongisto, Olli Loisa

Turun ammattikorkeakoulu Oy
Joukahaisenkatu 7, FI-20520 Turku
etunimi.sukunimi@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Tavoitteenamme oli kehittää AIS-tietokantaa hyödyntävä vedenalaisen melupäästön mittaamenetelmä. Menetelmää testattiin Saaristomerellä Kihdin laivaväylällä olevalla mittausasemalla, jossa signaalia tallennettiin 39 vuorokautta yhtäjaksoisesti kahdella tallentavalla hydrofonilla. Mittaukset tehtiin taajuusalueella 10–20 000 Hz. Onnistuneita ohiajoja (etäisyys hydrofoniin 50–200 m) saatiin 187 kpl. Erilaisia aluksia (rahtialus, matkustaja-autolautta, muut) mittausaseman ohi ajoi AIS:n mukaan 17 kpl. Äänilähteen (aluksen) melupäästö esitetään äänenpainetasona (dB re 1 μ Pa) oltaessa 1 m päässä pisteeksi kuvitellusta äänilähteestä. Arvot olivat välillä 162–183 dB. Menetelmä vaikuttaa tehokkaalta. Sitä sovelletaan tulevaisuudessa useille suomalaisille väylille, jotta tietokanta saataisiin selvästi suuremmaksi.

1 JOHDANTO

Laivojen vedenalainen melupäästö voidaan määrittää matalassa vedessä DNV:n menetelmällä [1]. Mittaus voidaan toteuttaa monella eri tavalla riippuen mittauksen tarkoituksesta ja tilaajasta, mittauksen kiireellisyydestä, käytettävissä olevista laitteistoista ja merenkulkukapasiteetista sekä mittauspaikan sijainnista.

Turku AMK:lla on käytettävissään veneitä ja kymmenittäin tallentavia hydrofoneja, jolloin on teknisesti helpointa suorittaa mittaukset autonomisella mittausasemalla, eli tallentimet upotetaan suunniteltuun paikkaan ja mitattava alus ajaa siitä yli suunnitellusti. Näin on toimittu, kun halutaan mitata tietty yksittäinen alus.

Meriteollisuus on globaalisti yhä kiinnostuneempi vedenalaisen melun torjunnasta, koska IMO saattaa tulevaisuudessa asettaa teknisin lukuarvoin esitetyjä melupäästörajoituksia aluksille. Muualla joillakin väylillä on jo asetettu melupäästörajoituksia. Tämän takia suomalaisten alusten melupäästöjä pitäisi kartoittaa laajasti, jotta tiedettäisiin melupäästöjen nykytaso ja voitaisiin tulevaisuudessa faktapohjaisesti edetä mahdollisessa meluntorjuntasuunnittelussa etenkin uusien alusten kohdalla. Alusten melupäästön tiedetään riippuvan isossa mittakaavassa voimakkaasti syvyyksestä ja nopeudesta, joiden yhdistelmä riippuu propulsioon tehosta [2]. Tekniset ratkaisut ja meluntorjuntaratkaisut ovat aluskoh- taisia, joten yleistyksiä ei voida tehdä pelkästään edellisten perusteella.

Helpoin tapa kartoittaa alusten melupäästöjä DNV-menetelmän mukaan on sijoittaa



© 2025 Reijo Alakoivu, Valtteri Hongisto ja Olli Loisa. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen -lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

tallentimia sellaisille väylille, joissa ajaa runsaasti laivoja ja suorittaa tallennusta yhtäjaksoisesti niin pitkään, kunnes tietomäärä ei enää olennaisesti kasva. AIS-tietokannan (*Automatic Identification System*) avulla voidaan saada selville useimpien aseman päältä ajaneiden alusten tiedot (IMO-numero, syväys, paikkatieto ja nopeus noin 10 sekunnin välein) ja IMO-numeron perusteella saadaan myös tietoa aluksen teknisistä ratkaisuista. Tällaista menetelmää ei ole Suomessa ennen sovellettu.

Tavoitteenamme oli kehittää AIS-tietokantaa hyödyntävä vedenalaisen melupäästön mittausmenetelmä ja tarkastella sillä saatavaa melupäästötietokantaa yhdellä testiasemalla, joka sijaitsi Kihdin laivaväylällä.

2 MENETELMÄT

2.1 Vedenalaisen painesignaalin mittaus

Mittaukset toteutettiin DNV:n matalan veden menetelmällä [1]. Menetelmä soveltuu alueille, joissa veden syvyys on 30–150 metriä. Aluksen pitää sijaita hydrofonista 100–200 m vaakaetäisyydellä.

Mittauksissa käytettiin kahta tallenninta (SoundTrap ST600 HF). Tallentimet asennettiin meren pohjaan DNV:n menetelmän mukaisesti (kuva 1). Tallennus tehtiin näytteenottotaajuudella 48 kHz. Tallennus tapahtuu SUD-muodossa, joka sisältää X3-pakattua signaalia. Kun data puretaan hydrofonilta tietokoneelle, se muunnetaan WAV-muotoon.



Kuva 1. DNV-menetelmän mukainen pohja-asennuskokoonpano koostuu pohjalevystä (vaneri + betonipaino), laitepaketista (tallennin + akustinen laukaisin) ja laitepakettiin köydellä liitetystä kellukkeesta (ei näy kuvassa). Vaneria käytetään, koska halutaan välttää hydrofonin painuminen merenpohjaan. Mittauksen valmistuttua akustiselle laukaisimelle lähetetään koodi, joka vapauttaa laitepaketin pohjalevystä. Tämän jälkeen laitepaketti nousee pintaan kellukkeen avulla. Hydrofonin etäisyys vanerilevystä on 70 mm.

2.2 Aluksen tunnistus ja mittausajankohdan määrittäminen

Kuvassa 2 on esitetty DNV-mittausmenetelmän yleinen periaate.

Mittauspisteeseen ohittaneet alukset tunnistettiin AIS-järjestelmästä saadun datan perusteella. AIS-data sisältää muun muassa aikaleiman, aluksen IMO-tunnistetiedot, sijainnin ja nopeuden. Luokan A alukset lähettävät AIS- viestejä 2–10 sekunnin välein riippuen ajonopeudesta. AIS- data saatiin Väylävirastolta.

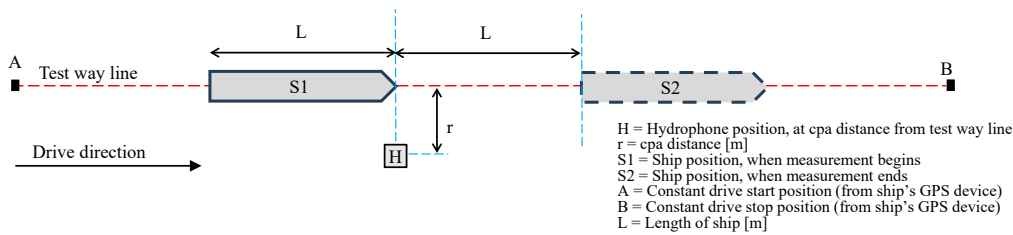
Aluksen raportoimien sijaintitietojen ja hydrofonin sijainnin perusteella määritettiin lähin kohtaamispaikka (CPA, Closest Point of Approach). Hydrofonin ja laivan lähimmän sijaintipisteiden välinen etäisyys määritettiin Haversinin kaavalla, jota käytetään suurten etäisyyksien laskemiseen maapallon pinnalla. DNV:n menetelmässä r_{CPA} -etäisyyden tulee olla 100–200 metriä. Tässä tutkimuksessa hyväksyttiin etäisyydet 50–200 metriä.

Aluksen ja hydrofonin välinen kokonaisetäisyys laskettiin Pythagoraan lauseen avulla, huomioiden CPA-etäisyys ja hydrofonin syvyys (meren syvyys).

Suoritettavan mittauksen ajallinen keskikohta saatiin AIS-datasta. Tämä ajankohta vastaa hetkeä, jolloin laiva oli lähimpänä hydrofonia. Ajallista keskikohtaa säädettiin vielä äänidatan perusteella, koska hydrofonin sisäisen kellon tarkkuus ei ole absoluuttinen.

Jos ohitushetkellä jokin toinen alus oli AIS-datan mukaan alle 2000 metrin etäisyydellä, mittaus hylättiin.

Speed above 5 knots per hour: monitoring time is 2L

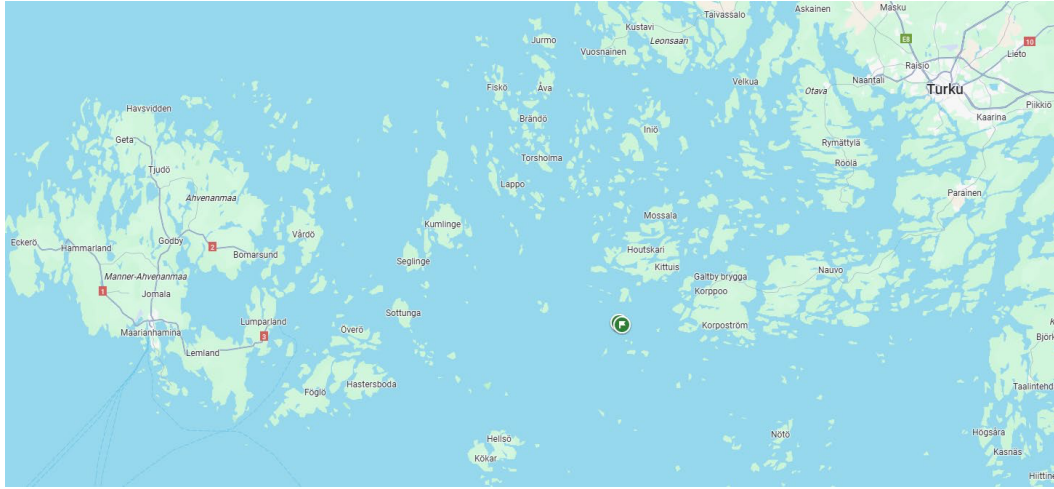


Kuva 2. DNV-menetelmän mittausperiaate, kun nopeus ylittää 5 kn (9.26 km/h). Aluksen tulee ajaa vaakaetäisyydeltä $r=100\text{--}200$ m päässä hydrofonista.

2.3 Mittausasema

Mittausasema perustettiin Kihdin laivaväylälle (Kuva 3) syksyllä 2023, koska alukset kulkevat siellä yleensä täydessä matkanopeudessaan.

Mittausasema perustettiin väylällä sellaiseen kohtaan, josta alukset AIS-historian mukaan todennäköisimmin ajavat. Asemalle asennettiin kaksi hydrofonia toisistaan 500 m päähän, jolloin asemalla katettiin 900 m leveä vyöhyke. Asennussyvyudet olivat 62 ja 74 metriä. Mittausjakso oli 39 vuorokautta.



Kuva 3. Mittausasema sijaitsee Saaristomerellä Kihdillä, noin 30 km Korppoosta länteen.

2.4 Vedenalaisen melupäästön määrittäminen DNV-menetelmällä

Melupäästöllä tarkoitetaan äänilähteen äänenpainetasoa (SPL) yhden metrin etäisyydellä lähteestä. Alusten vedenalaiset melupäästöt määritettiin 1/3-oktaavikaistoittain taajuusalueella 10–20 000 Hz. Mittausajan pituus on se aika, joka laivalla kuluu kulkea kaksi laivan mittaa (2L). Melupäästö (L_{RN}) määritetään yhtälön 1 mukaan:

$$L_{RN} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) + 18 \cdot \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) - 5 \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Menetelmää voi kritisoida, koska se huomioi läheltä tai kaukaa ajavan aluksen suuntaavuutta eri tavoin: sektorin 2L leveys on sitä suurempi, mitä lähempänä hydrofonia alus ajaa. Tästä syystä päätettiin määrittää ensin ohiajon energia pitemmällä ohiajoajalla t_{4L} (sound exposure level), koska tähän aikajaksoon yleensä pakkautuu kaikki ohiajossa syntyvä äänienergia. Sen perusteella määritettiin ekvivalenttitaso standardin haluamalla ajalla t_{2L} . Laskenta tehtiin yhtälöiden 2–5 mukaan:

$$L_{eq,t_{4L}} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

$$L_E = L_{eq,t_{4L}} + 10 \times \log_{10} \left(\frac{t_{4L}}{t_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

$$L_{eq,t_{2L}} = L_E - 10 \times \log_{10} \left(\frac{t_{2L}}{t_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

$$L_{RN} = L_{eq,t_{2L}} + 18 \cdot \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) - 5 \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

missä

$L_{eq,T}$ [dB re 1 μPa]

p_{rms} [Pa]

p_0 [Pa]

L_E [dB re 1 μPa]

t_{4L} [s]

t_0 [s]

keskiäänitaso ajanjaksolla T (joko t_{4L} tai t_{2L})

äänienpaineen tehollinen arvo ajalla t_{4L} (kaava 1) tai t_{4L} (kaava 2)

referenssiäänienpaine, 1.00 μPa

äänialtistustaso, äänienergia normalisoituna yhteen sekuntiin

mittausaika, joka kuluu neljän aluksen pituusmitan ajoon ($4L/v$)

referenssiaika, 1.00 s

L_{RN} [dB re 1 μ Pa]	melupäästö (radiated noise level)
$L_{eq,XL}$ [dB re 1 μ Pa]	keskiäänitaso ajalla, joka kuluu X alusmitan ajoon
t_{2L} [s]	mittausaika, joka kuluu kahden aluksen pituusmitan ajoon ($2L/v$)
r [m]	etäisyys ajolinjan ja hydrofonin välillä: $r = \sqrt{s^2 + r_{CPA}^2}$
r_0 [m]	referenssi etäisyys, 1.00 m
v [m/s]	alusken nopeus
L [m]	alusken pituus
s [m]	syväys hydrofonin kohdalla

3 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tulosaineistoa on esitelty Taulukossa 1 jaettuna kolmeen alustyyppiin. Mukana ovat kaikki hyväksytyt ohitukset.

Sama alus saattoi ajaa useita kertoja hyväksytysti aseman ohi. Matkustaja-autolauttojen aineisto koostui viidestä eri aluksesta, jotka liikennöivät Turun ja Tukholman välillä päivittäin. Samoin erilaisia rahtialuksia aineistossa oli viisi (peräti 45 ohitusta edusti samaa alusta). Muut alukset koostuivat seitsemästä eri aluksesta.

Tulosaineiston taajuusriippuvuuksia alustyypeittäin on esitelty kuvassa 4.

Taulukko 1. Mittausasemalla kerätyn aineiston kuvaus. Muut alukset ovat esimerkiksi hinaajia, kalastusaluksia tai tutkimusaluksia.

	Muut alukset	Rahtialukset	Matkustaja-autolautat
Hyväksytyjen ohitusten määrä	9	50	128
Nopeusalue [kn]	5 - 10	10 - 15	12 - 21
$L_{RN,tot}$ [dB re 1 μ Pa]	162 - 178	170 - 178	164 - 183

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimus tuotti menetelmän, jolla voidaan kartoittaa kohtalaisen pienellä työmäärällä eri alusten äänitehotasoja. Menetelmää on tarkoitus hyödyntää 2025 alkaneessa URNeco-projektissa, jossa mittausasemia on tarkoitus perustaa useille laivaväylille.

6 KIITOKSET

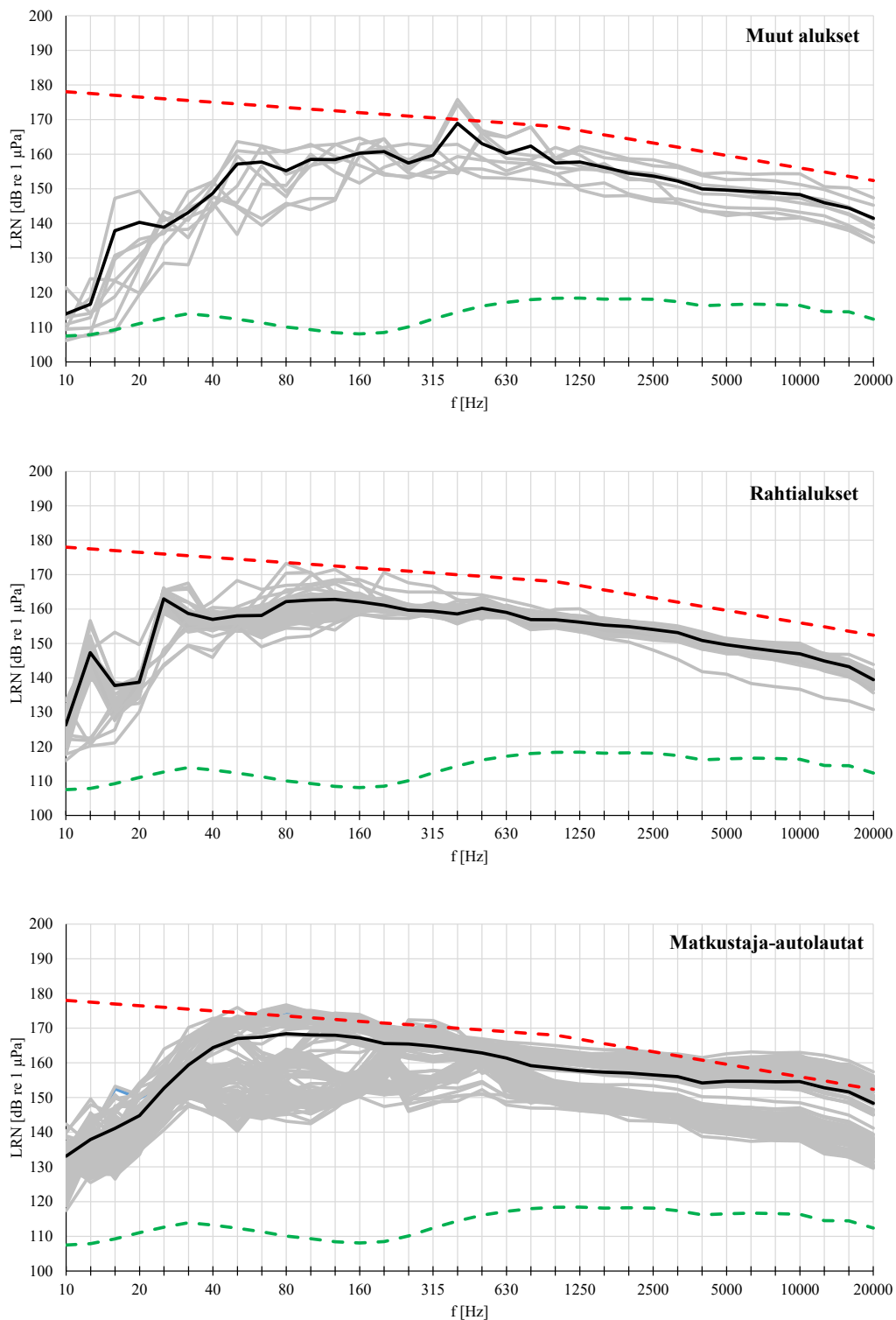
Tutkimus oli osa ANTERO-projektia (Anthropogenic underwater noise in sensitive archipelagic and coastal waters 2023–2025), jonka toteutti Turun ammattikorkeakoulu. Projektin rahoitti Opetus- ja kulttuuriministeriö.

VIITTEET

[1] DNV-CG-0313, July 2022, Sec. 2.3: Shallow water testing

[2] MacGillivray, et al. (2022). A functional regression analysis of vessel source level measurements from the Enhancing Cetacean Habitat and Observation (ECHO) database. J. Acoust. Soc. Am. 152 1547–1563.

[3] DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.7 July 2024, Criterion of DVN Silent (E) Normal condition.



Kuva 4. Melupäästön (LRN) riippuvuus taajuudesta alustyypeittäin. Harmaat viivaat kuvaavat yksittäisiä mittaustuloksia ja musta viiva niiden keskiarvoa. Punaisella katkoviivalla on esitetty DNV Silent (E) Normal condition [3] ja vihreällä katkoviivalla melupäästö ilman alusta (taustamelu).