

# LAIVOJEN VEDENALAISEN MELUN TUTKIMUSTA VTT:LLÄ

Antti Hynninen<sup>1,a</sup>, Jukka Tanttari<sup>1,b</sup>, Seppo Uosukainen<sup>2</sup>, Ville Viitanen<sup>1,a</sup>, Tuomas Sipilä<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

<sup>a</sup> PL 1000, 02044 VTT; <sup>b</sup> PL 1300, 33101 Tampere  
etunimi.sukunimi@vtt.fi

<sup>2</sup> SU Akustiikka

Lehmustie 1B, 00780 Helsinki  
etunimi.sukunimi@pp.inet.fi

## Tiivistelmä

Laivojen vedenalaisen melun rajoittamista ajavat sekä sotilaalliset tarpeet sekä ympäristönsuojelu. Ensimmäisiä melupäästön raja-arvoja siviilialuksille ehdotettiin 1990-luvulla. Sitten useat luokituslaitokset ovat antaneet suosituksia enimmäismelupäästölle sekä mittausohjeita. Vedenalais- ja ilma-akustiikalla on monia eroavaisuuksia. Ne liittyvät erityisesti väliaineeseen, mutta myös lähteiden tyypilliseen kokoon, äänen syntytapoihin sekä traditioihin melupäästön kvantitatiivisessa ilmoittamisessa. VTT:llä tehty ja tehtävä tutkimus kattaa koko aihealueen: mittaukset, rakenteiden äänensäteily, potkurin äänentuotto sekä äänen eteneminen vedessä.

## 1 JOHDANTO

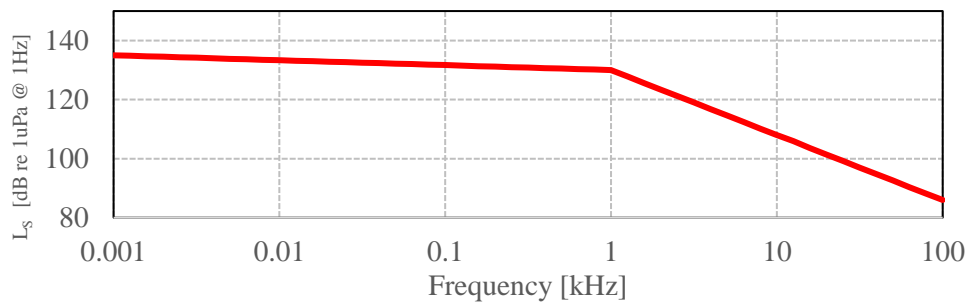
Tämän esityksen tarkoitus on (i) antaa yleiskuva laivojen vedenalaisen melupäästön hallinnasta, (ii) valottaa eroavaisuuksia ilma-akustiikkaan ja (iii) esitellä aiheeseen liittyviä VTT:n tutkimusaktiviteetteja.

Jo Leonardo da Vinci huomautti, että etäällä olevan laivan aiheuttamat äänet voidaan kuulla veden alla. Tekniset innovaatiot tulivat myöhemmin. 1900-luvun alussa pyrittiin turvallisuutta parantamaan karikoista varoittavilla vedenalaisilla kelloilla. Titanicin onnettomuuden jälkeen alkoi akustisen kaikuluotauksen systemaattinen kehittäminen [1, 2]. Maailmansotien seurauksena sekä kaikuluotaus että akustisten signaalien kuuntelu ottivat pitkiä harppauksia. Viitteessä [3] on vaikuttava kooste UCDWR:n (University of California Division of War Research) II maailmansodan aikaisen tutkimusohjelman tuloksista.

Hiljalleen alkoi ympäristönsuojelu toimia ajurina siviilipuolella. Tosin Ross [4] totesi vielä 1987 ykskantaan, että ”*Underwater noise is sound in water that limits the military effectiveness of naval systems*”. Eräs virstanpylväs oli Mitsonin vuonna 1995 kokoama raportti [5]. Siinä ehdotettiin ensimmäisen kerran raja-arvoja kalantutkimusalusten melupäästölle (kuva 1). Taustalla oli havainto, että tutkimusalusten melu vaikeutti kaikuluotauksia ja karkotti kaloja. Tällöin tulokset olivat epäluotettavia.



© 2019 Antti Hynninen, Jukka Tanttari, Ville Viitanen, Seppo Uosukainen, Tuomas Sipilä. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisiteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.



Kuva 1. Mitsonin ehdottamat raja-arvot. Tutkimusalus, 11 kn [5].

## 2 VEDENALAISAKUSTIIKAN JA ILMA-AKUSTIIKAN EROJA

Olellainen vedenalais- ja ilma-akustiikkaa erottava tekijä on luonnollisesti väliaine. Veden tiheys on noin  $1000 \text{ kg/m}^3$  ja äänen nopeus vedessä  $1500 \text{ m/s}$ . Karakteristinen resistanssi on siten vedellä  $1.5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ja ilmalla (NTP)  $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Vesi kuormittaa rakenteita voimakkaasti muuttaen niiden värähtelykäyttäytymistä. Rakenne voi myös säteillä ääntä veteen niin tehokkaasti, että säteily on rakenteen pääasiallinen häviömekanismi.

Vedessä voi syntyä kavitaatiota, so. alipaineessa syntyy höyrykuplia, jotka ylipaineessa luhistuvat kasaan synnyttäen voimakkaita paineiskuja. Kavitoivan potkurin melupäästö on huomattavan suuri verrattuna kavitoimattomaan potkuriin.

Vesialue reunoineen sekä veden kerrostuneisuus vaikuttavat akustiikkaan. Pinnalla tapahtuu lähes täydellinen heijastus (Lloyds'n efekti); äänenpaine on pieni ja hiukkasnopeus on maksimissaan. Pohjan vaikutus vaihtelee riippuen pohjan rakenteesta. Matala vesialue toimii aaltoputkena pienillä taajuuksilla, minkä vuoksi geometrinen etäisyysvaimentuma on pienempi kuin syvässä vesialueessa. Veden lämpötilan, paineen ja suolapitoisuuden jakaumat saavat aikaan äänen taipumista ja ilmiön vuoksi voi syntyä äänivarjoja.

## 3 LAIVAN MELUPÄÄSTÖ JA SEN MITTAAMINEN

Laivan vedenalainen melupäästö ilmoitetaan suurella Lähdetaso (Source Level, SL,  $L_s$ ). Sitä käytettiin jo mainituissa 1940-luvun tutkimuksissa [3]. Luokituslaitokset, kuten BV, DNV ja ABS [6,7,8], ovat viime vuosina laatineet ohjeita Lähdetason määrittämiseen sekä antaneet suositusarvoja, kuten DNV:n luokat SILENT-A, -S, -F, -R sekä -E eri tyyppisille aluksille. Näistä esim. F tarkoittaa kalastusalusta ja R tutkimusalusta. Lisäksi on julkaistu mm. ASA:n ja ISO:n standardit [9,10]. ABS:n ohjeessa Lähdetason määrittämisohje on muotoa

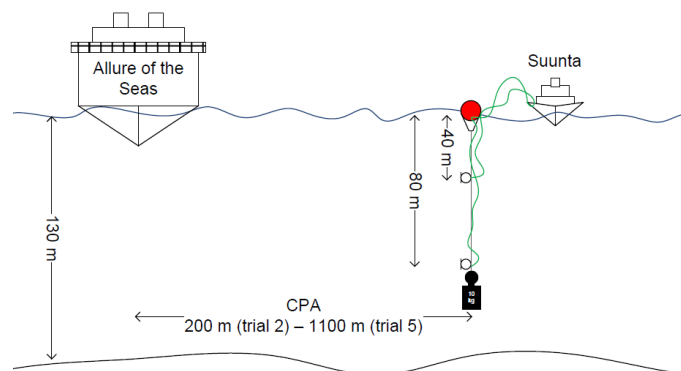
$$L_s(r, i) = L_p'' + TL = L_p'' + N \log\left(\frac{r}{r_0}\right) + \alpha r \quad (1)$$

Lähdetaso  $L_s$  on etäisyydellä  $r$  lähteestä olevan hydrofonin  $i$  referenssietäisyydelle  $r_0 = 1 \text{ m}$  korjattu äänenpainetaso. Yhtälössä (1)  $L_p''$  on hydrofonin  $i$  mitattu ja taustamelukorjattu äänenpainetaso. ” $TL$ ” (oikeastaan  $NR$ ) sisältää äänikentän geometrisesta hajaantumista ja absorptiosta  $\alpha$  muodostuvan tasokorjauksen mittauspisteestä lähdepisteeseen. Eri ohjeet ovat periaatteiltaan samankaltaisia, mutta mm.  $TL$ :n arviointi, veden syvyysvaatimukset sekä pintaheijastuksen huomiointi voivat olla erilaisia. Yhtälössä (1) oleva luku  $N$  on ideaalilla palloaallolla 20 ja sylinteriaallolla 10. Ohjeissa annetaan lähtöoletuksia  $N$ :lle

sekä menetelmiä sen määrittämiseen. Suurikokoisen lähteen melupäästön määrittämisen kannalta lähteen pisteeksi normalisointi on sinänsä tarpeeton traditio.

Mittausten taajuusalue ulottuu jopa 100 kHz saakka. Lähdetaso voidaan esittää 1 Hz kaisalla [7], vaikka mittaukset olisi tehty 1/3-oktaaveittain. Pintaheijastuksen vaikutus voidaan myös yrittää poistaa ("Dipole level" -> "Monopole level"). Lähdetason ohella käytetään myös suuretta "Radiated Noise Level" (RNL), joka on lähinnä Lähdetasoa karkeammin normalisoitu esim. palloaalto-oletuksella.

Kuvassa 2 on esimerkki Allure of the Seas -risteilijän mittauksista [11]. Mittaukset toteutettiin pääosin 130 m syvässä vedessä käyttäen kahta hydrofonia. Syvyys ei täyttänyt menetelmän [9] vaatimuksia (epätarkimmalla menetelmällä vaadittiin vähintään aluksen mita 360 m). Mittaustulos määritettiin ajanjaksolta, jolla ohiajava alus kulki asemasta  $-30^\circ$  asemaan  $+30^\circ$  mitattuna suoralta linjalta ( $0^\circ$ ) hydrofoneista aluksen keskikohtaan. Viitteessä [12] on tuloksia jäänmurtaja Polariksen lähdetason määrittämisestä matalammassa vedessä DNV-menetelmän mukaan sekä eri tekijöiden vaikutuksesta lukuun  $N$ .



Kuva 2. Vedenalaisen melun mittausasetelma, Allure of the Seas [11].

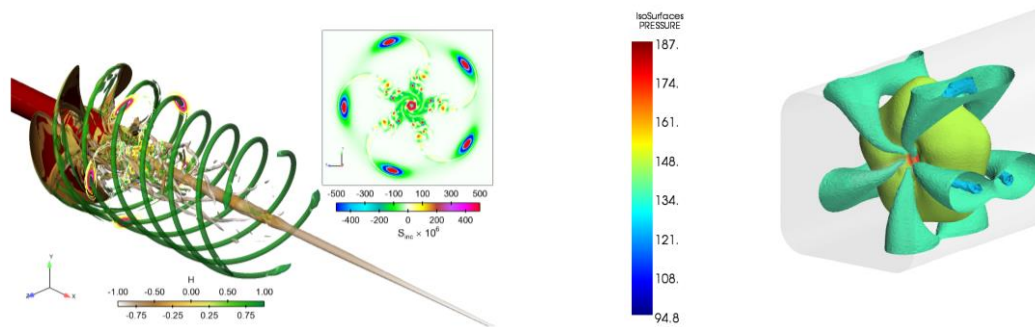
## 4 LAIVAN MELUPÄÄSTÖN SIMULOINNISTA

Laivojen tuottamaa melupäästöä voidaan arvioida simuloimalla virtausilmiöitä potkureissa ja aluksen rungon pinnoissa, simuloimalla aluksen rungon rakenteiden värähtelyjä sekä simuloimalla äänen etenemistä vedessä. Kehittyneet tietokoneet ja numeeriset laskentamenetelmät mahdollistavat näiden kytkettyjen ilmiöiden tehokkaan simuloinnin.

### 4.1 Potkurin äänensäteily

Kavitoimattoman potkurin melu sisältää lapataajuuden ja sen harmonisia, turbulenssin ja jättöreunan pyörteiden aiheuttamaa laajakaistaista melua sekä tonaalista melua virtauksen pyörreosan ja lavan ominaistuuksien yhteisvaikutuksena [13]. Suuremmilla laivanopeuksilla kavitaatio kasvattaa melun tasoa huomattavasti. Kavitaatiokuplien kehittyminen ja romahtaminen aiheuttaa laajakaistaista melua. Kavitaatiokuplien tilavuusvaihtelu vahvistaa lapataajuista melua ja sen harmonisia.

Potkurin aiheuttama hydrodynaaminen turbulентtinen virtauskenttä voidaan ratkaista laskennallisen virtaustekniikan menetelmin CFD:llä (Computational Fluid Dynamics). Ratkaisusta muodostetaan monopoli, dipoli ja quadropoli lähde-termit akustisia analogioita käyttäen [14]. Lähde-termit voidaan syöttää esimerkiksi elementtimenetelmämalliin (FEM) jolla simuloidaan äänikentän käyttäytymistä aluksen rungon läheisyydessä [15-17].

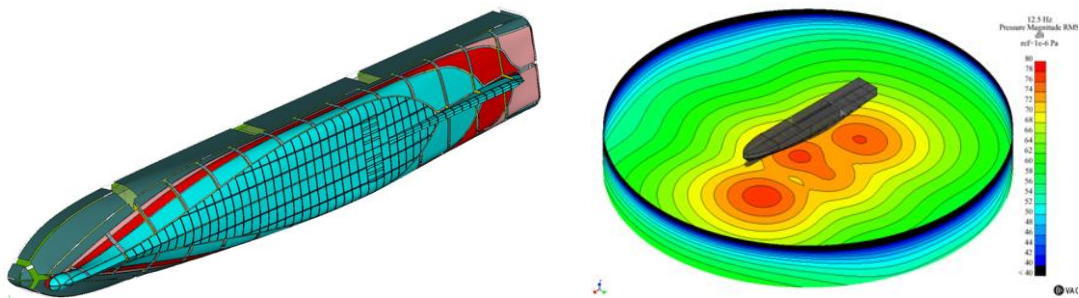


Kuva 3. Esimerkki kavitoivan potkurin virtaussimuloinnista, kavitaation aiheuttamista akustisista lähteistä ja vastaavasta äänikentästä lapataajudella.

## 4.2 Aluksen rakenteiden äänensäteily

Rakenteiden äänensäteilyn koko syntyketju veteen saakka tulee tuntea. Herätteitä ovat kavitoivan potkurin lisäksi mm. pääkoneet, vaihteet, generaattorit, pumput ja sähkökoneet. Herätetietojen saaminen on usein haastavinta. Joskus tyydytään laskemaan yksikköherätteillä (1W, 1N). Semi-empiriiset menetelmät olivat ennakkoinnissa vallitsevia 1980-luvulle saakka. Ne perustuivat koottuun mittaustietoon tyyppirakenteista ja värähtelyn vaimentumisesta niiden välillä. Tämän jälkeen Tilastollinen Energia-Analyysi (SEA) alkoi yleistyä [18, 19]. Nykyään SEA palvelee suurten taajuuksien menetelmänä ja elementtimenetelmä FEM, yhdistettynä äänensäteilymalliin, pienten taajuuksien menetelmänä. Muitakin menetelmiä sovelletaan.

Kuvassa 4 on erään noin 175 m pitkän aluksen SEA-malli sekä saman aluksen FEM/BEM-mallilla simuloitu äänikenttä [20]. Malleissa ei ole mukana aluksen ylärakenteita. FE-pohjaiset mallit olivat tässä tapauksessa mielekkäitä noin 50-100 Hz saakka ja SEA tämän jälkeen. Jopa 75%:a laivan painosta voi olla varustelua ja lastia, joita on vaikea sijoittaa malliin täsmällisesti. Laiva onkin tyyppiesimerkki kompleksisesta järjestelmästä [21].



Kuva 4. Vasemmalla laivan SEA-malli (1350 osajärjestelmää, joista 190 akustisia tiloja). Oikealla laivan FEM+BEM -mallilla laskettu ja visualisoitu äänikenttä 50 m syvässä vesialueessa, jonka halkaisija on 400 m. Lloyd's efekti on selvästi nähtävissä.

## 4.3 Äänen eteneminen vedessä

Erilaisten vedenalaisakustiikkaan soveltuviin äänen etenemismallien soveltuvuusalueita on esitetty kuvassa 5. Mallit on luokiteltu perustuen niiden kykyyn ennustaa äänen etenemistä matalassa tai syvässä vedessä ja niiden soveltuvuuteen pienien tai suurten taajuuksien hallintaan. Tyypillisesti 200 m maksimisyvyyttä on käytetty matalien vesien tarkasteluissa. Pienten ja suurten taajuuksien rajataajuus 500 Hz on jossain määrin mielival-

tainen. Se on vain karkea raja, jonka yläpuolisilla taajuuksilla monet aaltoteoreettiset mallit ovat laskennallisesti vaativia ja jonka alapuolisilla taajuuksilla jotkut sädeteoriaan pohjautuvat mallit voivat olla kyseenalaisia niiden formuloinnissa käytettyjen oletusten takia. Mallit on lisäksi luokiteltu etäisyysriippumattomiin (vain syvyysriippuvat) ja etäisyysriippuviin malleihin, etäisyysriippuvuuden tarkoittaessa äänen nopeuden tai syvyyden muutoksia etäisyyden funktiona. On myös olemassa hybridimalleja, joissa useampia lähestymistapoja on käytetty.

Model type	Applications							
	Shallow water				Deep water			
	Low frequency		High frequency		Low frequency		High frequency	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray theory	○	○	◐	●	◐	◐	●	●
Normal mode	●	◐	●	◐	●	◐	◐	○
Multipath expansion	○	○	◐	◐	◐	◐	●	◐
Fast field	●	◐	●	◐	●	◐	◐	◐
Parabolic equation	◐	●	○	○	◐	●	◐	◐

Low frequency (<500 Hz)  
High frequency (>500 Hz)

RI: Range-independent environment  
RD: Range-dependent environment

- Modeling approach is both applicable (physically) and practical (computationally)
- ◐ Limitations in accuracy or in speed of execution
- Neither applicable nor practical

Kuva 5. Äänen etenemismallien soveltuvuusalueita vedenalaisakustiikassa [22-23].

Etäisyysriippumattomia malleja voi käyttää myös etäisyysriippuvissa tilanteissa käyttäen esimerkiksi paloittain vakiosyvyisiä diskreettejä etäisyysintervalleja [22]. Matalassa vedessä ja erityisesti lyhyillä etäisyyksillä äänen nopeuden spatiaalivaihteluiden vaikutukset ovat yleisesti paljon vähäisempiä kuin pohjan impedanssin vaikutus etenemiseen, jolloin pohjan sedimenttirakenteen tarkka tuntemus on oleellisen tärkeää [24].

U.S. Office of Naval Research –instituutin tukemasta kirjastosta Ocean Acoustic Library [25] löytyy kokoelma avoimen koodin etenemismalleja, erityisesti GNU:n julkisen lisenssin alla olevasta Acoustic Toolbox –osiosta [26].

## 5 YHTEENVETO JA KIITOKSET

Paperissa esitettiin läpileikkaus VTT:llä tehdystä ja tehtävästä laivojen vedenalaismelua koskevasta julkisesta tutkimuksesta. Aineisto ja esimerkit ovat FIMECC/EFFIMA/SEEÉ projektista *Unno*, TEKES-projektista *Propnoise* sekä VTT:n omarahoitteisista projekteista.

## VIITTEET

- [1] <https://dosits.org/people-and-sound/history-of-underwater-acoustics/>
- [2] Urick, R.J. Principles of underwater sound. 3rd edition, Peninsula Publishing 1983.
- [3] Principles and applications of underwater sound. Summary technical report of division 6, NDRC, Volume 7. Washington, D. C., 1946. Ed: Carl Eckart.
- [4] Ross, D. Mechanics of underwater sound. Peninsula Publishing 1987.
- [5] Underwater noise of research vessels. Review and recommendations. Co-operative research report No. 209. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen 1995. Ed: R.B.Mitson.
- [6] DNV, Silent class notation. Rules for classification of ships, Part 6 Chapter 24 (2010)
- [7] Bureau Veritas, Underwater radiated noise (URN). Rule note NR614 DT R00 E (2014)
- [8] Guide for the classification notation. Underwater noise. American Bureau of Shipping, July 2018.
- [9] ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1, Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships — Part 1: General requirements.
- [10] 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. 24 p.
- [11] Lankila, A. Full scale underwater noise measurements. VTT-R-03893-11. 89 p. 2011.
- [12] Sipilä, T., Viitanen, V., Uosukainen, S. Klose, R. (2019). Shallow water effects on ship underwater noise measurements. Internoise 2019. Madrid, Spain.
- [13] Fisher, R. & Collier, R., Noise Prediction and prevention on ships. In: Crocker, M. (ed.), Handbook of Noise and Vibration Control. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2007.
- [14] Uosukainen, S. (2011). Foundations of acoustic analogies. (VTT Publications; No. 757). Espoo: VTT. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2011/P757.pdf>
- [15] Hynninen, A., Tanttari, J., Viitanen, V., & Sipilä, T. (2017). On predicting the sound from a cavitating marine propeller in a tunnel. In Fifth International Symposium on Marine Propulsors: SMP '17 (International Symposiums on Marine Propulsors). Espoo, Finland.
- [16] Viitanen, V., Hynninen, A., Lübke, L., Klose, R., Tanttari, J., Sipilä, T., & Siikonen, T. (2017). CFD and CHA simulation of underwater noise induced by a marine propeller in twophase flows. In A. Sánchez-Caja (Ed.), Proceedings of the Fifth International Symposium on Marine Propulsors: SMP '17 (International Symposiums on Marine Propulsors). Espoo, Finland.
- [17] Viitanen, V. M., Hynninen, A., Sipilä, T., & Siikonen, T. (2018). DDES of wetted and cavitating marine propeller for CHA underwater noise assessment. Journal of Marine Science and Engineering, 6(2), [56]. <https://doi.org/10.3390/jmse6020056>.
- [18] Plunt, J. Methods for predicting noise levels in ships, Part II. PhD Thesis. Chalmers University of Technology. 1980.
- [19] Hynnä, P. Laivan potkuri äänilähteenä ja runkoäänen etenemisen ennustemenetelmiä. VTT Tutkimuksia 472. Espoo 1987. 129 p.
- [20] Tanttari, J. Simulation of underwater sound radiation from ship structures in full frequency range. VTT-R-00724-12. 76 p. 2012.
- [21] Shorter, P.J. & Langley, R.S. Vibro-acoustic analysis of complex system, Journal of Sound and Vibration, Vol. 288(2005), p. 669-699.
- [22] Etter, P. C., Review of ocean-acoustic models. OCEANS 2009. 6 p.
- [23] Etter, P. C., Underwater Acoustic Modeling and Simulation. CRC Press, 2013.
- [24] Farcas, A., Thompson, P. M. & Merchant, N. D., Underwater noise modelling for environmental impact assessment. Environmental Impact Assessment Review 57(2016), pp. 114–122.
- [25] <http://oalib.hlsresearch.com/>
- [26] <http://oalib.hlsresearch.com/Modes/AcousticsToolbox/>