Tampereen yliopisto

Ilkka Suortti

SYVYYTETTÄVÄN KAIKUMITTAIMEN AKUSTISEN IKKUNAN OMINAISUUKSIEN MITTAAMINEN JA MATERIAALIVALINTA

Diplomityö
Materiaaliopinlaitos
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Ilkka Suortti: SYVYYTETTÄVÄN KAIKUMITTAIMEN AKUSTISEN IKKUNAN OMINAISUUKSIEN MITTAAMINEN JA MATERIAALIVALINTA
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Tässä työssä tutkittiin syvyytettävän kaikumittaimen (VDS) akustisen ikkunan valintaan liittyvää problematiikkaa ja suoritettiin akustisia allasmittauksia valituille näytepaneeleille. Ongelmaa lähestyttiin tutkimalla ääniaallon etenemistä merenalaisessa ympäristössä, mikä on perustana onnistuneelle kohteen paikannukselle. Ääniaaltojen etenemisen tunnistaminen kiinteissä aineissa ja niiden rajapinnoissa tapahtuvat ilmiöt muodostivat työn kannalta tärkeimmän kokonaisuuden. Etenemis- ja heijastusvaimennusteorioiden ja akustisiin mittauksiin liittyvien teorioiden perusteella rakennettiin yhteistyöyrityksen tiloihin akustisiin mittauksiin soveltuva mittausympäristö. Työssä myös pohdittiin VDS:n akustiseen ympäristöön liittyviä ilmiöitä ja niiden vaikutuksia VDS:n suorituskykyyn.

Mittaustulosten ja esiselvityksen perusteella annettiin suosituksia tulevaa VDS:n akustisen ikkunan materiaalivalintaa varten ja ehdotuksia mittausympäristön kehittämiseksi. Tulosten perusteella voidaan suositella kuituvahvistettua komposiittirakennetta, jossa kuituna käytetään meriolosuhteisiin soveltuvaa korkean suorituskyvyn kuitua. Akustisen ikkunan matriisin kuitumateriaaliksi voisi soveltua UHMWPE-kuitu. Kuidun etuna on alhainen tiheys, joka mahdollistaa akustisen impedanssin sovittamisen mahdollisimman lähelle veden akustista impedanssia. Rakenteellisena osana akustinen ikkuna vaikuttaa merkitsevästi VDS:n akustiseen ympäristöön ja vaikutuksien onnistunut arviointi on edellytys laitteen tarkalle toiminnalle.

Avainsanat: akustinen impedanssi, VDS, etenemisvaimennus, heijastusvaimennus, vedenalainen paneelimittaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Ilkka Suortti: MEASUREMENTS OF VARIABLE DEPTH SONAR ACOUSTIC WINDOW CHARACTERISTICS AND MATERIAL SELECTION
Master's Thesis
Tampere University
Master of Material Science's
April 2020

In this thesis, the problem of variable depth sonar (VDS) acoustic window selection was investigated and acoustic open pool measurements were performed on selected sample panels. The problem was approached by studying the propagation of the sound wave in the submarine environment, which is the basis for successful positioning of the target. The identification of the propagation of sound waves in solids and the phenomena occurring at their interfaces formed the most important part of the work. Based on transmission loss and reflection loss theories and theories related to acoustic measurements, a measurement environment suitable for acoustic measurements was built on the premises of the partner company. Phenomena related to the acoustic environment of VDS and their effects on VDS performance were also considered in the work.

Based on the measurement results and the preliminary study, recommendations were made for the future material selection of the VDS acoustic window and suggestions for the development of the measurement environment. Based on the results, a fiber-reinforced composite structure using a high-performance fiber suitable for marine conditions can be recommended. UHMWPE fiber could be suitable as the fibrous material for the acoustic window matrices. The advantage of the fiber is the low density, which allows the acoustic impedance to be adjusted as close as possible to the acoustic impedance of the water. The acoustic window, as a structural part, has a significant effect on the acoustic environment of the VDS and a successful impact assessment is a prerequisite for the accurate operation of the device.

Keywords: acoustic impedance, variable depth sonar, transmission loss, reflection loss, underwater acoustic panel measurements

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty yhteistyössä Patrian ja Tampereen yliopiston kanssa vuonna 2019-2020.

Työtä ovat ohjanneet kehitysjohtaja Arto Laine (Patria Aviation Oy) ja Tampereen yliopiston materiaaliopin laitoksen apulaisprofessori Essi Sarlin, joka toimi myös työn tarkastajana. Haluan kiittää Patria Aviation Oy:tä ja Arto Lainetta mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisen ja haastavan aiheen parissa. Kiitos kuuluu myös Patrian henkilöstölle, joilta olen saanut apua työn eri vaiheissa.

Arvokkaita neuvoja ja rohkaisevaa palautetta olen saanut teollisuusakustiikan erikoisasiantuntija Esa Nousiaiselta (A-Insinöörit). Työssä on auttanut pyyteettömästi myös tekn. kand. Mika Pihlajamäki. Haluan kiittää heidän lisäkseen Tampereen yliopiston materiaaliopin laitoksen muovien ja elastomeerien tutkimusryhmän henkilöstöä, joihin sain tutustua siellä työskennellessäni.

Haluan kiittää myös Mirella Korhosta, tytärtäni Fionaa ja vanhempiani heidän antamastaan tuesta, avusta ja rakkaudesta.

Tampereella, 23.4.2020

Ilkka Suortti

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. VEDENALAINEN AKUSTIIKKA 3
2.1 Meri akustisena ympäristönä 3
2.1.1 Leviämisvaimennus 9
2.1.2 Äänen absorptio meressä 9
2.1.3 Äänen heijastuminen ja sironta meren pinnasta ja pohjasta 11
2.2 Ääniaallot kiinteissä aineissa 14
2.3 Ääniaallon vaimeneminen ja rajapinnoissa 16
2.4 Epäsuoran tasoaallon heijastuminen ja eteneminen levyn läpi 19
2.5 Ääniaallon absorboituminen materiaaliin 20
2.6 Akustinen vaimennuskerroin 23
3. MATERIAALIT 25
3.1 Materiaalien valinta 25
3.2 Näytteiden määrä, koko ja ominaisuudet 26
4. PANEELITESTI VESIALTAASSA 29
4.1 Akustisen mittaamisen yleiset periaatteet altaassa ja tankissa 29
4.2 Akustiset mittaustavat ja pelkistetyn paneelitestin malli 34
4.3 Mittausjärjestelmän rakentaminen 35
4.4 Mittaaminen ja mittauksista saatava data 40
4.5 Tulosten luotettavuus ja virhelähteet paneelitestissä 44
5. MITTAUSTULOKSET 47
5.1 Ensimmäisen mittausympäristön mittaustulokset 47
5.2 Toisen mittausympäristön tulokset 48
5.3 Äänennopeus ja tiheys 53
6. TULOSTEN ANALYSOINTI 55
6.1 Mittausympäristö-1 55
6.2 Mittausympäristö-2 56
6.3 Mittaustulosten tulkinta 57
7. JOHTOPÄÄTÖKSET 62
7.1 VDS:n akustisen ympäristön tunnistaminen 62
7.2 Mittausympäristön kehitys 64
7.3 Materiaalin valintaan vaikuttavia muita tekijöitä 64
7.4 Vaihtoehdot kuoren materiaaliksi ja jatkotoimenpiteet 65
LÄHTEET 67
LIITE 1: VDS JA MATERIAALIEN OMINAISUUDET 74

LIITE 2: MITTAUSTULOKSET 1, MITTAUSYMPÄRISTÖ-1, TAAJUUSALUE 5,5–15,5 KHZ 75
LIITE 3: MITTAUSTULOKSET 2, MITTAUSYMPÄRISTÖ-1, TAAJUUSALUE 10–80 KHZ 78
LIITE 4: MITTAUSTULOKSET 3, MITTAUSYMPÄRISTÖ-2, TAAJUUSALUE 10–100 KHZ 80

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	amplitudi
A_S	vastaanotetun signaalin amplitudi näytteellä
A_W	vastaanotetun signaalin amplitudi ilman näytettä
$B(OH)_3$	boorihappo
CFRP	hiilikuitukomposiitti
D	lähettimen suurin dimensio
E	kimmomoduuli
FEM	Finite Element Method
FPM	fluorikumi
G	leikkausmoduuli
GFRP	lasikuitukomposiitti
GnPs	grafeeninanohiutaleita
H	altaan korkeus
HFBL	High-Frequency Bottom Loss
Hz	hertsi
H_2O	vesi
I	akustinen intensiteetti
I_0	akustinen intensiteetti referenssietäisyydellä
$MgSO_4$	magnesiumsulfaatti
NBR	akryylinitriili-butadieeni
L	testialtaan pituus
LFBL	Low-Frequency Bottom Loss
P	paineamplitudi
PBO	(poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole)
PC	polykarbonaatti
PE-HD	suuritiheyksinen polyeteeni
PPT	parts per thousand
PUR	polyuretaani
Q	hydrofonin laatukerroin
R	heijastusvaimennuskerroin
RL	heijastusvaimennus (Reflection Loss)
S	suolapitoisuus
S_{CH}	Chapman-Harris-mallin mukainen äänen vaimeneminen
T	etenemisvaimennuskerroin
TL	etenemisvaimennus (Transmission Loss)
U	tuulen nopeus solmuissa
UHMWPE	erittäin korkea molekyylipainoinen polyeteeni
V	voltti
VDS	Variable Depth Sonar, syvyytettävä kaikumittain
W	testialtaan syvyys
Z	akustinen Impedanssi
Z_a	poikittainen akustinen impedanssi
Z_s	pitkittäinen akustinen impedanssi
Z_w	veden akustinen impedanssi
c	äänen nopeus
c_b	taivutusaallon etenemisnopeus levyssä
c_t	poikittaisen aallon etenemisnopeus
c_l	pitkittäisen aallon etenemisnopeus
c_w	äänen nopeus vedessä

c_0	äänennopeus (ω=0)
d	mittausetäisyys
dB	desibeli
f	taajuus
f_c	kriittinen taajuus
f_m	relaksaatiotaajuus magnesiumsulfaatille
f_b	relaksaatiotaajuus boorihapolle
k	veden aaltoluku
k_1	pitkittäisen ääniaallon aaltoluku
k_2	aaltoluku
h	levyn paksuus
m	massa
m_ρ	pintatiheys
p	paine
pH	happamuus
r	materiaalin karakteristisen akustisen impedanssin suhde veden karakteristiseen akustiseen impedanssiin
r_F	Fresnelin etäisyys
t_{min}	pulssin minimipituus
Δt	signaalien aikaero
α	vaimennuskerroin
α_l	pitkittäinen vaimennuskerroin
α_t	poikittainen vaimennuskerroin
α_{vesi}	absorptiokerroin
$\alpha_{kem.}$	kemiallinen absorptiokerroin
α_R	viskoelastisten relaksaatioiden absorptiokerroin
α_η	viskositeettinen absorptiokerroin
α_χ	lämmöstä johtuva absorptiokerroin
β	tuulen vaikutuskerroin Chapman-Harris-mallissa
ε_i	relaksaation voimakkuus
z	syvyys
η’	leikkausviskositeetin kerroin
η’’	tilavuusviskositeetin kerroin
θ	ääniaallon tulokulma
θ_c	kriittinen kulma
κ	poikittaisen ääniaallon aaltoluku
λ	aallonpituus
ν	Poissonin vakio
ξ	aaltoluvun horisontaalinen komponentti
ξ_s	aaltoluvun symmetrinen komponentti
ξ_a	aaltoluvun epäsymmetrinen komponentti
ρ	tiheys
ρ_1	levyn tiheys
χ	lämmönjohtavuus
ω	kulmataajuus
τ	pulssin pituus
τ_i	relaksaatioaika

.

1. JOHDANTO

Diplomityö on osa kaikuluotauslaitteistoon liittyvää projektia, jossa kehitetään aktiivista kaikuluotausjärjestelmää pinnanalaisen sukellusvenetoiminnan havaitsemiseksi. Luotausjärjestelmä koostuu kahdesta hinattavasta luotausjärjestelmästä, joista toinen on passiivinen ja toinen on aktiivinen. Aktiivinen järjestelmä lähettää luotausääniä, vastaanottaa lähettämiensä luotainäänien kaikuja ja kuuntelee myös muista lähteistä tulevia kaikuja ja ääniaaltoja. Passiivinen järjestelmä kuuntelee aktiivisen järjestelmän lähettämien luotausäänien kaikuja ja muita äänilähteitä. Molempien järjestelmien hinaussyvyyttä voidaan vaihdella merialueen äänennopeusprofiilien mukaan ja niitä voidaan käyttää itsenäisinä järjestelminä tai yhdessä. Liitteen 1 kuvassa 1 on esitetty havainnekuva järjestelmistä käyttöympäristössään.

Aktiivista luotausjärjestelmää kutsutaan syvyytettäväksi kaikumittaimeksi, mutta tässä yhteydessä käytetään lyhennettä VDS (Variable Depth Sonar). VDS:n kehitys on alkanut 1950-luvulla seurauksena sukellusvenetoiminnan uhasta ja oivalluksesta äänen etenemisestä merien eri kerroksissa. Merien äänen nopeusprofiileista havaittiin, että tietyssä syvyydessä ääniaallolla on mahdollista edetä pitkiä matkoja [1]. Sukellusveneiden häiveteknologian kasvaessa on VDS:n kehitystyö jatkunut näihin päiviin asti.

Yksi VDS:n tärkeistä komponenteista on sen kuori. Kuoren tehtävänä on suojella VDS:n sisällä olevaa luotauslaitteistoa. Hinauksen aikana kuoreen kohdistuu paine, joka ei saa johtaa kuoren muodon muutokseen. Luotauslaitteisto on lähellä kuorta ja kuoren lommahtaminen voisi vaurioittaa luotauslaitteistoa. VDS voi pinta-aluksesta suoritetun laskun aikana osua laivan rakenteisiin, se voi osua pohjaan ja siihen voi kohdistua iskuja meressä ajelehtivista objekteista. VDS:n operointinopeus voi olla yli 16 solmua ja niitä voidaan hinata jopa 250 metrin syvyydessä [2,3]. Meriympäristö tuo myös omat haasteensa kuoren materiaaliominaisuuksille. Mekaanisten ja ympäristöllisten vaatimuksien lisäksi VDS:n kuoren täytyy päästää luotausäänet ja kaiut mahdollisimman häviöttömästi läpi. Suojakuori ei saa heijastaa, sirottaa, absorboida tai vaimentaa äänisignaalia liikaa. Tämä voi johtaa luotausjärjestelmän kantaman heikkenemiseen ja kohteen sijainnin määrityksen vaikeutumiseen. VDS:n tulee myös uida äänettömästi hinausnopeudesta riippumatta. VDS:n suojakuoren muoto voi aiheuttaa ei-toivottuja virtausääniä, jotka vaikuttavat signaalien käsittelyyn. [4, s. 190-191]

Tämän diplomityön tarkoituksena on löytää suunta VDS:n kuoren tuotekehitykselle materiaalivaihtoehtojen suhteen. Materiaalivalinta ei ole helppo tehtävä, koska vaadittavien ominaisuuksien täydellinen saavuttaminen ei ole mahdollista. Materiaalivalinnassa joudutaan tukeutumaan ensisijaisesti mekaanisten ominaisuuksien vaatimuksien täyttymiseen. Akustiset ominaisuudet paranevat materiaalin karakteristisen akustisen impedanssin Z ollessa lähempänä veden akustista impedanssia. Materiaalin ja väliaineen akustinen impedanssi on tiheyden ρ ja äänennopeuden c tulo. Ne riippuvat materiaalin ominaisuuksista [5]. Homogeenisten materiaalien ja veden akustisen yhteensopivuuden parantuessa materiaalin mekaaniset ominaisuudet yleensä heikkenevät, mikä tuo suunnittelutyöhön haasteen [6]. Äänisignaalin vaimeneminen kuoressa on merkittävä tekijä, koska yhdenkin desibelin (dB) menettäminen vaimennukseen voi merkitä maksimikantamassa useiden satojen metrien menetystä. [7, s. 283–289]

Tässä työssä keskityttiin ymmärtämään VDS:n ympäristön ja kuorimateriaalin akustiikkaa. Työn teoreettinen viitekehys pitää sisällään tutustumisen ääniaallon etenemiseen vaikuttaviin tekijöihin meriympäristössä, kiinteässä materiaalissa esiintyviin aaltomuotoihin, äänen etenemiseen kiinteissä materiaaleissa ja niiden rajapinnoissa tapahtuviin ilmiöihin. Yksi työn tavoitteista oli suunnitella ja rakentaa yhteistyöyrityksen tiloihin mittausympäristö akustisia mittauksia varten. Akustisen mittausympäristön avulla haluttiin tutkia ohuiden paneelien etenemisvaimennusta (TL) ja selvittää, miten eri materiaalit vaimentavat ääntä halutulla taajuusalueella. Lopullisena tavoitteena on löytää vaihtoehtoja alumiiniselle suojakuorelle, jonka oletetaan vaimentavan lähetettyä ja vastaanotettua ääntä liikaa.

2. VEDENALAINEN AKUSTIIKKA

Vedenalainen akustiikka on tiede, joka tutkii ääniaaltojen etenemistä vedessä. Äänen etenemisen lisäksi vedenalainen akustiikka tutkii vedenalaisten häiriölähteiden vaikutusta signaaleihin ja kuinka signaalit voidaan erottaa häiriöitä aiheuttaneista ilmiöistä. Vedenalaisen akustiikan tutkimukseen ryhdyttiin panostamaan maailmansotien aikaan ja varsinkin kylmän sodan aikakautena. Silloinen tutkimus on keskittynyt vedenalaisen toiminnan seurantaan, mutta on myöhemmin laajentunut koskemaan kaupallisia sovelluksia ja vedenalaisen ympäristön tutkimista. Tyypillisiä vedenalaisen akustiikan tutkimuskohteita ovat muun muassa sukellusveneseuranta, merenpohjan tutkimus, kalastusteollisuus, merinisäkkäät, laivateollisuus, rakentaminen, voimalaitosteollisuus ja ihmisten toiminnan aiheuttamien vaikutuksien tutkiminen. [8, s. 1–3]

2.1 Meri akustisena ympäristönä

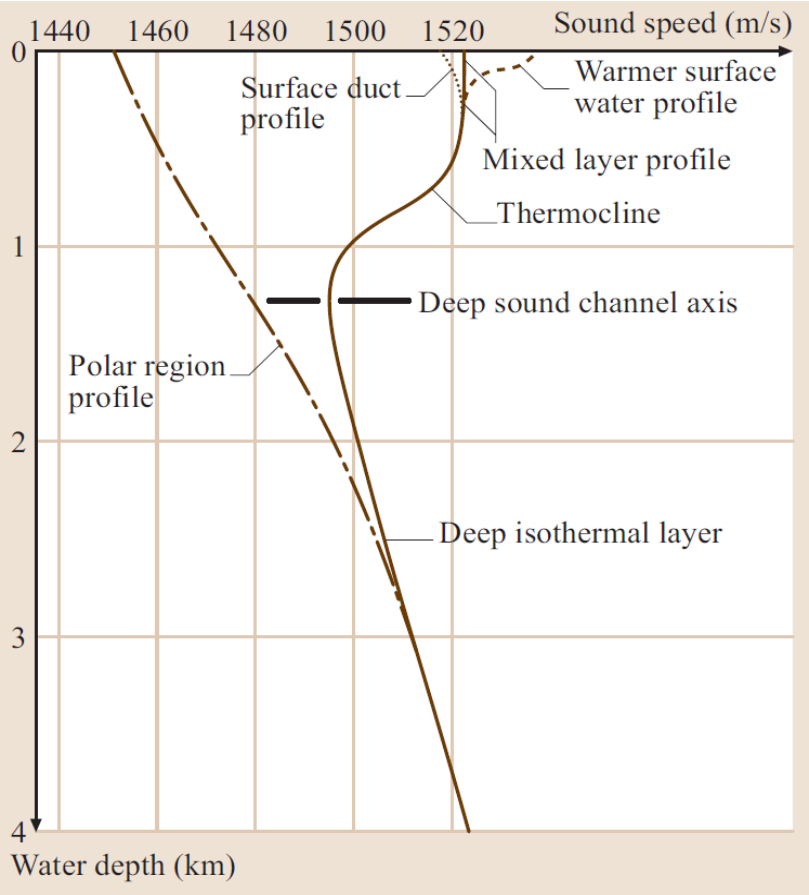
Ääniaallot voivat olla poikittaisia tai pitkittäisiä aaltoja. Koska vedellä ei ole leikkauslujuutta, ainoastaan pitkittäiset ääniaallot ovat merkityksellisiä vedenalaisen akustiikan tutkimuksessa. Äänen nopeudella (*c*) on yhteys taajuuden (*f*) ja aallonpituuden (λ*)* suhteen seuraavasti,

$$c = \lambda * f. \tag{1}$$

Ääniaallon nopeus vedessä on noin 1500 m/s, mutta todellisuudessa se on lämpötilan *T,* paineen *p* ja suolapitoisuuden *S* funktio. Suurin vaikutus äänen nopeuteen on lämpötilalla, joka kasvaessaan kasvattaa äänen nopeutta. Äänen nopeuden muutos ei ole kuitenkaan lineaarisesti verrannollinen lämpötilan muutoksen suhteen. Äänen nopeuden muutos on suurempaa matalissa lämpötiloissa ja sen merkitys pienenee lämpötilan kasvaessa. Lähellä 0 °C äänen nopeus kasvaa n. 4,6 m/s, mutta 20 °C enää vain 2,5 m/s. Järvissä ja merissä veden lämpötilavaihtelut voivat olla noin 30 °C. Paineen vaikutus äänen nopeuteen on suoraan verrannollista ja 100 metrin muutos syvyydessä kasvattaa äänen nopeutta noin 1,7 m/s. Äänen nopeuden muutos lämpötilan muuttuessa 30 °C:tta vastaisi se äänen nopeuden muutosta 5000 m:n syvyysvaihteluun. Suolapitoisuuden kasvaessa yhdellä tuhannesosalla äänen nopeus kasvaa noin 1,4 m/s [7, s. 1–6]. Tyypillisesti meren suolapitoisuus vaihtelee 33–37 ‰ välillä, mutta se voi vaihdella aina 28–40 ‰ välillä. Murtovesissä suolapitoisuus on alle 25 ‰ ja hypersuolaisissa merissä suolapitoisuus voi olla yli 40 ‰ [9, s. 29]. Äänen nopeuden määrittämiseksi on esitetty useita eri malleja, joissa termejä voi olla 6–23. Termit koostuvat edellä mainituista kolmesta

äänen nopeuteen vaikuttavasta tekijästä ja niihin liitettävistä kertoimista. Mallien tarkkuus vaihtelee 0,07–0,30 m/s välillä. Meri ei ole vakio edellä mainittujen muuttujien suhteen, niihin vaikuttavat virtaukset, vuodenajat ja paikalliset tekijät. Pitkän mittaushistorian ansiosta on pystytty luomaan erilaisia vuosittaisia keskiarvollisia syvyyteen, koordinaatteihin tai vuodenaikoihin yhdistettyjä profiileja merien suolapitoisuuksista, lämpötiloista ja äänen nopeuksista. [10. s. 25–37]

Kuvassa 1 on esitetty äänen nopeuden muutos syvyyden suhteen lämpimillä ja kylmillä merialueilla. Kylmillä polaarisilla merialuilla veden lämpötila pinnassa on lähellä 0 °C:tta ja koko lämpötilaprofiili rajoittuu -2 °C:seen. Äänen nopeuden muutos kyseisillä alueilla on enimmäkseen syvyyden määrittelemää. Lämpimillä merialueilla tuuli ja aallot sekoittavat vesimassaa, jolloin syntyy normaalia paksumpi ja lämpötilaltaan lähes vakio vesipatsas. Lämpötilaprofiili voi vaihdella myös vuorokauden mukaan, jolloin pimeän aikaan pintaveden lämpötila laskee. Aaltojen ja tuulen vaikutuksen heikentyessä vesimassan lämpötila alkaa laskea kohti paikallista minimiä, jolloin äänen nopeuden muutos on syvyyden määrittelemää. Lämpimillä merialueilla äänen nopeusprofiili on monimutkaisempi. [8, s. 4–5]

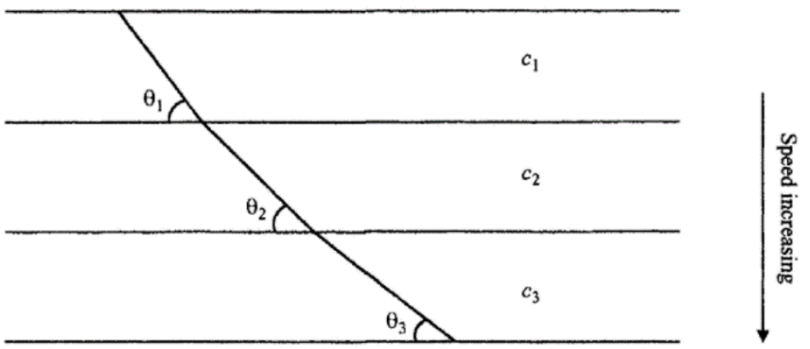


Kuva 1. *Äänen nopeuden muutos syvyyden suhteen lämpimillä ja kylmillä merialueilla. [8, s. 4]*

Ääniaallon kulkusuunnan määrittää äänen nopeusprofiilit vedessä. Ääniaallon taittumista voidaan kuvata Snellin lailla,

$$\frac{\cos\theta}{c} = vakio, \tag{2}$$

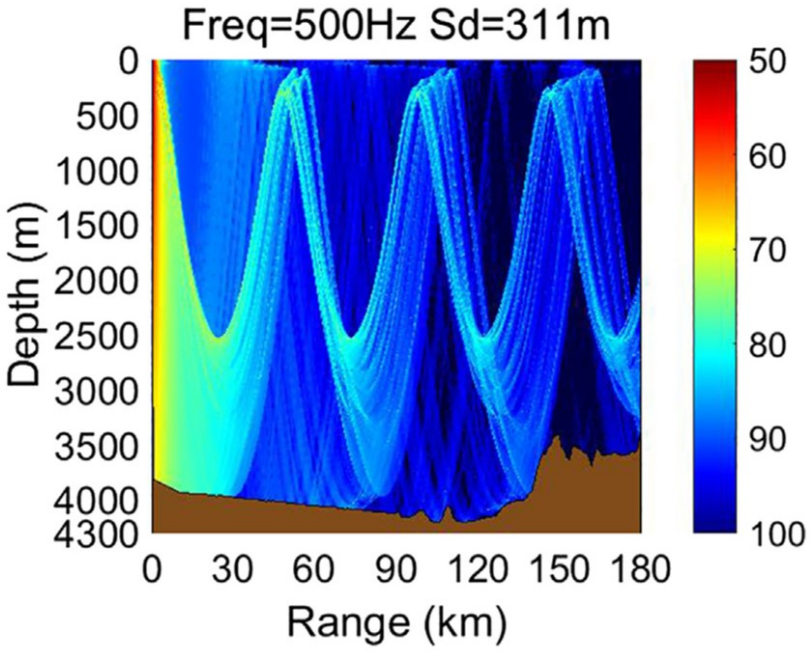
missä θ on ääniaallon tulokulma. Ääniaalto pyrkii kaareutumaan poispäin korkeammasta äänen nopeuden alueesta, kuten kuvasta 2 voidaan havaita. Äänen etenemistä vedessä voidaan arvioida laskennallisesti, koska ääniaallon kaarevuus voidaan määrittää äänen nopeuden gradientin perusteella. Äänen etenemiselle vedessä on useita eri malleja, joissa otetaan huomioon ääniaaltojen diffraktion, dispersion ja taajuuden vaikutukset ääniaallon kulkusuuntaan. [7], [11]



Kuva 2. *Ääniaallon taittuminen äänennopeusprofiilien rajapinnoissa. [11, s 59]*

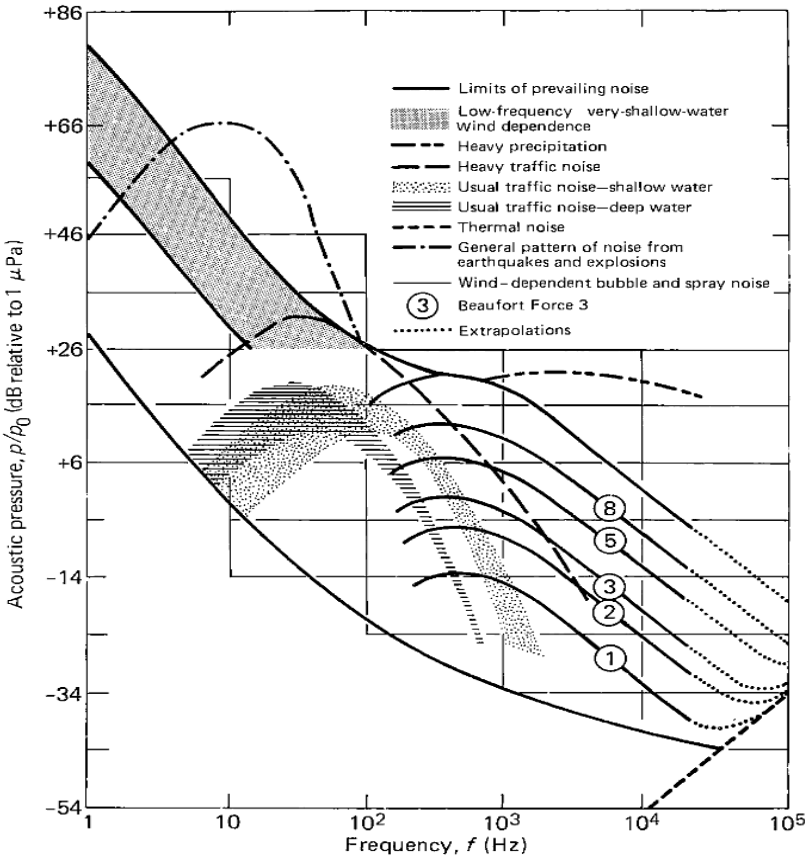
Äänennopeusprofiili syvyyden funktiona luo syvillä merialuille äänen etenemiselle pintakanavan ja syväkanavan. Pintakanavassa ääniaalto ei pääse kanavasta ulos, koska äänen nopeus nousee syvyyden mukaan lämpötilan pysyessä vakiona. Ääniaalto kaareutuu pintaa kohden ja heijastuu pinnasta takaisin ja kaareutuu taas takaisin. Syväkanavassa on kyse samasta ilmiöstä, mutta äänen kulkua rajoittaa kaksi nopeampaa äänen nopeusaluetta kuvan 1 mukaisesti. [11, s. 52–55]

Syvillä merialueilla, riippuen ääniaaltojen lähtökulmasta ja syvyydestä, voi ääniaalto kulkea 30–50 km ilman heijastumisia. Ääniaallot kaareutuvat ylöspäin paineen vaikutuksesta ja eivätkä koskaan saavuta pohjaa. Ääniaallot keskittyvät ympyränmuotoiselle alueelle ja heijastuvat lopulta pinnasta takaisin toistaen kulkumalliaan. Ääniaaltojen keskittyminen yhdelle alueelle voimistaa äänen voimakkuutta ja heikentää veden ja leviämisvaimennuksen aiheuttamaa äänen vaimenemisen vaikutusta. Alueita nimitetään suppenemisvyöhykkeiksi ja ääniaaltojen keskittyessä suppenemisvyöhykkeelle jää suppenemisvyöhykkeiden väliin kaikuluotauksen suhteen pimeitä kohtia. Ääniaaltojen keskittymisilmiöön syvillä merialuilla vaikuttaa meren lämpötilaprofiili, jossa täytyy olla kriittinen syvyys. Kriittisessä syvyydessä lämpötila on sama kuin pintalämpötila. Kriittinen syvyys on myös samalla syvän äänikanavan alaraja, muutoin se on meren pohja. Talvikaudella pintalämpötilan ollessa kylmempi voi suppenemisvyöhykkeiden syntyminen olla mahdollista matalammissa vesissä syntyvistä äänilähteistä [12, s. 104–117]. Kuvassa 3 on havainnollistettu suppenemisvyöhykkeiden muodostumista. Malli on tehty Etelä-Kiinan merellä ja äänilähde on ollut 311 metrin syvyydessä. Kuvasta nähdään, että suppenemisvyöhykkeet muodostuvat noin 50 km:n välein ja äänen intensiteetti ei juurikaan muutu. Äänen intensiteetin muutosta kuvassa on havainnollistettu värikoodilla. Kuvasta voidaan nähdä myös suppenemisvyöhykkeiden väliin jäävät pimeät kohdat. [13]



Kuva 3. *Suppenemisvyöhykkeiden muodostuminen ja äänen intensiteetin muutos. [13]*

Merien ja järvien äänimaailmassa on luonnollisia ja ihmisen toiminnasta johtuvia ääniä. Luonnolliset äänet ovat peräisin turbulenssista, aalloista, seismisestä toiminnasta, sateesta, eliöstöstä ja jäiden liikkeistä. Jokaisella näistä on omat taajuusalueet ja äänenpainetasot. Merkittävin ihmisen toiminnasta aiheutuva yksittäinen äänilähde on peräisin laivaliikenteestä. Laivaliikenteen äänet ovat taajuusalueella 10-5000 hertsiä (Hz), jossa äänenpaine vaihtelee 45-90 dB:n välillä. Ruuhkaisilla alueilla laivaliikenne dominoi vedenalaista äänimaailmaa. Taustamelu vaihtelee paikallisesti, koska melua aiheuttavia tekijöitä on paljon. Esimerkiksi sääolosuhteet ja laivaliikenne voivat muuttua tunneissa. Suurin osa taustamelusta syntyy lähellä pintaa, joten sen voimakkuus laskee syvyyden mukaan. Korkeataajuinen taustamelu vaimenee nopeasti syvyyden kasvaessa, koska se absorboituu veteen matalia taajuuksia tehokkaammin. Vedenalaisen taustamelun tutkiminen ja mittaaminen alkoi yleistyä passiivisten kaikuluotaimien ja akustisten miinojen yleistyessä, jolloin eri äänilähteistä tulevien äänten tunnistaminen korostui. Eri äänilähteiden taajuuksia ja äänenpainetasoja on havainnollistettu kuvassa 4. [7, s 127–140]



Kuva 4. *Meriympäristön taustamelun lähteet, taajuusalueet ja voimakkuudet. [14, s. 402]*

Ääni vedessä vaimenee ja muuttaa kulkusuuntaa useiden eri mekanismien vaikutuksesta. Äänen voimakkuuden määrittäminen meriympäristössä tietyssä paikassa tietyllä ajan hetkellä vaatii samanarvoisen jatkuvan äänitason mittauksen. Ääniaallot interferoivat toisiaan, jolloin ne voivat summautuessaan joko voimistua tai heikentyä. Samassa vaiheessa olevat ääniaallot vahvistavat toisiaan ja eri vaiheessa olevat ääniaallot puolestaan heikentävät äänen intensiteettiä. Yksittäisellä mittaushetkellä äänen voimakkuudet voivat siis vaihdella merkittävästi, vaikka kyse olisi jatkuvasta signaalista. Lyhytkestoisien signaalien vaimenemisen mittaamisessa on myös haasteita. Lyhytkestoiset signaalit voivat käyttää useita eri reittejä, jolloin ne voivat saapua perille eri aikaan. Paikasta riippuen signaalien saapumisaikojen aikaerot voivat olla 10–200 ms. Äänisignaalit voivat siten saapua perille osittain päällekkäisinä. Eri reitit voivat vaimentaa ääntä eri tavalla, joten signaalien intensiteeteissä voi olla eroja. Etenemisvaimennus (TL) voidaan laskea kaavalla,

$$TL = -10\log\left(\frac{I(R,z)}{I_0}\right) = -20\log\left(\frac{|p(R,z)|}{|p_0|}\right), \quad (3)$$

missä I_0 on akustinen intensiteetti referenssietäisyydellä, I akustinen intensiteetti, p äänenpaine, p_0 äänenpaine referenssietäisyydellä, R on etäisyys ja z on syvyys.

Etenemishäviö määritellään äänen intensiteetin häviönä mitattavan pisteen ja referenssipisteen välillä. Etenemishäviö voidaan ilmoittaa desibeleinä suhteessa referenssipituuteen. [7, s. 75–76]

Etenemishäviö voidaan jakaa kahteen osaan, joista toinen on geometrisestä etenemisestä johtuva leviämisvaimennus. Toiseen osaan kuuluu absorptiosta, heijastumisesta ja sironnasta johtuva vaimennus. Geometriseen vaimenemiseen vaikuttavat äänen taittumisesta aiheutuva ääniaaltojen poikkeaminen tai kasautuminen, pohja- ja pintaheijastukset ja monitiehäiriöt. Muuta vaimenemista voivat tehostaa epähomogeenisyyttä lisäävistä tekijöistä johtuvat diffraktio ja sironta [14, s.437]. Kaikuluotauslaitteiston suunnittelussa molempien elementtien tuntemus on tärkeää, jotta voidaan arvioida laitteiston kuoren aiheuttamaa äänen vaimennusta suhteessa laitteiston suorituskykyyn. [15, s. 221–226]

2.1.1 Leviämisvaimennus

Jos oletetaan vesi homogeeniseksi ympäristöksi, missä äänen nopeus on vakio ja äänen etenemiselle ei ole esteitä, voidaan todeta äänen etenevän pallosymmetrisesti. Energian säilymisen takia äänen intensiteetti pinta-alaa kohden tulee olla vakio millä tahansa etäisyydellä,

$$I(R)4\pi R^2 = I_0 4\pi R_0^2, \tag{4}$$

missä R on etäisyys ja R_0 on etäisyys referenssipisteestä. Leviämisvaimennus on symmetristä ja se voidaan ilmaista seuraavasti,

$$TL_s = 20\log(R), \text{ jos } R_0 = 1\,m. \tag{5}$$

Pallosymmetrinen eteneminen rajoittuu pohjan ja pinnan välille. Jos heijastumisista johtuvaa vaimennusta tai sirontaa ei tapahtuisi, ääniaallon energia rajoittuisi vakiokorkeuden omaavan lieriön sisään. Tämä tarkoittaisi sitä, että leviämisvaimennus olisi määritettävissä suhteen *1/R* mukaan. [7, s. 91–92)

2.1.2 Äänen absorptio meressä

Ääni absorboituu meriveteen viskositeetin ja kemiallisten relaksaatioiden vaikutuksesta. Meriveden viskositeettiin vaikuttaa lämpötila ja suolapitoisuus. Viskositeetista johtuva absorptio on voimakkaampaa ja merkityksellisempää korkeammilla taajuuksilla (>1 MHz) kuin kemiallisesta relaksaatiosta johtuva absorptio. Kemiallisella relaksaatiolla tapahtuvan absorption merkityksellisyys korostuu matalilla taajuuksilla (<300 kHz). Kemialliseen

relaksaatioon perustuvaan absorptioon vaikuttavat lämpötilan ja suolapitoisuuden lisäksi paine ja happamuus. Vedelle voidaan määrittää absorptiokerroin (α_{vesi}), joka ilmaistaan yksiköllä dB/km. Absorptiokerroin koostuu viskositeetin (α_{η}) ja kemiallisen relaksaation ($\alpha_{kem.}$) absorptiokertoimista seuraavasti,

$$\alpha_{vesi} = \alpha_{\eta} + \alpha_{kem.} \quad (6)$$

Äänen absorptiokertoimelle merivedessä on useita empiirisiä malleja, jotka ovat suunniteltu toimimaan esimerkiksi tietyllä taajuusalueella, ovat paranneltuja malleja toisista malleista tai ovat suunniteltu tietylle merialueelle. Alle 100 Hz taajuuksilla tapahtuu vaimenemista suuruusluokaltaan 0,0002–0,004 dB/km ja sen syytä ei ole vielä pystytty selittämään. Kemialliseen relaksaatioon liittyvät yhdisteet ovat magnesiumsulfaatti ($MgSO_4$) ja boorihappo $B(OH)_3$, joihin perustuen Ainslie et al. [17] on luonut yhden monista malleista äänen absorptiokertoimelle,

$$\alpha_{vesi} = A_{Mg}(MgSO_4) + A_B(B(OH)_3) + A_{\eta}(H_2O) \quad (7)$$

missä A_n on jokaiselle yhdisteelle luotu kerroin,

$$A_{Mg} = 5{,}2 * 10^{-4}\left(1 + \frac{T}{43}\right)\left(\frac{S}{35}\right) {f_m}^{-z/6000} \text{dB/km}, \quad (8)$$

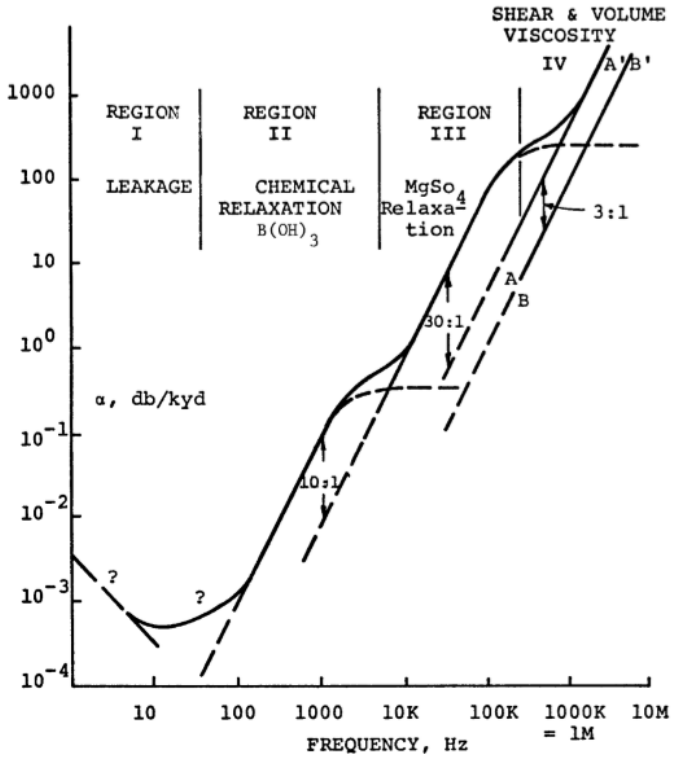
$$A_B = 1{,}06 * 10^{-4} f_b exp^{(pH-8)/0{,}56} \quad \text{dB/km}, \quad (9)$$

$$A_{\eta} = 4{,}9 * 10^{-4} \exp[-\left(\frac{T}{27} + \frac{z}{17000}\right)] \quad \text{dB/km kHz}^2, \quad (10)$$

missä T on lämpötila, S on suolapitoisuus, z on syvyys, f_m on magnesiumsulfaatin relaksaatiotaajuus ja f_b on boorihapon relaksaatiotaajuus. Äänen absorptioon vaikuttaville yhdisteille on lisäksi omat suolapitoisuuteen, taajuuteen ja lämpötilaan perustuvat mallinsa ja yhdistettynä yhtälöön 7 saadaan,

$$\alpha = A_{Mg}\frac{f^2}{f^2+f_m^2} + A_B\frac{f^2}{f^2+f_b^2} + A_{\eta.}f^2 \quad (11)$$

[16, s. 146–147]. Kuvassa 5 on esitetty, miten eri yhdisteet ja viskositeetti vaikuttavat äänen vaimennuskertoimeen eri taajuusalueilla. Kuvasta voidaan todeta, että boorihapon vaikutus äänen vaimentumiseen alkaa 100 Hz:n kohdalla ja on merkitsevin ääntä vaimentava elementti 10 kHz:iin asti. Tämän jälkeen magnesiumsulfaatin relaksaatiot vaimentavat ääntä 100k Hz:iin asti, jonka jälkeen äänen vaimeneminen merivedessä on viskositeettien dominoimaa.



Kuva 5. *Äänen absorptioon vaikuttavien tekijöiden vaikutus merivedessä eri taajuusalueilla. [12, s. 36]*

Äänen absorptiota voidaan siis arvioida lämpötilan, suolapitoisuuden, paineen, äänen taajuuden ja happamuuden funktioina. Absorptiomalleista on esitetty useita erilaisia paikkakohtaisia malleja. [12]

2.1.3 Äänen heijastuminen ja sironta meren pinnasta ja pohjasta

Meriveden fysikaalisten ominaisuuksien lisäksi ääniaallon vaimenemiseen vaikuttavat ääniaallon vuorovaikutukset pinnan ja pohjan välillä. Pintakanavassa eteneviin ääniaaltoihin vaikuttavat tuuliolosuhteet, jotka määrittävät merenpinnan aaltojen muodostumisen. Tasaisesta pinnasta ääniaallot heijastuvat lähes täydellisesti samalla muuttaen vaihettaan 180°. Heijastunut ääniaalto voi summautua suoraan lähteestä tulevan ääniaallon kanssa, jolloin ääniaalto voi joko vahvistua tai heikentyä. Ilmiötä kutsutaan Lloydin peiliefektiksi. Ilmiön voimakkuus riippuu taajuudesta, vuorovaikutuksessa olevien ääniaaltojen kulkureittien pituuksista, lähtö- ja kohtaamispisteiden syvyyksistä ja niiden välisestä etäisyydestä. Vuorovaikutuspiikkien esiintyvyys pienenee etäisyyden kasvaessa. Edellä mainittujen tekijöiden perusteella viimeiselle ääniaaltojen huipulle voidaan määrittää etäisyys. Ilmiö on voimakkaammillaan lyhyillä etäisyyksillä ja sen vaikutus etenemisvaimennukseen voi olla useita desibelejä. Sama ilmiö voi tapahtua myös ääniaaltojen ja pohjan vuorovaikutuksen yhteydessä. Silloin on yleensä kyse matalammista taajuuksista. [7, s.101–103]

Voimistuvat tuuliolosuhteet lisäävät merenkäyntiä, jolloin merenpinta muuttuu rosoisemmaksi ja ilmakuplien määrä merenpinnan läheisyydessä kasvaa. Rosoisesta merenpinnasta ääniaallot voivat sirota, ja lähteeseen päin heijastuneet ääniaallot heikentävät äänen intensiteettiä. Merenpinnan muodot pysyvät liikkeessä ja aaltojen vertikaalinen liike moduloi tulevan äänisignaalin amplitudia, jolloin ääniaallon spektriin syntyy ylempiä ja alempia sivukaistoja. Virtaukset puolestaan aiheuttavat horisontaalista liikettä heijastuspintaan ja taajuus voi muuttua Doppler-ilmiön seurauksena. Ääniaaltojen osuessa ilmakupliin ne voivat resonoida ja ääniaallon nopeus voi muuttua. Edellä mainitun lisäksi ääniaallot heijastuvat ja siroavat kuplista yleisten heijastumisperiaatteiden mukaisesti. Merenpinnan vaikutuksesta signaalin heikentymiseen on esitetty useita erilaisia empiirisiä malleja, joista yksi yleisimpiä on Chapman-Harris-malli,

$$S_{CH} = 3{,}3\beta log_{10}\left(\frac{\theta}{30}\right) - 42{,}2log_{10}(\beta) + 2{,}6 \tag{12}$$

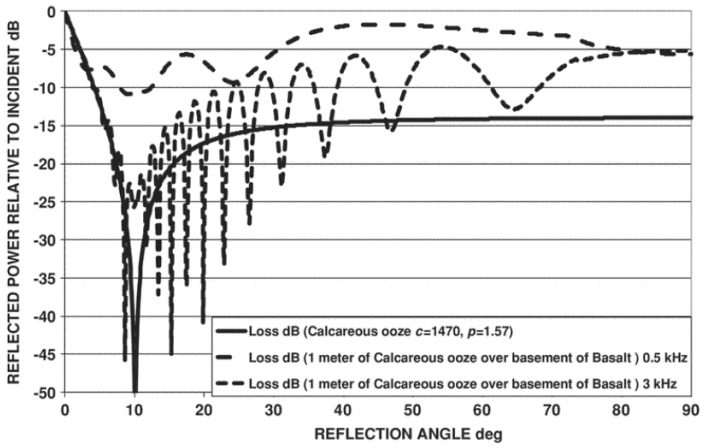
$$\beta = 158\left(Uf^{(1/3)}\right)^{-0{,}58}, \tag{13}$$

missä θ on ääniaallon heijastumiskulma ja *U* on tuulen nopeus solmuissa. Mallin mukaan taajuudella on suuri vaikutus signaalin heikentymiseen ääniaallon heijastuessa merenpinnasta. [18]

Arktisilla merialueilla merenpinta voi olla jään peittämä Jään paksuus ja rosoisuus vaikuttavat ääniaaltojen vaimenemiseen, sirontaan ja heijastumiseen. Jään paksuuteen ja laatuun vaikuttavat alueelliset ja vuodenajoista riippuvat tekijät. Jäät voivat olla kiinteästi paikallaan, kelluvia tai liikkuvia virtauksien mukaisesti. Homogeenisesta jääpeitteestä, ilman absorption vaikutusta, ääniaalto heijastuisi lähes häviöttömästi millä tahansa taajuudella. Jääpeite voi sisältää rakenteellisesti erilaisia kerroksia, joissa esimerkiksi ilmakuplien määrä vaihtelee. Luotettavien mallien rakentaminen on haasteellista vaimenemiseen vaikuttavien eri tekijöiden suuren hajonnan vuoksi. Äänen nopeusprofiileissakin arktisilla merialueilla on vaihtelua ja jäätä voi olla myös pohjassa. Pohjassa esiintyvän jään vaikutusta ääniaallon vaimenemiseen ei ole kattavasti tutkittu. [19, 20]

Ääniaaltojen heijastuminen ja sironta pohjasta on samankaltaista kuin ääniaaltojen vuorovaikutus jääpeitteen kanssa. Pohjan koostumuksessa vaimenemisen suhteen on kuitenkin enemmän vaihtelua. Pohja voi olla muodostunut useista erityyppisistä pohjasedimenteistä. Niissä voi olla useita eri paksuisia kerroksia, joilla on erilaiset ominaisuudet äänen vaimenemisen suhteen. Ääniaallon heijastuessa kovista kalliotyyppisistä pohjista ääniaalto ei menetä niin paljoa energiaa kuin heijastuessaan pehmeistä kerroksista. Pehmeillä kerroksilla akustinen impedanssi on pienempi ja lähempänä veden akustista impedanssia, jolloin ääniaalto tunkeutuu pehmeisiin kerroksiin helpommin. Äänen

energia absorboituu pohjatyypeissä myös eri tavalla ja absorboituminen on taajuudesta riippuvaista. Ääniaaltojen kulkiessa eri kerroksissa ja heijastuessa eri kerroksien rajapinnoista voivat monokromaattiset ääniaallot vahvistaa tai heikentää toisiaan. Kuvassa 6 on havainnollistettu äänen vaimenemista sen heijastuessa kalkkipitoisesta liejupohjasta, joka on basalttikallion päällä. Kuvassa yhtenäinen viiva kuvaa yksinkertaista Rayleighin pohjan äänenvaimenemismallia, jossa on oletettu sironnan olevan vähäistä ja takaisin heijastuneen äänen energia on peräisin ainoastaan veden ja pohjan rajapinnasta tapahtuvasta heijastumisesta. Katkoviivalla kuvatuissa heijastumisvaimennuksissa on otettu huomioon äänen eteneminen pohjakerroksissa, sironta, äänen absorptio pohjan kerroksissa ja ääniaaltojen vuorovaikutus toistensa kanssa. [7, s. 112–115]



Kuva 6. *Äänen heijastumisvaimennus basalttikallion päällä olevasta kalkkipitoisesta liejupohjasta. [7, s. 115]*

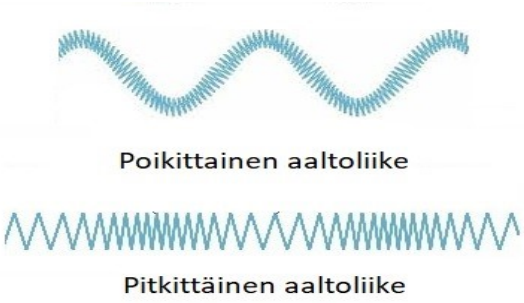
Eri pohjatyyppejä on useita kymmeniä ja jokaisella pohjatyypillä omat erityispiirteensä. Tämä johtaa siihen, että heijastumisvaimennusmallit pohjasta ovat hyvin monimutkaisia. Hyvänä esimerkkinä on High-Frequency Bottom Loss (HFBL)-malli, joka on Yhdysvaltojen laivaston luoma malli taajuuksille 1–4 kHz. Malli on taajuudesta riippumaton ja se koostuu yhdestä heijastumiskertoimesta ja neljästä heijastumiskulmasta riippuvasta heijastumiskertoimesta. Heijastumiskertoimet on kohdistettu yhdeksälle eri merialueen tyypilliselle pohjatyypille. Pienellä katkoviivalla kuvattu heijastumisvaimennus kuvassa 5 on luotu edellä mainitulla mallilla. Kuvan 6 isomman katkoviivan kuvaaja on luotu Low-Frequency Bottom Loss (LFBL)-mallilla, jossa on 10–30 eri parametriä riippuen pohjan kerrostuneesta luonteesta. [7, s.114–116]

Pintakanavassa, missä vesi on sekoittunutta ja äänennopeusprofiili pysyy samana syvyydestä riippumatta, ääniaallot tietyllä taajuusalueella jäävät pintakanavaan. Taajuusalue riippuu pintakanavan korkeudesta, jossa tiettyä tasoa matalammat taajuudet eivät mahdu kulkemaan. Pintakanavalle voi määrittää optimitaajuuden, jossa

äänenvaimeneminen on vähäisintä. Liian matalat taajuudet vuotavat ulos kanavasta diffraktiolla vaimentaen ääntä. Liian korkeat taajuudet puolestaan vaimenevat absorption ja siroamisen seurauksena. [12, s. 77–80]

2.2 Ääniaallot kiinteissä aineissa

Ääniaallot aiheuttavat väliaineen molekyyleihin ja atomeihin liikettä, jolloin tapahtuu puristusta ja harvenemista. Puristuminen ja harveneminen voidaan havaita pitkittäisenä ääniaaltona, joka on yleisin ääniaallon etenemismalli. Pitkittäinen ääniaalto on myös ainoa äänen etenemismalli, joka on havaittavissa kaikissa erityyppisissä väliaineissa (kiinteä, neste, kaasu) [21, s. 83–84]. Ääniaaltojen etenemiselle kiinteissä aineissa on useampia eri etenemismalleja kuin nesteissä ja kaasuissa, koska kiinteät aineet vastustavat tilavuuden ja muodon muutosta. Toisin sanoen ne kestävät leikkausvoimia ja sen vuoksi kiinteillä aineilla voi olla jokin muoto. Poikittaisen ja pitkittäisen ääniaallon nopeusvektorit ovat kohtisuoria toisiinsa nähden [22, s. 39–44]. Kuvassa 7 on havainnollistettu pitkittäisen ja poikittaisen aallon etenemismalleja.



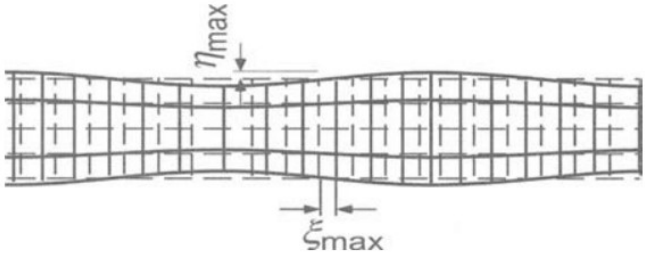
Kuva 7. *Poikittaisen ja pitkittäisen ääniaallon etenemismallit. [23]*

Poikittaisen ja pitkittäisen aallon etenemisnopeudet ohuessa homogeenisessä levyssä voidaan laskea kaavoilla,

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho_1(1+\nu)}} \quad (14) \qquad \text{ja} \qquad c_\mathrm{l} = \sqrt{\frac{E}{\rho_1(1+\nu^2)}} \quad (15),$$

missä E on materiaalin kimmomoduuli, ρ_1 on materiaalin tiheys ja υ on Poissonin vakio. Rakenteissa puhdas pitkittäinen ääniaalto on mahdollinen isotrooppisessa kiinteässä väliaineessa, jos aallonpituus ei ole suurempi kuin rakenteen pienin dimensio. Pitkittäinen aalto rajoitetuissa ympäristöissä, kuten levyissä, tangoissa ja palkeissa muuntuu quasi-pitkittäiseksi aalloksi [22, s. 33]. Pitkittäisen aaltoliikkeen aiheuttama aallon etenemissuunnan mukainen muodonmuutos aiheuttaa muodonmuutoksen myös poikittaisessa suunnassa. Kuvassa 8 on esitetty quasi-pitkittäisen aallon aiheuttama muodonmuutos,

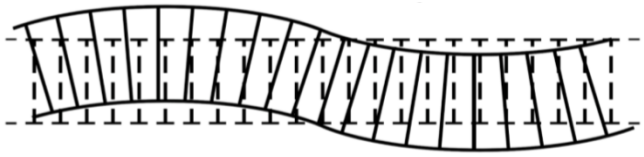
joka on yhteydessä materiaalin elastisiin ominaisuuksiin. Yhtenäinen viiva esittää muodon muutosta kokenutta ja katkoviiva muodonmuutosta kokematonta levyä. Muodonmuutos poikittaisessa ja pitkittäisessä suunnassa on Poissonin vakion määrittelemä [23, s. 241-242].



Kuva 8. *Quasi-pitkittäisen aallon aiheuttamat muodonmuutokset kiinteässä väliaineessa. [22, s. 34]*

Kolmas puhdas aaltomuoto kiinteissä materiaaleissa on taivutusaalto, joka on merkittävin tekijä rakenteiden äänisäteilyn lähteenä. Taivutusaalto aiheuttaa rakenteeseen merkittävää lateraalista siirtymää. Taivutusaallon aiheuttama siirtymä rakenteessa vaikuttaa rakenteen viereiseen väliaineeseen. Rakenteesta väliaineeseen siirtyvän energian suuruus riippuu rakenteen poikittaisen impedanssin ja viereisen väliaineen impedanssin suhteesta. Taivutusaallon lateraalinen siirtymä aiheuttaa taivutusmomentin ja leikkausvoiman gradientin, jotka lateraalin liikkeen inertia pyrkii tasapainottamaan. Tämä johtaa siihen, että taivutusaallon vaihenopeus on taajuudesta riippuvainen ja se on kaksinkertainen aaltopaketin ryhmänopeuteen verrattuna.

Rakenteella voi olla useita ominaistaajuuksia, jotka saavat rakenteen värähtelemään ilman vaimennus- tai ajovoimaa. Tämä johtuu taivutusaaltojen dispergoivasta luonteesta. Nämä ominaistaajuudet eivät myöskään ole harmonisesti yhteydessä toisiinsa. Rakenteen ollessa riittävän paksu suhteessa taajuuteen taivutusaalto etenee itsenäisenä pintaaaltona. Taivutusaaltojen erikoisen luonteen vuoksi vedessä olevien rakenteiden akustisella yhteensovittamisella on merkitystä. Taajuuden lähestyessä nollaa myös taivutusaallon nopeus lähestyy nollaa. Kuvassa 9 on nähtävissä taivutusaallon aiheuttama muodonmuutos tasomaiseen rakenteeseen. Taivutusaalto aiheuttaa tason pinnoilla puristusta ja venymistä. [25, s. 19–28]



Kuva 9. *Taivutusaallon aiheuttamat muodonmuutokset rakenteeseen. [26]*

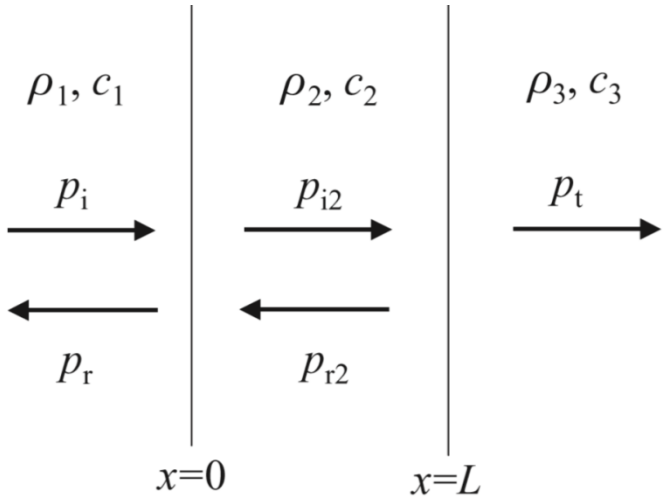
Taivutusaallon nopeus levyssä voidaan määrittää kaavalla,

$$c_b = \sqrt{\omega}\left(\frac{E*\left(\frac{h}{2}\right)^2}{3*\rho_1(1-\upsilon^2)}\right)^{1/4}, \tag{16}$$

missä *ω* on kulmataajuus ja *h* on levyn paksuus. Edellä mainittujen kolmen pääaaltotyypin lisäksi on lukuisia muita aaltotyyppejä, kuten Rayleigh-, Lamb-, Love- ja Stonley-aaltomuodot. Edellä mainitut aaltomuodot voivat esiintyä ohuissa levymäisissä rakenteissa, mutta työn teoreettinen viitekehys ei tue niiden tarkempaa tarkastelua. [27]

2.3 Ääniaallon vaimeneminen ja rajapinnoissa

Tietämys äänen vaimenemisen mekanismeista ja kulkureiteistä vedessä on kaikuluotauslaitteiston suunnittelun tärkeitä elementtejä parhaan suorituskyvyn takaamiseksi. Kaikuluotauslaitteiston lähettävien tai vastaanottavien elementtien ympärillä on yleensä jonkinlainen suojakuori tai useita suojakuoria, joiden läpi äänen tulisi kulkea mahdollisimman häviöttömästi. Eri suuntaan kulkevat ääniaallot tekevät äänen heijastumisen ja vaimenemisen arvioimisen materiaaleissa haastavammaksi vinoilla tulokulmilla. Äänen kulkua ja sen voimakkuuden muutosta vesi-materiaali-vesi-rajapinnassa voidaan aluksi pyrkiä ymmärtämään ja arvioimaan siten, että kyseessä olisi kolme nestemäistä väliainetta ja ääniaalto tulisi kohtisuorassa rajapintoihin nähden. Koska kohtisuora tulokulma eliminoi poikittaisen ääniaallon syntymisen kiinteissä aineissa, voidaan edellä mainittua mallia soveltaa keskimmäisen väliaineen ollessa kiinteä. Ääniaallon kulkua kolmen eri nesteen rajapintojen läpi on havainnollistettu kuvassa 10. Kohtisuorassa kulmassa saapuva ääniaalto kokee heijastumisen jokaisessa rajapinnassa, kuten kuvasta 10 on nähtävissä. [7, s. 82]



Kuva 10. *Kohtisuoran paineaallon (p) heijastuminen ja läpikulku eri tiheyden (ρ) ja äänen nopeuden (c) omaavien materiaalien rajapinnoissa. [7, s. 83]*

Jokaisessa rajapinnassa tulopaineen ja heijastuneen paineen summat ovat samat kuin seuraavan rajapinnan vastaavien paineiden summat. Sama sääntö koskee myös hiukkasten nopeuksien summaa. Äänen etenemis- (T) ja heijastusvaimennuskertoimet (R) määritellään seuraavasti,

$$T = \frac{P_t}{P_i} \qquad (17) \qquad \text{ja} \qquad R = \frac{P_r}{P_i}, \qquad (18)$$

Missä P_i on tulopaineamplitudi, P_t on läpäissyt paineamplitudi ja P_r on heijastunut paineamplitudi. Edellä mainitut paineamplitudit ovat kompleksisia suureita ja niiden suhteet riippuvat väliaineiden akustisista impedansseista *Z.* Akustinen impedanssi on suure, joka on väliaineen tiheyden *ρ* ja äänennopeuden *c* tulo,

$$Z = \rho c. \qquad (19)$$

Heijastus- ja etenemisvaimennuskertoimet voidaan laskea akustisten impedanssien avulla, koska akustinen paine ja hiukkasten nopeudet rajapinnan molemmilla puolilla ovat yhtä suuret ja rajapinnat pysyvät kontaktissa. Heijastusvaimennuskerroin voidaan määrittää kaavalla,

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \qquad (20)$$

ja akustisten paineiden ollessa molemmin puolin rajapintaa yhtä suuret,

$$T = R + 1 \qquad (18) \qquad \text{ja} \qquad T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1}. \qquad (21)$$

Kuvan 9 mukaisessa tilanteessa, jossa rajapintoja on kaksi, akustisten painekomponenttien määrä kasvaa ja heijastumis- ja etenemisvaimennuskertoimien määrittäminen ei onnistu pelkästään akustisten impedanssien avulla. Äänen paineeseen perustuva

kohtisuoran äänen heijastusvaimennuskerroin kolmen väliaineen välillä voidaan määrittää kaavasta,

$$R = \frac{\left(1-\frac{Z_1}{Z_3}\right)\cos(k_2 h)+i\left(\frac{Z_2}{Z_3}-\frac{Z_1}{Z_2}\right)sin(k_2 h)}{\left(1+\frac{Z_1}{Z_3}\right)cos(k_2 h)+i\left(\frac{Z_2}{Z_3}+\frac{Z_1}{Z_2}\right)sin(k_2 h)} \tag{22}$$

missä *h* on levyn paksuus ja k_2 on aaltoluku kiinteässä aineessa. Edellä kuvatun tilanteen mukaisen äänen intensiteetin etenemisvaimennuskerroin voidaan määrittää kaavalla,

$$T_I = \frac{4}{2+\left(\frac{Z_3}{Z_1}+\frac{Z_1}{Z_3}\right)[cos(k_2 h)]^2+\left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3}+\frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2}\right)[sin(k_2 h)]^2}. \tag{23}$$

Työhön liittyvissä akustisissa mittauksissa keskimmäisen väliaineen ympärillä on vesi, jolloin $z_1=z_3$ ja yhtälö supistuu muotoon,

$$T_I = \frac{1}{1+\frac{1}{4}\left(\frac{z_2}{z_1}-\frac{z_1}{z_2}\right)^2[sin(k_2 h)]^2}. \tag{24}$$

Äänen intensiteetin etenemisvaimennuskertoimen ratkaiseminen riittää ratkaisemaan myös muut äänen heijastumiseen ja etenemiseen liittyvät kertoimet. Äänen tehon etenemisvaimennuskertoimella on yhteys äänen paineeseen ja intensiteettiin perustuviin etenemisvaimennuskertoimiin,

$$T_P = \left(\frac{A_t}{A_i}\right) T_I = \left(\frac{A_t}{A_i}\right)\left(\frac{z_1}{z_2}\right)|T|^2, \tag{25}$$

missä A_t ja A_i ovat läpäisseen ja tulevan ääniaallon pinta-alat, jotka ovat kohtisuoralla kulmalla yhtä suuret. Vastaavasti äänen tehon heijastumiskertoimella on myös yhteys äänen intensiteetin ja paineen heijastumiskertoimiin,

$$R_P = R_I = |R|^2. \tag{26}$$

Heijastuneen säteen pinta-alat ovat aina yhtä sureet riippumatta tulokulmasta. Energian säilymisen takia rajapintaan kohdistuvan äänisignaalin energia tulee jakaa heijastuneen ja läpimenevän äänisignaalin kanssa,

$$R_P + T_P = 1. \tag{27}$$

Edellä kuvattuja yhtälöitä voidaan käyttää tilanteissa missä ääniaallot ja rajapinnat oletetaan tasomaisiksi ja kiinteä väliaine on homogeeninen, joka ei absorboi energiaa. Työn akustisissa mittauksissa on pyritty luomaan edellisen kaltainen tilanne ja analyysivaiheessa selvitetään tarkemmin, mistä tekijöistä mallien ja akustisten mittauksien erot johtuvat. [15, s. 149–161]

2.4 Epäsuoran tasoaallon heijastuminen ja eteneminen levyn läpi

Ohuiden levyjen kohdalla on myös otettava huomioon ääniaallon aiheuttama värähtely. Ääniaalto aiheuttaa eri suuruisen akustisen paineen levyjen pinnoilla, jolloin värähtely on mahdollista. Koska levyissä ääniaalto voi edetä poikittaisesti tai pitkittäisesti, voi värähtely olla symmetristä tai epäsymmetristä. Epäsymmetrisessä värähtelyssä siirtymät rajapinnoilla ovat identtiset ja symmetrisessä värähtelyssä suuruudeltaan identtiset, mutta eri merkkiset. Epäsymmetrisen ja symmetrisen värähtelyn vuoksi levyn akustinen impedanssi muodostuu pitkittäisestä ja poikittaisesta akustisesta impedanssista Z_s ja Z_a. Niitä tarvitaan ohuen levyn heijastumis- ja etenemisvaimennuskertoimen määrittämiseksi. Edellä mainitut akustiset impedanssit voidaan määrittää kaavalla,

$$Z_s = \left(2i\frac{E}{(1-\upsilon^2)}/\omega h\right)\left[1-\nu^2/\left(1-\frac{\xi^2}{\xi_s^2}\right)\right]^{-1} \tag{28}$$

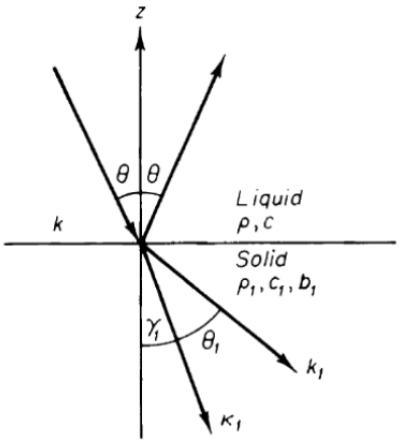
ja

$$Z_a = -0{,}5i\omega m_\rho[1-(\xi/\xi_a)^4], \tag{29}$$

missä ξ on aaltoluvun horisontaalinen komponentti, ξ_s on aaltoluvun symmetrinen komponentti, ξ_a on aaltoluvun epäsymmetrinen komponentti ja m_ρ on levyn pintatiheys. Aaltoluvun horisontaalisen komponentin määrittäminen voidaan tehdä kolmella tavalla,

$$\xi = k\sin\theta = k_1\sin\theta_1 = \kappa_1\sin\gamma_1, \tag{30}$$

missä k, k_1 ja κ_1 ovat veden, pitkittäisen ja poikittaisen ääniaallon aaltolukuja. Veden ja kiinteän aineen rajapinnassa läpimenevän poikittaisen ja pitkittäisen ääniaallon kulmat poikkeavat rajapinnan kohtaavan ääniaallon tulokulmasta ja niitä kuvataan symboleilla θ_1 ja γ_1. Kuvassa 10 on havainnollistettu tason kohtaavan ääniaallon jakautuminen poikittaiseen ja pitkittäiseen ääniaaltoon. [28]



Kuva 11. *Poikittainen ja pitkittäinen ääniaalto kiinteän aineen ja nesteen rajapinnassa. [28, s. 42]*

Snellin lakia voidaan soveltaa kaavaan 30, jolloin saadaan,

$$\sin\frac{\theta}{c} = \sin\frac{\theta_1}{c_\mathrm{l}} = \sin\frac{\gamma_1}{c_\mathrm{b}}. \tag{31}$$

Symmetrisen ja epäsymmetrisen aaltoluvun komponentit saadaan yhtälöillä,

$$\xi_s = \frac{\omega}{c_l} \tag{32}$$ ja $$\xi_a = \frac{\omega}{c_b}. \tag{33}$$

Koska ääniaalto ei tule kohtisuorassa tasoon, sen akustinen impedanssi muuttuu kulman suhteen,

$$Z_w = \rho c/cos\theta. \tag{34}$$

Yhtälöjen 28, 29 ja 34 avulla voidaan määrittää ohuen levyn heijastumis- ja etenemisvaimennuskertoimet ääniaallon osuessa tasoon ei-kohtisuorasti,

$$R = \frac{Z_A Z_S - Z_w^2}{(Z_w+Z_A)(Z_w+Z_S)} \tag{35}$$ ja $$T = \frac{Z_w(Z_s-Z_a)}{(Z_w+Z_a)(Z_w+Z_s)}. \tag{36}$$

Edellä kuvattujen Brekhovskikhin elastisuusteorioihin perustuvien heijastumis- ja etenemisvaimennuskertoimien lisäksi on malleja, joita voidaan soveltaa paksummille levyille ja tai levyille, joilla on kaarevia muotoja. [28]

2.5 Ääniaallon absorboituminen materiaaliin

Vedenalaisessa akustiikassa käytetyt ääntä absorboivat materiaalit ovat akustisesti yhteensopivia veden kanssa ja ne pystyvät muuttamaan, vaimentamaan ja hajottamaan ääntä. Akustisen impedanssin sopiessa yhteen veden akustisen impedanssin kanssa ääni pääsee materiaaliin sisään ja pinnasta heijastuneen ääniaallon voimakkuus heikkenee. Ääntä absorboivan materiaalin sisässä ääniaallon energia muuttuu lämpöenergiaksi. Ääntä absorboivia materiaaleja vedenalaisissa sovelluksissa käytetään yleensä

sukellusveneiden pintamateriaalina, jolloin kaikuluotainten kaiut vaimenevat. Edellä mainituissa sovelluksissa kumit ja polyuretaanit ovat yleensä matriisimateriaalina. Matriisimateriaalien absorptio-ominaisuuksien parantamiseksi niihin sisällytetään epäorgaanisia täyteaineita, jotka voivat olla kovia tai huokoisia. Pintamateriaalin rakenne ja pinnan muoto vaikuttavat myös akustisiin ominaisuuksiin. [28], [29]

Äänen absorptio materiaaleissa tapahtuu viskositeetin, lämmönjohtumisen ja viskoelastisten relaksaatiomekanismien kautta. Äänen viskositeettinen absorptiokerroin voidaan kuvata kaavalla

$$\alpha_\eta = \frac{\omega^2}{2\rho_0 c_0^3}\left(\frac{4}{3}\eta' + \eta''\right) \tag{39}$$

missä η' ja η'' ovat leikkausviskositeetin ja dilatationaalisen viskositeetin kertoimet. Tiheys ρ_0 ja äänennopeus c_0 ovat tilanteesta, jossa ω=0. Kaavasta voisi päätellä, että mitä suuremmat viskositeettikertoimet materiaalilla on, sitä suurempaa on viskositeetista johtuva äänen vaimeneminen. Lämmön johtumisesta aiheutuva äänen absorptiokerroin määräytyy seuraavasti,

$$\alpha_\chi = \frac{\omega^2 \chi}{2\rho_0 c_0^3}\left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p}\right), \tag{40}$$

missä χ on lämmönjohtavuus, C_v ja C_p ovat vakiotilavuuden ja -paineen ominaislämpökapasiteetit. Kolmatta äänen vaimenemiseen vaikuttavaa viskoelastisten relaksaatioiden absorptiokerrointa kuvataan seuraavasti,

$$\alpha_R = \frac{\omega^2 c_1}{2c_0^2}\sum_{i=1}^{n}\frac{\varepsilon_i \tau_i}{1+\omega^2\tau_i^2}, \tag{41}$$

missä ε_i on relaksaation voimakkuus ja τ_i relaksaatioaika. Yhtälöistä nähdään, että äänen nopeus materiaalissa vaikuttaa suuresti absorptiokertoimeen. B. Yuan et al. (30) ovat tutkineet akryylinitriilibutadieeni-kumin (NBR) äänenvaimennuskykyä, kun matriisi materiaaliin on lisätty grafeeninanohiutaleita (GnPs). Tutkimuksessa löydettiin tietty GnPs:n suhteellinen osuus reseptistä, jolloin absorptiokyky parani lähes kaksinkertaiseksi. Samalla paranivat materiaalin mekaaniset ominaisuudet, jotka olisivat edelleen parantuneet GnPs:n suhteellisen osuuden kasvaessa. Materiaalin absorptiokerrointa olisi voinut vielä parantaa muilla täyteaineilla, mutta silloin mekaaniset ominaisuudet olisivat kärsineet. Tutkimus havainnollisti hyvin, mitä haasteita on usean eri materiaaliominaisuuden optimoinnissa. [30]

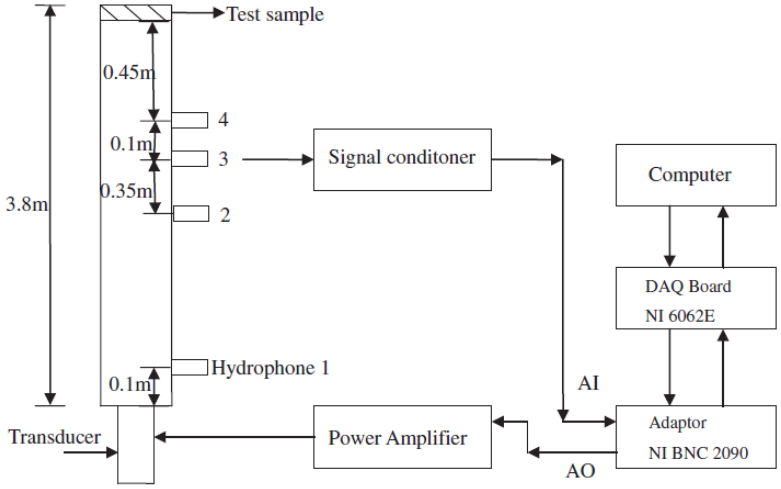
Paneelin läpäisemälle ääniaallolle voidaan osoittaa etenemisvaimennuskerroin *T* ja heijastusvaimennuskerroin *R*, kuten edellä on todettu. Ääniaallon menettämä energia levyn sisällä voidaan käsittää eri absorptiomekanismien aikaansaamaksi, jos *T* ja *R* ovat

riippuvaisia ainoastaan akustisesta impedanssista. Tällöin absorptiokertoimelle voidaan esittää seuraavasti,

$$\alpha = 1 - |T|^2 - |R|^2, \tag{42}$$

missä *α* on absorptiokerroin. [31]

Absorptiokertoimen voi määrittää kokeellisesti yksinkertaisella Pulse-Tube-tekniikalla, jossa vedellä täytetyn pyöreän putken toisessa päässä on lähetin ja toisessa päässä näyte. Näyte on vasten heijastavaa pintaa, joka voi olla ilma- tai typpipatsas. Putki sisältää myös hydrofoneja, jotka tallentavat putkessa eteneviä pulsseja. Lähetetyn ja vastaanotetun signaalipulssien amplitudieroista voidaan laskea signaalin vaimeneminen. Kuvassa 12 on esitetty Pulse-Tube-menetelmän kaaviokuva.



Kuva 12. *Kaaviokuva taajuusalueelle 200-4000 Hz suunnitellusta Pulse-Tube-mittausmenetelmästä [32]*

Koska testimenetelmä sulkee pois etenemisvaimennuksen, voidaan absorptiokerroin määrittää yksinkertaisesti kaavalla,

$$\alpha = 1 - |R|^2. \tag{43}$$

Rakenteen pituus määräytyy käytetyn taajuusalueen mukaan ja kuvassa 11 esitetty menetelmä soveltuu 200-4000 Hz:n mittauksiin. Vaimennetun sinimuotoisen pulssin pituus menetelmässä on hyvin lyhyt (1 ms), jotta signaalit eivät luo häiriöitä mittaustuloksiin ja ne voidaan erottaa toisistaan. Mittauksissa käytetään neljää hydrofonia, joilla mitataan putkessa etenevää pulssia ja painetta. [32]

Absorptiokertoimen määrittämiseksi on myös muita menetelmiä, kuten vedellä täytetty impedanssiputki [33], jolla voidaan määrittää myös etenemisvaimennus. Edellä kuvatun pulssiputki-menetelmän lisäksi on toinen samankaltainen vertikaalinen menetelmä [34]. Menetelmissä on haasteena etenevän ääniaallon pysyminen tasomaisena aaltona,

interaktiot seinämien kanssa, signaalin prosessointi, kohinan minimointi ja äänen vaimeneminen putkessa [32, 33, 34]. Materiaalin äänenabsorptio-ominaisuudet muuttuvat myös tulokulman mukaan ja niiden arvioimiseen ei ole kehitettyä menetelmää. Materiaalin absorptio-ominaisuuksia vinoilla tulokulmilla voidaan arvioida tietokonemallinnuksen avulla, kuten L. Guolong et al. ovat tehneet [35].

2.6 Akustinen vaimennuskerroin

Väliaineen tai materiaalin etenemisvaimennusta voidaan arvioida akustisella vaimennuskertoimella α, joka kertoo ääniaallon vaimenemisesta desibeleissä mittayksikköä kohden. Mittayksikkö vaihtelee asiayhteyden mukaan. Esimerkiksi ohuiden materiaalien kanssa voidaan käyttää dB/mm ja ääniaallon vaimenemista meriolosuhteissa voidaan kuvata dB/km. Vaimennuskerroin on taajuudesta ja ääniaallon etenemisnopeudesta riippuva suure ja sillä voidaan yhdistää kokonaisvaimennus, joka voi johtua absorptiosta, heijastumisista ja sironnoista. Vaimennuskerrointa ja absorptiokerrointa kuvataan usein samalla symbolilla (α), mutta vaimennuskerroin pitää sisällään myös absorption. [17, s. 29–30]

Kiinteissä materiaaleissa vaimennuskerroin määritetään pitkittäiselle- ja poikittaiselle ääniaallon etenemisnopeudelle. Vaimennuskertoimet voidaan määrittää kokeellisesti muun muassa työn tutkimusosiossa käytetyllä paneelitestimenetelmällä, jossa voidaan myös muuttaa ääniaallon kohtaamiskulmaa paneeliin nähden. Poikittaisen ääniaallon vaimennuskertoimen määrittämiseksi tarvitaan poikittaisen ääniaallon etenemisnopeus. Poikittaisen ja pitkittäisen ääniaallon etenemisnopeudet voidaan määrittää luvun 2.4 mukaisesti, jos kyseessä on homogeeninen ja elastisesti käyttäytyvä materiaali. Pitkittäisen ääniaallon etenemisnopeus (c_l) ja poikittaisen ääniaallon etenemisnopeus (c_t) voidaan määrittää kokeellisesti paneelitestillä seuraavien kaavojen avulla,

$$c_l = \frac{c_w}{1-\Delta t c_w/h}, \tag{44}$$

$$c_t = \frac{c_w}{\sqrt{sin^2\theta+(cos\theta-c_w\Delta t/h)^2}}, \tag{45}$$

missä c_w on äänen etenemisnopeus vedessä ja Δt on vapaan mittauksen ja paneelimittauksen vastaanotetun signaalin aikaero. Vaimennuskertoimet pitkittäiselle (α_l) ja poikittaiselle (α_t) ääniaallolle voidaan määrittää seuraavasti,

$$\alpha_l = \frac{\ln(TA_w/A_s)}{h}, \tag{46}$$

$$\alpha_t = \frac{\sqrt{1-(c_t sin\theta/c_w)^2}\ln(TA_w/A_s)}{d}, \tag{47}$$

missä A_w ja A_s ovat vastaanotetut amplitudit ilman näytettä ja näytteen kanssa. Vaimennuskertoimien määritys tulisi tehdä riittävän paksuilla näytteillä ja riittävän lähellä kiinnostuksen kohteena olevaa taajuusaluetta. Liian matalilla taajuuksilla tehdyt mittaukset ovat haasteellisia rajoitetuissa ympäristöissä. Apuna voidaan käyttää potenssilakia siirtämään korkeammalla taajuusalueella määritetyt vaimennuskertoimet matalammalle taajuusalueelle [36]. Paneelitestin suorittamisesta tarkemmin luvussa 5.

3. MATERIAALIT

Materiaalien valinta tutkimusosioon varmistui tutkimusongelman hahmottuessa. Alkuperäinen ajatus materiaalien valinnalle tuli sovelluksen mekaanisten ominaisuuksien kautta. Paneelitestin tuloksen oletettiin ratkaisevan lopullisen valinnan. Alkuperäisestä suunnitelmasta jouduttiin luopumaan, koska mittausmenetelmän luomiseen liittyi epävarmuuksia. Lopulta päätettiin valmistaa mittausympäristö, jolla saatiin suuntaa antavia tuloksia eri materiaalikategorioiden suhteen ja tuloksia, joilla sovelluksen akustista ympäristöä ymmärrettäisiin paremmin.

3.1 Materiaalien valinta

Materiaalin valinta akustisiin mittauksiin oli suoraviivainen prosessi, koska tarkoituksena oli kehittää myös vedenalainen mittausympäristö akustisia paneelimittauksia varten. Tästä syystä eri materiaalikategorioista valittiin niitä hyvin edustavat näytteet, joiden saatavuus oli helppoa ja hinta kohtuullinen. Näytteillä tuli olla myös jokin yhteys aihepiirin sovellukseen. Materiaalien ominaisuuksia tarkasteltiin sähköisistä tietokannoista ja toimittajien sivustoilta. Tarkemmat perustelut materiaalivalinnalle löytyvät seuraavista kappaleista.

Ilmeisin valinta VDS:n suojakuorelle olisi meriympäristöön soveltuva alumiiniseos ja referenssimateriaaliksi valittiin alumiiniseoksesta Al 5754 valmistettu levy. Mekaanisten ominaisuuksien puolesta alumiinilevy sopisi kuoren materiaaliksi, mutta sen huono akustinen yhteensopivuus veden kanssa voisi heikentää sovelluksen toimintasädettä ja lisätä laitteen sisäistä ääntä [37, s. 116]. Muita metalleihin kuuluvia materiaaleja ei työhön valittu.

Mekaanisten ominaisuuksien puolesta komposiittimateriaalit voisivat toimia VDS:n suojakuorena. Komposiitit voivat sisältää useita eri materiaaleja, joilla on eri tiheydet ja näin ollen myös erilaiset akustiset ominaisuudet. Epähomogeeniset materiaalit sisältävät rajapintoja, joissa mekaanisten aaltojen eteneminen voi muuttua, vaihtaa suuntaa tai heijastua. Komposiittimateriaaleiksi valittiin lasikuitukomposiitti (GFRP) ja hiilikuitukomposiitti (CFRP). Molempien materiaalien matriisimateriaalina on epoksi ja ne ovat valmistettu prepregeistä. Prepregit ovat kudottuja kuitulujitteita, jotka on esikyllästetty matriisimuovilla ja niitä säilytetään n. -18 °C:ssa. Prepregit lämmitetään ensin huoneenlämpöisiksi ja asetetaan muottiin, jonka jälkeen muottia lämmitetään paineen alla ja prepregit

kovettuvat valmiiksi tuotteeksi. Lasikuitukomposiitissa epoksin määrä oli 36 % kokonaispainosta ja hiilikuitukomposiitissa 28 ± 3 % kokonaispainosta. [38]

Kestomuoveista työhön valittiin amorfinen polykarbonaatti (PC) ja osakiteinen polyeteeni (PE-HD). PC:stä on valmistettu mm. tutkimusaluksien pohjiin sekä pieniin miehitettyihin tai miehittämättömiin aluksiin akustisia ikkunoita, koska sen akustinen impedanssi on lähellä veden akustista impedanssia. Akustiset ikkunat ovat olleet levymäisiä ja pyöreitä [39]. PE-HD:n valintaa tuki matala tiheys ja sen käytettävyys komposiittimateriaaleissa. Polyeteenin hankintaan vaikutti myös saatavuus ja hinta.

Elastomeereistä työhön valittiin polyesteripohjainen polyuretaani (PUR) ja fluorikumi (FPM). PUR-laatuja on useita ja niitä on käytetty suojakuorimateriaalina hydrofoneissa, ääntä absorboivana materiaalina sukellusveneissä sekä akustisten ikkunoiden materiaalina. PUR:n mekaaniset ominaisuudet eivät ole riittäviä VDS:n kuoren materiaaliksi, mutta se voi olla komposiitin matriisimateriaali [40]. FPM valittiin työhön referenssiksi polyuretaanille. FPM-kumilla ei ole käyttöä akustisissa sovelluksissa, mutta muita kumilaatuja on käytetty akustisissa ikkunoissa, joissa tarvitaan hyvää akustista yhteensopivuutta veden kanssa ja kykyä vaimentaa mekaanisia aaltoja. FPM-kumilla on korkea käyttölämpötila ja se kestää erinomaisesti eri kemikaaleja sekä sääolosuhteita. FPM-kumia käytetään muun muassa tiivisteissä, letkuissa, suojahansikkaissa, eristeissä ja kalvoissa. FPM-kumin käyttö on yleistä autoteollisuudessa.[41]

3.2 Näytteiden määrä, koko ja ominaisuudet

Etenemisvaimennus- ja heijastusvaimennusmittauksissa näytteiden koon määrää mittauksen taajuusalue ja materiaalin akustinen yhteensopivuus ympäristön kanssa. Taajuusalue ja akustiset ominaisuudet vaikuttavat ääniaallon diffraktioon. Diffraktio aiheuttaa mittaustuloksiin virhettä. Diffraktion vaikutusta mittauksiin käsitellään tarkemmin luvussa 5.6. Tämän työn paneelin koon määrityksessä käytettiin P. H. Mottin [42] tutkimuksen yhteydessä tehtyä havaintoa paneelin koon määrityksestä. Tutkimuksessa todetaan, että paneelin lyhimmän sivun tulisi olla vähintään 4*λ akustisesti yhteen sopimattomilla materiaaleilla ja 3*λ akustisesti yhteensopivilla materiaaleilla. Tässä yhteydessä λ on aallonpituus vedessä. Näytteiden paksuuden määräsi VDS:n suojakuoren paksuus, joka oletetulla alumiinilevyllä olisi n. 3 mm.

Mittauksissa aallonpituus on suurin matalilla taajuuksilla. Levyjen sivujen minimipituuden määritti 10 kHz taajuuden aallonpituus, jolloin aallonpituus vedessä on 15 cm. Sivujen minimipituudeksi näytteille määritettiin 50 cm, jonka oletettiin olevan riittävä. Koska neliön muotoisen levyn käyttö ei ole suositeltua diffraktioilmiön vuoksi, toisen sivun

pituudeksi määritettiin 60 cm. Taulukossa 1 on eritelty akustisiin mittauksiin valitut materiaalit ja niiden koot.

Taulukko 1. *Näytteet ja niiden koko*

Näyte	Koko
Alumiini 5754 ($AlMg_3$)	600 x 500 x 3 mm
Polykarbonaatti (Makroclear)	500 x 500 x 3 mm, 500 x 600 x 3 mm, 500 x 700 x 3 mm ja 450 x 600 x 6 mm
Polyeteeni 300 (PE-HD)	700 x 800 x 3 mm
Hiilikuitukomposiitti, prepreg (2/2 twill, 28 ± 3 %)	610 x 505 x 3 mm, 610 x 505 x 2 mm
Lasikuitukomposiitti, prepreg (36 % E-glass)	795 x 593 X 5,31 mm
Polyuretaani NDI (Shore A 90)	500 x 700 x 3 mm
FPM (Viton)	500 x 700 x 3 mm

Taulukosta 1 nähdään, että joitakin materiaaleja on enemmän tai niiden koko vaihtelee. PC-levyjä valittiin kolmea eri kokoa yhdestä paksuudesta. Levyjen korkeuden vaihtelu voisi näkyä etenemisvaimennustuloksissa, joka voisi johtua diffraktiosta. Ylimääräinen 6 mm vahvuinen levy otettiin mukaan tutkimusosioon jäljelle jääneestä levystä, josta valmistettiin kehikko tutkimuksen alkuvaiheessa. Samasta materiaalista valmistettu kaksi kertaa paksumpi levy todennäköisesti vaimentaa ääntä enemmän. Ero vaimennuksessa paksumman ja ohuemman levyn kohdalla voisi tuoda lisäarvoa tutkimustuloksiin.

PE-HD-levy on levyistä isoin ja sen ei oleteta vaimentavan ääntä paljoa. Materiaali on edullinen ja tästä syystä levyn koko määritettiin huomattavasti isommaksi kuin muut levyt. Tarkoituksena on minimoida mahdollisesta diffraktiosta johtuvaa mittausvirhettä. Koska mittausmenetelmän toimivuudesta ei tässä vaiheessa ollut varmuutta, eri kokoisten levyjen hankinta oli perusteltua.

Tutkimuksen alkuvaiheessa komposiittilevyt oli tarkoitus valmistaa itse, mutta valmistusteknisistä syistä ei olisi ollut mahdollista valmistaa riittävän leveää levyä ja levyn laatu olisi voinut olla heikkoa. Levyjen teettäminen olisi lisännyt huomattavasti kustannuksia, joten levyt päätettiin hankkia valmiina. Lasikuitulevy oli heti saatavilla ja hiilikuitulevyjä hankittiin kahdella eri paksuudella.

Polyuretaani- ja FPM-kumilevyjä hankittiin kuten polykarbonaattilevyjä, mutta ainoastaan isoimmille levyille suoritettiin mittaukset. Levyjen akustisissa mittauksissa jouduttiin käyttämään kehikkoa, joka aiheutti mittauksien tulkinnassa vaikeuksia, joten ei ollut

mielekästä sisällyttää pienempiä levyjä mittaussarjaan. Akustisten mittausten jälkeen tiheys- ja äänennopeusmittauksiin leikattiin levyjen reunoista pienet palat. Liitteen 1 taulukossa 1 on esitetty työn kannalta tärkeitä näytemateriaalien keskeisiä ominaisuuksia. Materiaalien tiheydet ovat itse määritettyjä. Pitkittäisen ääniaallon etenemisnopeudet ovat mitattu elastisten ja homogeenisten materiaalien osalta. Muut materiaalien ominaisuudet ovat hankittu Matweb-sivustolta tai laskettu työssä esiintyvillä kaavoilla. Viskoelastisesti käyttäytyvien materiaalien (PUR &FPM) osalta kaikkia mekaanisia ominaisuuksia ei ole saatavilla [43]. Pitkittäisen ääniaallon etenemisnopeuden ja tiheyden määrityksestä tarkemmin luvussa 5.3.

4. PANEELITESTI VESIALTAASSA

Akustiset mittaukset suoritettiin testialtaassa, jolla on pituutta 4,5 m, leveyttä 3,0 m ja syvyyttä 2,5 m. Akustisten mittausten mukaan avoin allas luokitellaan atmosfääriseksi tankiksi. Akustiset mittaukset käsittivät sarjan mittauksia, jotka suoritettiin edellisessä kappaleessa mainituille levyille. Akustisten mittauksien tarkoituksena oli selvittää, miten eri materiaalit eri materiaalikategorioista vaimentavat ääntä veden alla. Vaimenemisvaikutuksen mittaamiseksi valittiin paneelitesti. Paneelitestissä lähettimestä lähetetään veden alla tietyllä taajuusalueella ääntä, jonka hydrofoni vastaanottaa. Ensin suoritetaan mittaus ilman näytettä lähettimen ja vastaanottimen välissä, jonka jälkeen mittaus toistetaan näytteen kanssa. Mittaustulosten välillä on äänenpainetasoissa eroja, jotka johtuvat äänen tielle asetetusta esteestä. Etenemisvaimennus voidaan yksinkertaisesti esittää desibeleinä seuraavasti,

$$TL = 20log\frac{P_i}{P_t}. \tag{48}$$

Yleensä paneelitestien yhteydessä suoritetaan myös heijastumisvaimennusmittaus, jossa hydrofoni on testipaneelin edessä. Testipaneelin edessä oleva hydrofoni mittaa testipaneelista heijastunutta äänisignaalia, joka voidaan esittää kuten etenemisvaimennus,

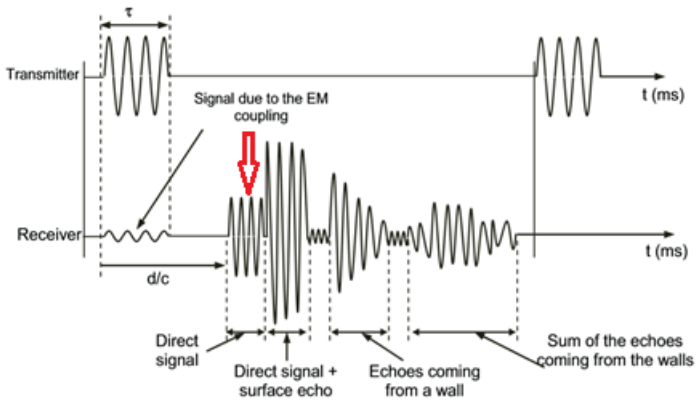
$$RL = 20log\frac{P_i}{P_r}. \tag{49}$$

Seuraavissa kappaleissa käsitellään mittausympäristön rakentamista ja ehtoja, jotka sen tulisi täyttää testien onnistumiseksi. Luvussa tutustutaan myös käytettävään mittauslaitteistoon ja mittauksien kulkuun. Lopuksi luvussa arvioidaan tulosten luotettavuutta ja mahdollisia virhelähteitä.

4.1 Akustisen mittaamisen yleiset periaatteet altaassa ja tankissa

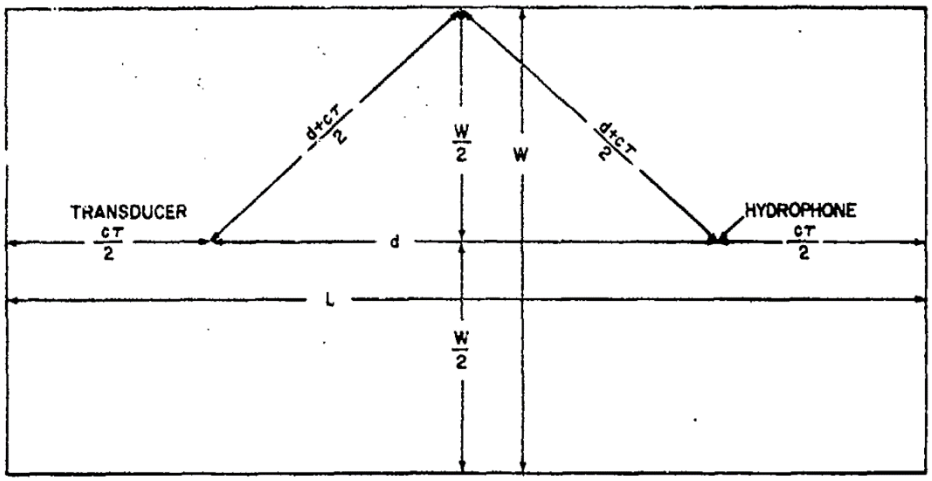
Akustisten paneelitestien suorittaminen vaatii useampien tekijöiden huomioon ottamista. Mittaustekniikkana voidaan käyttää aaltosarjametodia, jossa äänilähteestä lähetetään halutulla taajuudella sinimuotoinen ääni-impulssi. Hydrofoni ottaa lähetetyn ääni-impulssin vastaan. Hydrofoni ottaa vastaan myös altaan pohjasta, pinnasta ja seinämistä tulevat kaiut, jotka mahdollisesti sekoittavat ensimmäisen, lyhintä reittiä hydrofonille tulevan impulssin signaalin. Jotta häiriösignaalit eivät sekoittaisi mitattavaa signaalia, tulee pulssin pituuden olla riittävän lyhyt. Suoraan tulevan riittävän lyhyen impulssin voi erottaa hydrofonin mittaamasta signaalista ja äänenpainetaso voidaan määrittää. Impulssin

tulee kuitenkin olla riittävän pitkä herättääkseen hydrofonin, jotta keskiarvoamplitudi (A) voidaan määrittää riittävän tarkasti. Kuvassa 13 on havainnollistettu millaisen signaalin hydrofoni vastaanottaa altaassa lähetetystä ääni-impulssista ja mistä signaalit ovat peräisin. Kuvasta nähdään myös, miten suorasignaali vahvistuu, jos se sekoittuu pinnasta tulevan kaiun kanssa. Suora signaali, josta äänenpainetaso mitataan, on kuvassa osoitettu punaisella nuolella. [44, s. 531]



Kuva 13. *Hydrofonin vastaanottamat äänisignaalit. [44, s. 531]*

Lähettimen ja vastaanottimen paikan määrittävät altaan dimensiot. Perusperiaatteena on, että seinämistä ja pinnasta tulevat kaiut voidaan erottaa suorasta signaalista. Koska ääni kulkee altaassa vakionopeudella, voidaan signaalia häiritsevien kaikujen aikaero laskea suoraan signaaliin nähden. Aikaeron tulisi olla riittävän suuri, jotta mitattavassa impulssissa on riittävästi jaksoja ja se voidaan erottaa tulevista kaiuista. Altaissa tai tankeissa suurin rajoittava tekijä on yleensä altaiden syvyys. Kuvassa 14 on esitetty havainnekuva, jonka perusteella voi laskea altaan dimensiot tietyllä pulssin pituudella. [45, s. 168]



Kuva 14. *Akustisen altaan dimensioiden määrittäminen seinämä- ja pintakaikujen saapumisen perusteella. [45, s. 169]*

Geometrian ja tunnetun äänennopeuden c perusteella voidaan arvioida altaan pituutta L, korkeutta W, mittausetäisyyttä d ja pulssin pituutta τ seuraavilla kaavoilla,

$$L = d + c\tau, \tag{50}$$

$$W = [(d + c * \tau)^2 - d^2]^{1/2}. \tag{51}$$

Yleensä altaan dimensiota ei voi muuttaa ja vaihtoehtoisesti voi laskea, millainen pulssin pituuden tulisi olla kyseisillä altaan mitoilla. Pulssin pituus ei voi kuitenkaan olla liian lyhyt. Lähettimen laatukerroin Q määrittää pulssin minimipituuden. Lähettimen laatukertoimella tarkoitetaan sitä, kuinka monta jaksoa lähetin tarvitsee saavuttaakseen 95 % halutusta amplitudin tasosta. Pulssin minimipituuden t_{min} voi määrittää seuraavan kaavan avulla

$$t_{min} > (1{,}5 * Q + 1) * T, \tag{52}$$

missä T on jaksonaika. Käytännössä minimiaika pulssin pituudella on 1,5*Q, jolloin amplitudi on saavuttanut 99 % tavoitetasosta. Kaavalla voidaan laskea myös minimitaajuus f_{min}, kun tiedetään jakson ajan olevan taajuuden käänteisluku. [44, s. 532–533]

Lähettimen ja hydrofonin väliseen etäisyyteen vaikuttaa myös niiden ominaisuudet. Mittaukset tulisi tehdä kaukokentässä, jossa ääniaalto on muuttunut tasomaiseksi ja sen muoto ei enää muutu etäisyyden kasvaessa. Kaukokentän ehtojen täyttymisen arvioimiseksi voidaan laskea Fresnelin etäisyys r_F

$$r_F = \frac{D^2}{\lambda}, \tag{53}$$

jossa D on lähettimen elementin suurin dimensio ja λ aallonpituus. Fresnelin etäisyys määrittää milloin kaukokenttä alkaa. Kaukokenttäehdon, täyttymiseen vaikuttavat myös lähettimen muoto ja ominaisuudet, joten laskennallinen kaukokenttä tulisi määrittää

myös kokeellisesti. Kokeellisesti kaukokenttä määritetään muuttamalla lähettimen ja hydrofonin välistä etäisyyttä ja vertailemalla paine-eroja. Jos paine-erot muuttuvat etäisyyden suhteen käänteisesti, on kaukokenttä saavutettu. Jos etäisyys lähettimen ja hydrofonin välillä ei ole riittävä, voi virhe äänenpainemittauksissa olla useita desibelejä. [44, s. 526-529]

Vuoraamattomalle ja avoimelle altaalle, jossa tankin seinämät ovat kohtisuorassa tai yhdensuuntaiset ääniaallon etenemissuunnan suhteen, voidaan antaa muutamia kriteereitä lähettimen ja hydrofonin etäisyyden määrittämiselle. Kriteerit perustuvat kaukokenttäehdon täyttymiseen ja käytettyyn taajuuteen seuraavasti:

$$\text{Jos } 5 * D \leq \frac{D^2}{\lambda} \quad \text{tai} \quad f > \frac{5*c}{D}, \quad \text{kriteeri on:} \quad d = \frac{D^2}{\lambda} \tag{54}$$

$$\text{Jos } 5 * D \geq \frac{D^2}{\lambda} \quad \text{tai} \quad f < \frac{5*c}{D}, \quad \text{kriteeri on:} \quad d = 5 * D. \tag{55}$$

Antennin herätysajan tulee olla riittävän pitkä skannatakseen antennin muuntimen koko pituudeltaan. Yleisenä oletuksena on, että antennin muuntimen pituus on vähintään muuntimen pituus D jaettuna akustisten aaltojen nopeudella lisättynä yksi analysoitavan signaalin periodi. Oletuksen perusteella kaavat 50 ja 51 saavat uuden muodon,

$$L = d + (Q + 1)\lambda + D, \tag{56}$$

$$W = \sqrt{[(d + D(Q + 1)\lambda]^2 - d^2}. \tag{57}$$

Lisäämällä ehdot 46 ja 47 edellä kuvattuihin kaavoihin voidaan altaat mitoittaa käytettävän taajuuden ja lähettimen mittojen mukaan,

$$\text{jos} \quad f < \frac{5*c}{D}, \quad \text{niin:} \quad L = 6 * D + \frac{(Q+1)*c}{f} \tag{58}$$

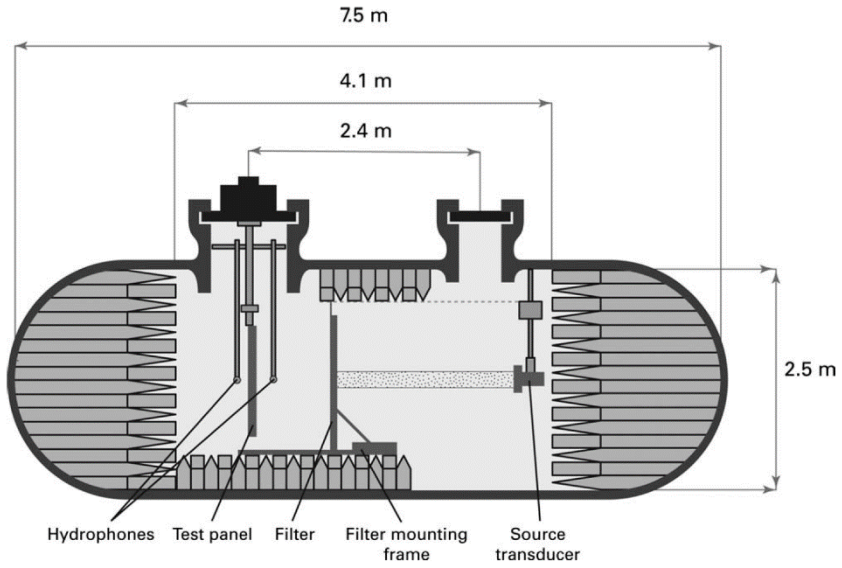
$$W = \sqrt{[6 * D + \frac{(Q+1)*c}{f}]^2 - 25 * D} \tag{59}$$

$$\text{Jos} \quad f > \frac{5*c}{D}, \quad \text{niin:} \quad L = \frac{D^2}{c} * f + D + \frac{(Q+1)}{f} * c \tag{60}$$

$$W = \sqrt{\left[\frac{D^2}{c} * f + D + \frac{(Q+1)*c}{f}\right]^2 - \frac{D^4}{c^2} * f^2}. \tag{61}$$

Edellä kuvatuilla kaavoilla voidaan arvioida, minkä kokoisessa tankissa tai altaassa voidaan suorittaa akustisia mittauksia tietyllä taajuusalueella ja lähettimen ominaisuuksilla. [44, s. 532–537]

Tarkoituksena allasmittauksissa on päästä mahdollisimman lähelle vapaan kentän mittaustilannetta, jossa kaikujen lähteiden etäisyydet voidaan käsittää äärettömän kaukaisiksi. Altaassa ei koskaan päästä lähelle kaiutonta tilaa, mutta kaikujen intensiteettiin ja kaikulähteiden määrään voidaan vaikuttaa. Altaan tai tankin reunat ja pohja voidaan vuorata ääntä suuntaavilla ja vaimentavilla elementeillä, joilla on korkea äänen vaimennuskyky. Kuvassa 15 on havainnollistettu tankkiin rakennettua akustiseen mittaukseen soveltuvaa mittausympäristöä, jossa näkyy ääntä eristäviä vuorauksia ja muita mittauksissa tarvittavia elementtejä. Jos testialtaaseen ei ole mahdollista saada ääntä vaimentavia elementtejä, on suositeltavaa käyttää edellä kuvattua aaltosarjametodia. [44, s. 530]



Kuva 15. *Vedenalaiseen akustiseen mittaukseen suunniteltu tankki. [46]*

Altaassa ja tankissa tehdyissä mittauksissa on etuja avovesimittaukseen nähden. Kontrolloiduissa ympäristöissä voidaan vaikuttaa veden lämpötilaan, puhtauteen ja tankeissa myös paineeseen. Avovesimittauksissa yksi haittatekijä on ilmakuplat. Ilmakuplien lähteitä avovesissä on useita ja niihin luetaan myös kalojen ilmarakot. Ilmakuplista ääni siroaa, heijastuu ja voi vaimentua merkittävästi. Aihetta on käsitelty laajasti teoksessa Fundamentals of Acoustical Oceanography. [47, s. 287–401]

Ennen mittauksia tulisi varmistaa, että lähettimen ja hydrofonin aktiiviset pinnat ovat puhtaat. Ylimääräiset tahrat tai lika voivat muuttaa instrumenttien akustista impedanssia johtaen vääriin mittaustuloksiin. Lähettimen ja hydrofonin olisi hyvä saada olla vedessä mittauslämpötilassa riittävän kauan, jotta lämpötilaero instrumenttien ja veden välillä tasoittuisi. Lämpölaajeneminen aiheuttaa jännitystiloja antureihin ja muuttaa niiden ominaisuuksia. Tämän lisäksi lämpimän elementin pintaan muodostuu helpommin ilmakuplia, jotka voivat merkittävästi muuttaa mittaustuloksia. [45, s. 539]

Hydrofonin ja lähettimen kiinnitys tukikehikkoon tulee olla mekaanisesti riittävän vankka, jotta etäisyydet ja linjaukset eivät muutu. Pienikin muutos etäisyyksissä lähettimen ja hydrofonin välillä muuttaa suuntaavuutta ja sitä kautta mittaustuloksia. Tukikehikon osat, jotka ovat veden alla, aiheuttavat ääniaaltoihin häiriöitä ja muodostavat ei-toivottuja kaikuja. Näiden ilmiöiden minimoimiseksi tulisi käyttää akustisesti läpinäkyviä materiaaleja, joiden akustinen impedanssi on lähellä veden akustista impedanssia. Kyseiset materiaalit eivät myöskään välitä häiritseviä resonansseja rakenteita pitkin antureille. Anturit kiinnitetään tukirakenteisiin itsenäisillä kiinnityselementeillä, jotka voi eristää tukirakenteista esimerkiksi hyvin ääntä absorboivilla kumipehmusteilla. Anturit tulisi kiinnittää tukirakenteisiin itsenäisinä kokonaisuuksina eivätkä niiden kaapelit eivät saisi tulla mittausalueelle. Ulkoisia haittatekijöitä ovat taustamelu, sähkömagneettinen melu ja melu, joka syntyy asettautumisajan aikana tukirakenteista, kuplista ja kaapeleista. Häiriötekijät voidaan tunnistaa ja arvioida niiden merkitsevyyttä. Tarvittaessa ne voidaan myös eliminoida tai vaimentaa. [44, s. 539–541]

4.2 Akustiset mittaustavat ja pelkistetyn paneelitestin malli

Vedenalaisten sovelluksien akustisilta materiaaleilta voidaan vaatia kykyä päästää läpi, heijastaa tai absorboida ääntä. Akustisten ikkunoiden tulisi päästää ääntä läpi mahdollisimman häviöttömästi, kun taas ääntä absorboivan pinnoitteen tulisi vaimentaa ääniaaltoa. Akustiseksi ikkunaksi voidaan kutsua työn kohteena olevaa VDS:n suojakuorta, jonka läpi lähtevän ja saapuvan ääniaallon tulisi päästä mahdollisimman häviöttömästi. Äänen vaimenemista voi mitata edellisellä yksinkertaisella paneelitestillä, jossa vapaan tilan äänenpainetasoa verrataan äänenpainetasoon levyn asetuksen jälkeen. Paneelin etenemisvaimennusta paneelitestissä voi arvioida teoreettisesti R. J. Bopperin kehittämällä kaavalla,

$$TL = 10log\left[\frac{\left(1-\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2\right)^2}{4\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2}(sin^2 k_2 h) + 1\right]. \tag{62}$$

Yhtälössä oletetaan tasomaisen ääniaallon osuvan levyyn kohtisuoraan, materiaali ei ole absorboiva, levy on tasapaksu, levy oletetaan äärettömäksi ja vesi on molemmin puolin levyä. Etenemisvaimennus on minimissään aina, kun akustiset impedanssit ovat yhtä suuret tai äänen aallonpituus materiaalissa on levyn paksuuden monikerta (*k_2h=0, π, 2π, 3π…)*. Etenemisvaimennuksen maksimi puolestaan saavutetaan tilanteessa, jossa äänen aallonpituus materiaalissa on levyn paksuuden neljäsosan pariton monikerta (*k_2h=π/2, 3π/2, 5π/2…).* Paneelitestillä saatu äänen etenemisvaimennus syntyy

paneelin kyvystä heijastaa, sirottaa ja absorboida ääntä. Akustisten ikkunoiden kohdalla absorptio on häviävän pientä. Paneelitestissä paneelin tulisi olla pituus- ja leveysmitoiltaan riittävän suuri, jotta äänen etenemisvaimennus olisi riippuvainen ainoastaan paksuudesta. Pinta-alaltaan äärellinen paneeli tulee olla riittävän suuri, että äänen etenemisvaimennusta määrittävässä paneelitestissä se voidaan olettaa äärettömäksi. Paneelin pituus- ja leveysmitat määrittyvät käytettävän taajuusalueen kautta siten, että matalimmilla taajuuksilla tarvitaan isompia paneeleita. [45, s. 287–289]

Paneelitestillä voidaan mitata myös heijastusvaimennus hydrofonilla, joka on paneelin etupuolella. Heijastusvaimennuksen suuruutta voidaan arvioida edellä kuvatun etenemisvaimennuksen kaltaisella mallilla, joka perustuu samoihin oletuksiin,

$$RL = 10log\left[\frac{4\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2}{\left(1-\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2\right)^2 sin^2 k_2 h} + 1\right]. \tag{63}$$

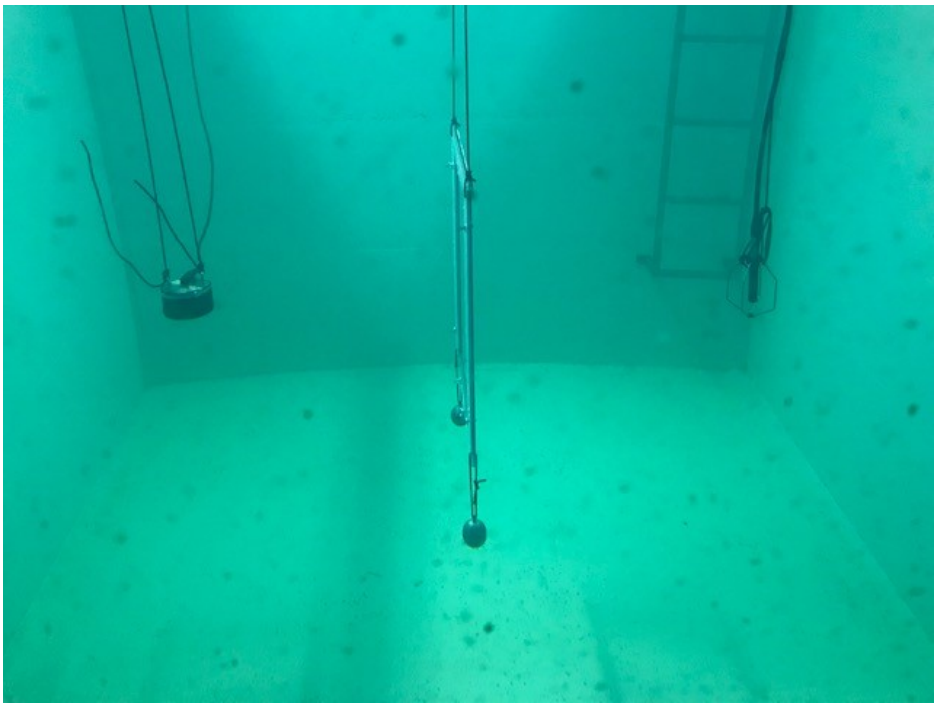
Vedenalainen paneelitesti on alun perin luotu luotainkupumateriaalien äänenvaimennusominaisuuksien määrittämiseksi. Paneelitestitulosten perusteella on tehty materiaalivalintoja kuvun eri rakenteiden suhteen. Parempi käsitys paneelien akustisista ominaisuuksista on saatu, kun materiaalit ovat olleet sovelluksen mukaisessa koossa ja muodossa. Muodon ja koon lisäksi akustisiin ominaisuuksiin vaikuttavat mahdolliset muut rakenteet, kuten vahvikkeet, reiät, kiinnityslaipat, luotainlaitteisto kuoren sisällä, käytöstä johtuvat tekijät ja luotainkuvun tapauksessa koko laiva, johon kupu on kiinnitettynä. Toisin sanoen todellisten akustisten ominaisuuksien määrittämiseksi tulisi tehdä mittaukset valmiilla sovelluksella käytön aikana, mutta se ei ole käytännöllistä. Luvussa 5.6 tarkastellaan tarkemmin paneelitestin levyn kokoon ja mittausympäristöön liittyvää problematiikkaa. [45, s. 287–290]

4.3 Mittausjärjestelmän rakentaminen

Akustisia mittauksia varten rakennettiin kaksi mittausjärjestelmää. Ensimmäisellä mittausjärjestelmällä oli tarkoitus mitata paneelien äänen etenemisvaimennuskykyä taajuusalueella 5,5–15,5 kHz. Testi antaa tietoa, onko paneelitestin suorittaminen mahdollista kyseisessä altaassa saatavilla olevilla laitteilla. Taajuusalue määräytyi sovelluksen aktiivisen kaikuluotaimen taajuusalueen ja saatavilla olevan lähettimen mukaan. Mittausympäristöstä pyrittiin rakentamaan mahdollisimman kevyt ja taloudellinen, jotta se on helppo kasata ja liikutella.

Tukirakenteissa käytettiin puuta ja ripustuksiin narua. Oletettiin, että naruripustukset vedessä eivät aiheuta mittauksille haitallisia kaikuja ja yhdessä pinnan yläpuolella olevan

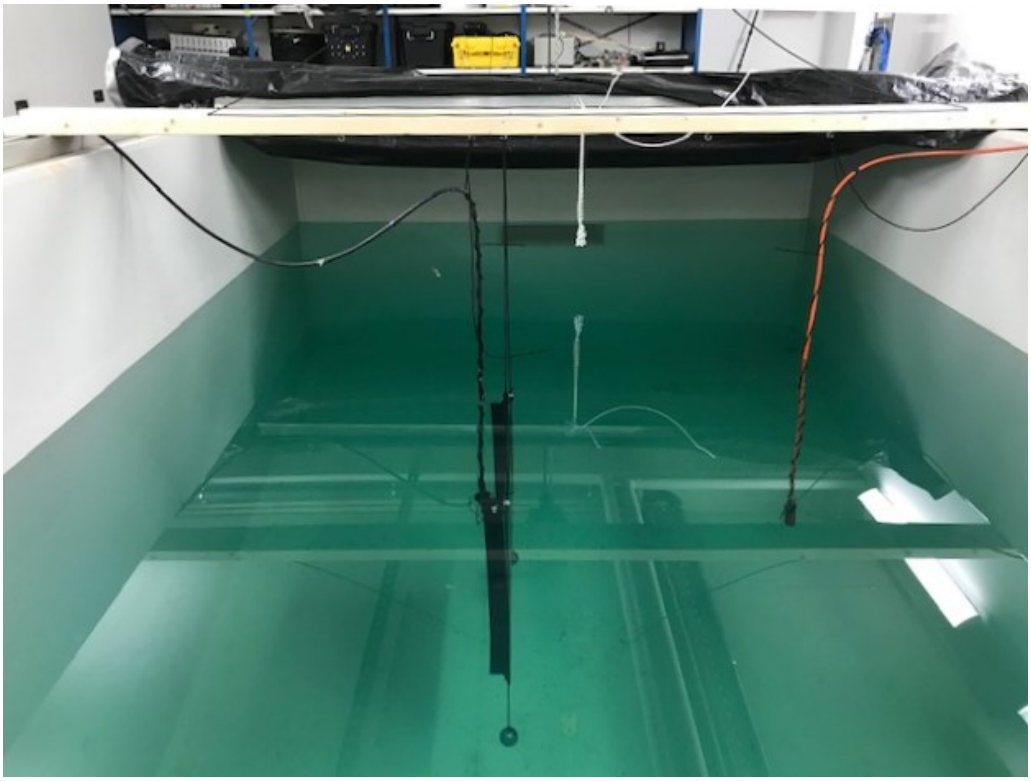
puurakenteen kanssa ne eristävät näytteen ja mittalaitteet toisistaan. Paneelien ripustuksen apuna käytettiin polykarbonaatista (h = 6 mm) valmistettua kehystä, jotta pehmeät levymäiset materiaalit pysyisivät levymäisessä muodossa. Kehykseen ripustettiin myös painot varmistamaan, että kehikko uppoaisi, pysyisi suorassa ja paikoillaan. Tukirakenne koostui kahdesta erillisestä puurakenteesta. Toinen altaan yli menevä puomi pultattiin kiinni altaan keskikohdassa kulkeviin kiskoihin. Puomissa oli ripustukset hydrofonille ja lähettimelle, jotka siirrettiin roikkumaan kyseiseen puomiin näytteen vaihdon yhteydessä. Toinen puomeista oli irrallinen ja se siirrettiin kraanalla kiinteästi paikallaan olevan puomin viereen. Tässä puomissa oli ripustukset näytteelle, hydrofonille ja lähettimelle. Mittausten edistyessä ripustuksien paikkoja vaihdeltiin tuloksien mukaan. Kuvassa 16 on esitetty ensimmäinen mittausjärjestely kuvattuna veden alla.



Kuva 16. *Paneelitestin mittausympäristön ensimmäinen versio. Vasemmalla on 500 watin lähetin TC1037, oikealla on Brüel & Kjærin hydrofoni 8101 ja näyte on keskellä.*

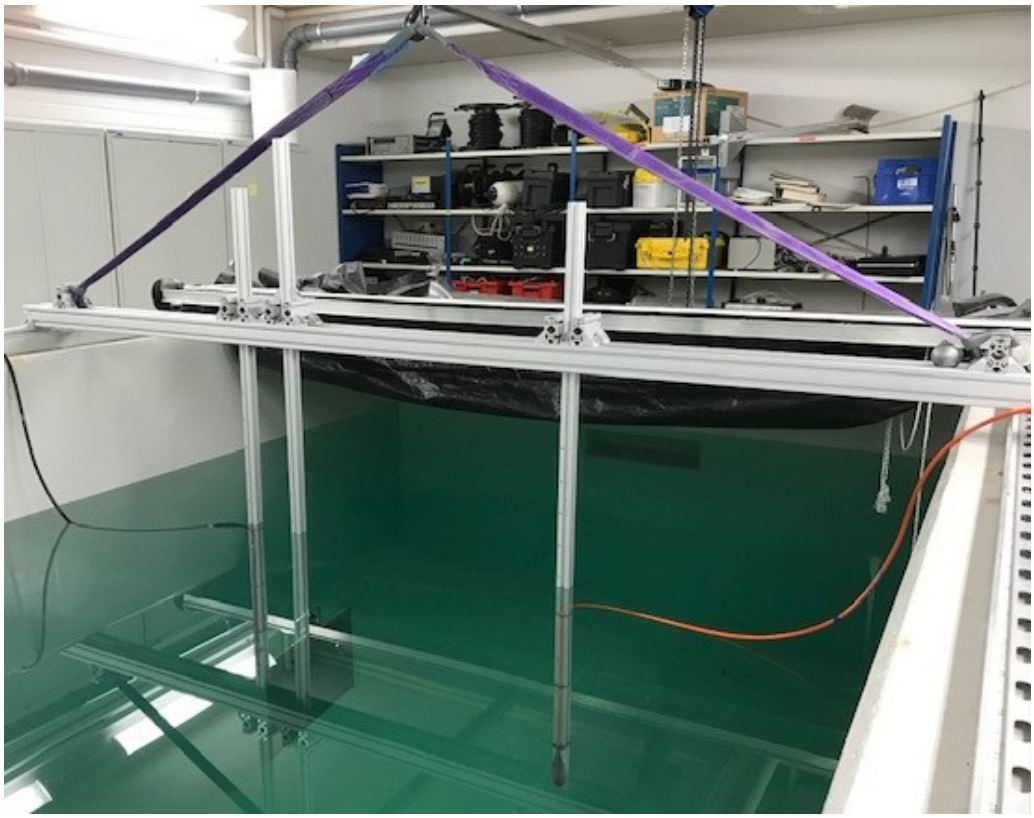
Ensimmäisen mittausympäristön hankaluutena oli lähettimen, testipaneelin ja hydrofonin linjauksen haasteet. Naruilla roikkuvien elementtien paikkoja ei pystynyt syvyyssuunnassa määrittämään tarkasti. Linjauksien pettäminen johtaa siihen, että kohtisuoruusehto ei toteudu. Tämän lisäksi mittausten toistettavuus samoilla asetuksilla ei ollut mahdollista. Kiinteät ripustuskohdat ensimmäisessä rakennelmassa eivät myöskään tarjonneet mahdollisuutta vaihtaa elementtien paikkaa vapaasti. Aaltoliike altaassa heilutti elementtejä, jolloin mittaustulokset vaihtelivat myös peräkkäisten mittausten välillä. Saadut mittaustulokset olivat hankalasti tulkittavissa, eivätkä ne olleet linjassa teorian ja

vastaavien paneelitestien suhteen. Kuvassa 17 on nähtävissä ensimmäinen testirakennelma altaan tasolta kuvattuna. Aikaisempien epäonnistuneiden mittausten ja lisäteorian omaksumisen jälkeen vanhaa testimenetelmää kokeiltiin alumiinilevyllä, paksummalla polyeteenilevyllä, korkeammalla taajuusalueella ja siirtämällä hydrofoni mahdollisimman lähelle näytelevyä. Kokeilu ei tuottanut toivottuja tuloksia ja mittausympäristön kehittämistä oli jatkettava.



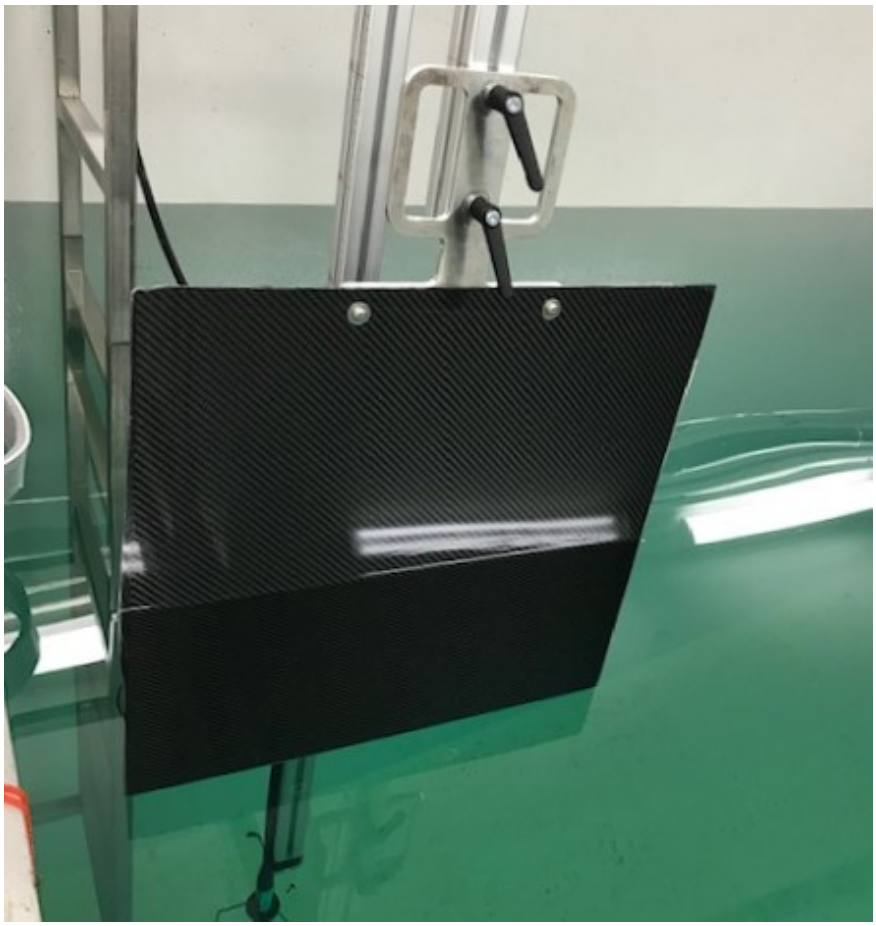
Kuva 17. *Mittausympäristö-1 altaan reunalta kuvattuna.*

Toisessa, alumiiniprofiileista rakennetussa mittausympäristössä elementtien paikkoja voitiin säätää horisontaalisesti ja vertikaalisesti. Paikkojen kohdat pystyttiin myös määrittämään tarkasti. Alumiiniprofiilista rakennettu rakenne oli myös jäykempi. Eri painoiset paneelit aiheuttavat taipumaa rakenteeseen ja jäykempi rakenne minimoi taipuman aiheuttamaa virhettä paikan määrityksessä. Heikkoutena alumiinirakenteessa oli metallisten osien tunkeutuminen vesiympäristöön. Rakenteista voi tulla kaikuja, jotka vaikuttavat mittaustuloksiin ja itse rakenne voi värähdellä ja olla vuorovaikutuksessa hydrofonin kanssa. Kuvassa 18 on toinen mittausympäristö, josta näkyy veden yläpuolella olevat rakenteet. Kuvan puomien paikan määrityksen helpottamiseksi puomeihin piirrettiin mitta-asteikko. Näyte vaihdettiin altaan reunalla, johon rakennelma siirrettiin kraanan avulla.



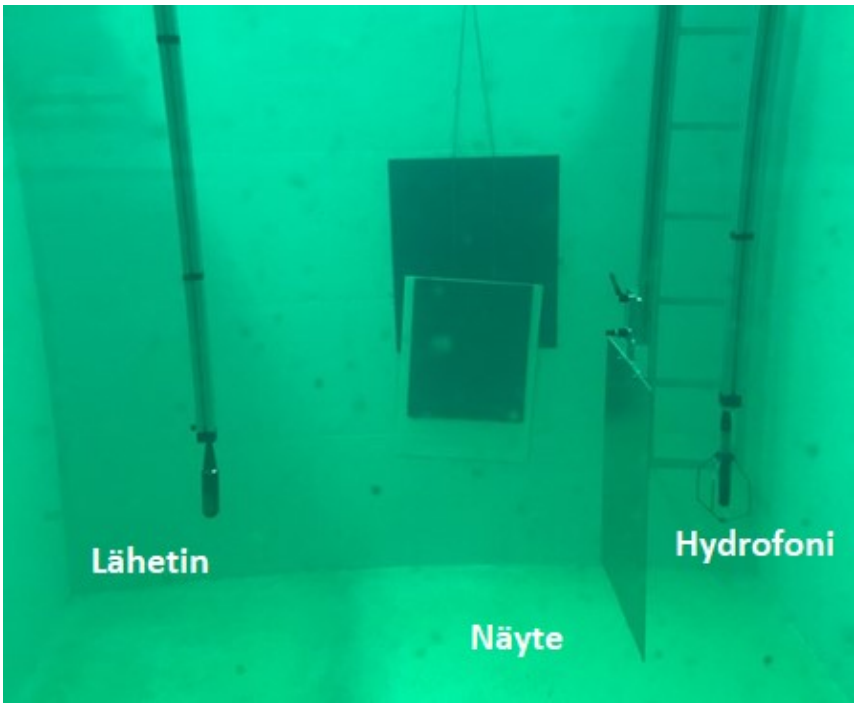
Kuva 18. *Mittausympäristö-2 pinnan yläpuolelta kuvattuna.*

Altaan reunalla näytteen vaihto tapahtui siten, että ensin nostettiin näyte vesirajan yläpuolelle puomia nostamalla, jonka jälkeen näytepidin irrotettiin puomista. Näytepidin kulki alumiiniprofiilissa olevissa urissa ja sen pystyi lukitsemaan lukituskahvoilla. Näytepitimet voi nähdä kuvassa 19, joka on otettu altaan reunalla näytteen vaihdon yhteydessä.



Kuva 19. *Testirakennelman näytepidin ja hiilikuitulevy.*

Kuva 20 on otettu altaan takaseinässä olevasta vedenalaisesta tarkasteluikkunasta. Toisessa mittausympäristössä käytettiin korkeammalle taajuusalueelle soveltuvaa lähetintä, joka näkyy kuvassa vasemmalla. Korkeamman taajuusalueen vaihdolle oli kolme perustetta: alkuperäisellä taajuusalueella (5–18 kHz) äänen vaimeneminen ohuilla levyillä olisi todella pientä, näytteiden koko ei välttämättä riittäisi estämään ääniaaltojen diffraktiosta johtuvaa virhettä mittaustuloksissa, korkeampi taajuusalue (10–100 kHz) on myös tärkeä sovelluksen passiivisen osan kannalta. Ensimmäisen mittausympäristön hydrofoni soveltuu molemmille taajuusalueille, joten sitä ei tarvinnut vaihtaa. Kuvan taustalla näkyy testattavia levyjä.

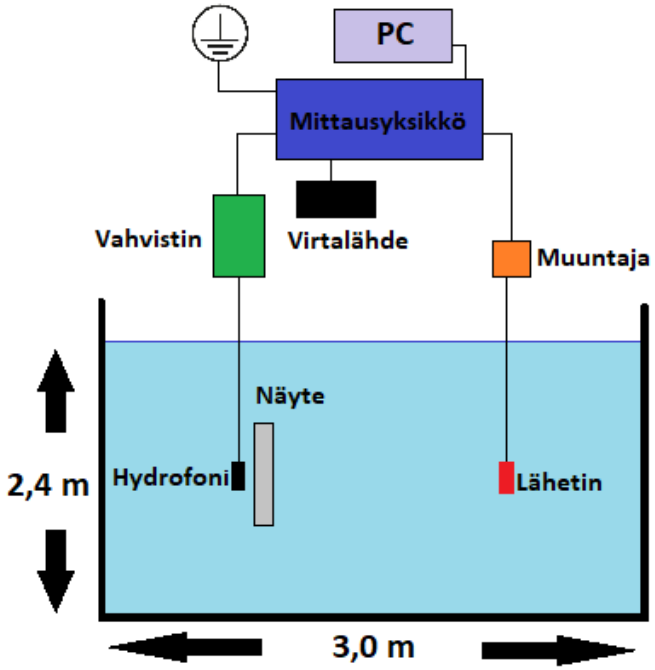


Kuva 20. *Mittausympäristö-2 altaan ikkunan kautta kuvattuna.*

Testattavia näytteitä säilytettiin altaassa vähintään 24 tuntia ennen mittausta lämpötilaerojen tasaamiseksi ja mahdollisten mittauksia haittaavien kuplien häivyttämiseksi. Kaikki levyt pestiin huolellisesti pesuaineella ja harjalla epäpuhtauksista, jotta kuplien muodostus levyn pinnoille olisi vähäistä ja altaan vesi ei likaantuisi. Veden lämpötila altaassa viimeisten mittausten aikaan oli n. 18,6 ° ± 0,5 °C. Lämpötila vaihteli mittaussyvyyden mukaan, pohjalla ollen viileintä. Allashuoneen lämpötila vaihteli välillä 21,4–22,2 °C.

4.4 Mittaaminen ja mittauksista saatava data

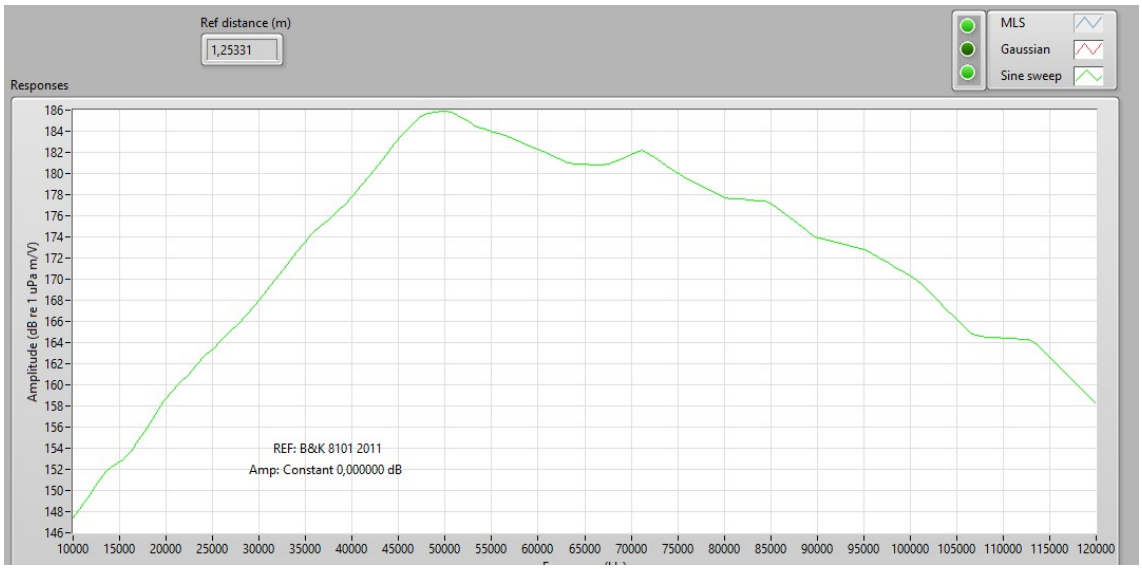
Mittauksia suoritettiin edellä kuvatuilla mittausympäristöillä ja erilaisilla mittausjärjestelyillä. Tässä kappaleessa kuvataan viimeisin mittausjärjestely, jolla saatiin tuotettua tulkittavia tuloksia. Mittausjärjestelyssä käytettiin mittausympäristö-2:ta, joka sisälsi samat mittalaitteet kuin mittausympäristö-1. Mittausjärjestelmä koostui altaassa olevasta lähettimestä, lähettimen muuntajasta, hydrofonista, vahvistimesta, mittausyksiköstä, virtalähteestä ja tietokoneesta. Mittausjärjestely on esitetty kaaviokuvana kuvassa 21.



Kuva 21. *Mittausjärjestelyn kaaviokuva.*

Mittausyksikköä hallinnoidaan LabVIEW-ohjelmalla ja sillä on oma virtalähde kentällä suoritettavia mittauksia varten. Paneelimittauksissa käytetään sinimuotoista äänisignaalia, jota lähetetään tietyn mittaisena pulssina ennalta määritetyn taajuusalueen läpi. LabVIEW-ohjelmalla määritetään mittauksissa käytettävän mittausmenetelmän taajuusalue, näytteenottotaajuus, pulssin pituus, amplitudin suuruus, toistojen määrä, taajuuden korotuksen suuruus mittauspisteiden välillä, taajuussuodattimen rajataajuus, mittaussyvyys, lämpötila, suolapitoisuus ja mittausympäristö. Edellä mainittujen parametrien lisäksi ohjelma sisältää muitakin perusasetuksia, mutta niitä ei tarvinnut työssä tehtävien mittauksien aikana muuttaa.

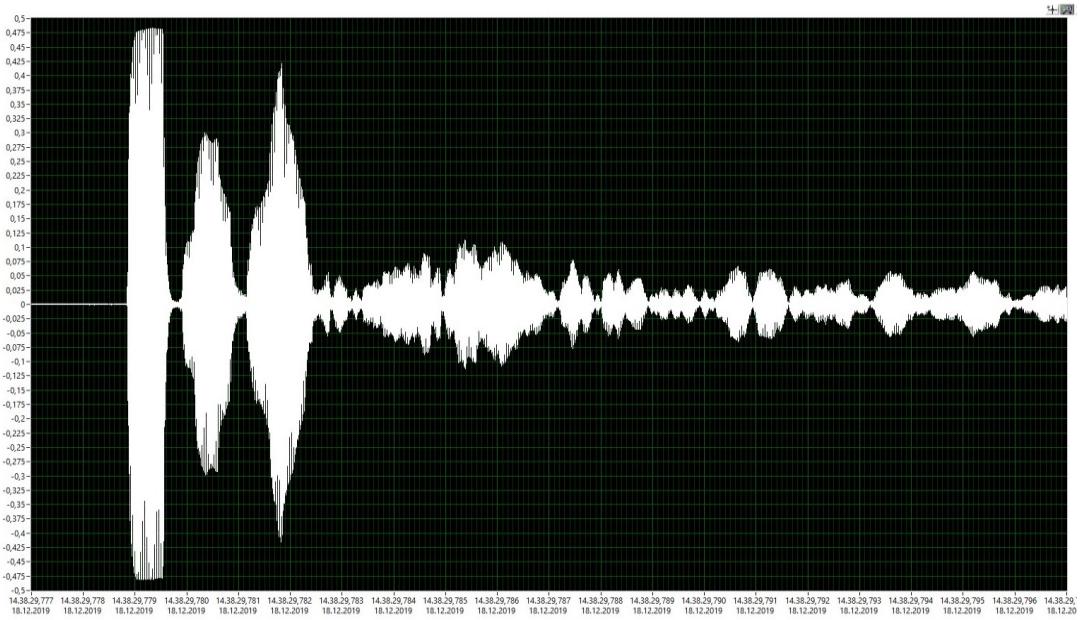
Levyn etenemisvaimennuksen määrittäminen suoritetaan siten, että ensin mitataan äänenpainetasot taajuusalueen yli ilman näytettä. Tämän jälkeen näyte asennetaan ennalta määritetylle kohdalle ja mitataan äänenpainetasot uudestaan samalla ohjelmalla. Etenemisvaimennuksen suuruus tietyllä taajuudella määritetään vähentämällä levymittauksen tulos vapaasta mittauksesta. Kuvassa 22 on ohjelman esittämä mittaustulos, joka esitetään desibeleinä taajuuden suhteen. Kuvasta nähdään myös ohjelman laskema lähettimen ja hydrofonin etäisyys.



Kuva 22. *LabVIEW- ohjelman esittämä tulos mittauksesta.*

Mittausohjelmalla lähetetään 0,7 ms:n pituinen sinimuotoinen pulssi 10 kertaa samalla taajuudella, jonka jälkeen ohjelma vaihtaa taajuutta 1/12 oktaavin verran ja toistaa edellä mainittua mallia, kunnes koko taajuusalue on käyty läpi. Hydrofoni tallentaa näytteitä yhtä pulssia kohden näytteenottotaajuudella 1 MHz ja kaikki saatu data tallennetaan. Tallennetusta datasta nähdään mittausyksikön generoima, lähettimen lähettämä ja hydrofonin vastaanottama signaali, joka on tuloksien kannalta tärkein. Kuvassa 23 on nähtävissä hydrofonin tallentama verhokäyrä. Verhokäyrästä voidaan erottaa ensimmäisenä saapuva suorasignaali muista pinnasta, pohjasta ja seinämistä tulevista kaiuista. Verhokäyrän aikajanasta voi tarkistaa, että ensimmäisenä hydrofonille saapuva signaali on yhtä pitkä kuin asetettu pulssin pituus.

Ohjelma laskee äänenpainetason ensimmäisestä hydrofonille saapuneesta suorasta signaalista pulssin pituuden mukaan. Jos muualta saapuneet kaiut saapuvat osittain samaan aikaan hydrofonille, tulos on virheellinen. Kaiut voidaan erottaa suorasta signaalista muuttamalla pulssin pituutta tai muuttamalla elementtien etäisyyksiä. Ensiksi mainittu on näistä vaihtoehdoista helpoin ja signaalista saatava data ei olennaisesti heikkene. Mittausjärjestelyissä tulee kuitenkin noudattaa 5.1 luvussa esitettyjä yleisiä periaatteita, jotta pulssin pituuden säätämiseen jää riittävästi pelivaraa. Käytännössä on mahdollista suorittaa mittauksia pienilläkin etäisyyksillä. Silloin joudutaan turvautumaan erityisen lyhyeen pulssin pituuteen, mikä johtaa liian pieneen datan määrään.



Kuva 23. *Hydrofonin tallentama 45 kHz:n sinimuotoisen impulssin aikaansaama verhokäyrä.*

Jokaista ennalta määritettyä taajuutta kohden saadaan 10 suorasta signaalista saatua datasarjaa, joista ohjelma hylkää ensimmäisenä ja viimeisenä tulleet signaalit. Hylkäys perustuu hydrofonin heräämiseen ja sammumiseen, jolloin vastaanotetussa signaalissa voi olla puutteita. Lopuista signaaleista ohjelma laskee keskiarvon ja ilmoittaa keskiarvon perusteella äänenpainetason. Taulukosta 2 voi nähdä mittausohjelman keskeisimmät parametrit.

Taulukko 2. *Mittausparametrit*

Keskeisimmät mittausparametrit	
Taajuusalue	10–100 kHz
Amplitudi	0,35 V
Pulssin pituus	0,7 ms
Pulssin toistojen määrä	10
Näytteenottotaajuus	1 MHz
Taajuussuodattimen rajataajuus	100 kHz
Pyyhkäisyn kaistanleveys	1/12 oktaavia
Mittausetäisyys	1,21 m
Lämpötila	20 °C
Suolapitoisuus	0 ppt
Mittausympäristö	vesi

Ensiksi määritettiin oikea lähettimen etäisyys levystä. Lähettimen suurimman dimension D (n. 11 cm) perusteella laskettiin korkeimman taajuuden kaukokenttäehdoksi, kaavan 53 perusteella, n. 80 cm. Hydrofoni tulisi laittaa mahdollisimman lähelle levyä, mutta testipenkin rakenteen vuoksi hydrofonin tukiprofiili asennettiin 21 cm:n etäisyydelle levyn taakse. Kaukokenttäehdon varmistamiseksi lisättiin laskennalliseen arvoon 20 cm, jolloin lähettimen tukiprofiilin ja levyn väliseksi etäisyydeksi saatiin 1 metri. Kokonaisetäisyydeksi uloimpien profiilien välillä saatiin 1,21 m.

Altaan leveyden ollessa 3,0 m, oli mahdollista järjestää mittaus leveyssuunnassa. Testipenkki asennettiin horisontaaliseen tukiprofiiliin siten, että uloimmat tukiprofiilit olivat yhtä kaukana altaan sivureunoista. Mittauspaikka altaassa oli altaan pituuden suhteen keskellä allasta (2,25 m), jolloin päätyseinistä tulevista kaiuista ei tarvitsisi huolehtia. Altaan maksimisyvyys on 2,5 m ja vesiraja määritettiin 2,4 m:iin, osittain laskennallisista ja myös käytännöllisistä syistä. Riittävä mittaussyvyys saavutettaisiin 1,2 m:n syvyydessä, pohja- ja pintakaikujen erottamiseksi mittausdatasta.

Koska näytelevyt olivat eri korkuisia, oli niiden tukiprofiili asennettava aina omalle korkeudelle. Diffraktio-ilmiön minimoimiseksi mittauslinjaa tuli siirtää hieman sivuun näytelevyn leveyden suhteen. Koska tukiprofiileja ei voinut siirtää altaan pituuden suhteen, asennettiin hydrofoni ja lähetin tukiprofiilin sivuun, kuten kuvasta 19 voi nähdä. Tällä menettelyllä saatiin mittauslinjaa siirrettyä 2 cm sivuun keskilinjasta.

Hydrofonista ja lähettimestä määritettiin niiden rakenteellisia mittoja, jotta niiden aktiivisten elementtien keskikohta saatiin määritettyä kohtisuoralle mittauslinjalle levyn suhteen. Tästä syystä hydrofonin tukiprofiili on hieman korkeammalla kuin lähettimen tukiprofiili, minkä voi kuvasta 18 havaita. Tukiprofiileissa on sivuilla urat, joihin lähetin ja hydrofoni teipattiin kiinni johto-osan viimeisestä kohdasta. Uran avulla mittalaitteet saatiin mahdollisimman suoraan. Testipenkin nostamisessa ja siirtämisessä käytettiin katossa kiskoilla kulkevaa kraanaa. Alumiiniprofiilien epäsymmetrinen sijoittelu johti testipenkin epätasapainoon, joka korjattiin testipenkin toiseen päähän sijoitetuilla painoilla.

4.5 Tulosten luotettavuus ja virhelähteet paneelitestissä

Tyypillisiä virhelähteitä altaassa suoritetuissa mittauksissa ovat kaiut seinämärakenteista ja pinnasta, kaiut mittausympäristön rakenteista ja diffraktiosta. Kaiut, jotka johtuvat altaan mitoista voidaan eliminoida pulssin pituutta säätelemällä. Rakenteista johtuvat häiriöt tulisi ottaa huomioon rakenteiden suunnitteluvaiheessa. Materiaaleina tulisi käyttää veden kanssa akustisesti yhteensopivia materiaaleja, mutta se ei aina ole käytännöllistä riittävän vankan rakennelman aikaansaamiseksi. Kaikuja rakenteista voidaan

vähentää myös suunnittelemalla vedenalaiset rakenteet mahdollisimman pieniksi, tai voidaan vuorata ääntä eristävillä materiaaleilla kaikujen eliminoimiseksi. [46]

Paneeliin osuva äänikenttä diffraktoituu paneelin reunoista kääntäen ääniaallon paneelin taakse. Diffraktoituneet ääniaallot saapuvat hydrofonille lähes samanaikaisesti kuin paneelin läpi edennyt ääniaalto aiheuttaen signaaliin häiriöitä. Diffraktion aiheuttama virhe on tyypillinen paneelitesteissä, joissa paneeli ei ole riittävän suuri. Diffraktion voimakkuus riippuu käytetystä taajuudesta, sekä veden ja näytteen akustisten impedanssien yhteensopivuudesta. Diffraktio-ilmiö on voimakkaampaa matalilla taajuuksilla, sekä veden ja materiaalin akustisten impedanssien eron kasvaessa. Hyvin ääntä eristävillä materiaaleilla diffraktion vaikutus mittaustuloksiin on suhteessa suurempaa. [46]

Diffraktion vaikutusta voidaan minimoida käyttämällä mahdollisimman suuria testipaneeleita tai sijoittamalla hydrofoni lähelle testipaneelia. Hydrofonia ei kuitenkaan tulisi sijoittaa symmetrisesti näytteen keskelle, koska silloin diffraktoituneet ääniaallot saapuvat hydrofonille samanaikaisesti vahvistaen ilmiön voimakkuutta. Hydrofonin ja äänilähteen muodostama linja tulee kuitenkin olla kohtisuorassa testipaneelin kanssa. Epäsymmetrisen sijoittelun takia testipaneelin muoto ei saisi olla neliön tai ympyrän mallinen. Diffraktion vaikutusta testituloksiin ei täysin voi välttää rajatun kokoisilla näytteille. [46]

Kehittyneemmällä signaalikäsittelyllä diffraktion vaikutus voidaan eliminoida, tai sen vaikutus voidaan mitata tarkkuuden parantamiseksi. Paneelitestejä varten on myös kehitetty testimenetelmä, jossa käytetään äänilähteenä *Parametric array* -tekniikalla tuotettua ääntä. Menetelmässä tuotetaan sekundäärinen matalan taajuuden ääniaalto kahdella primäärisellä korkean taajuuden ääniaallolla. Sekundäärisellä ääniaallolla on pieni sivukeila ja kapea keilanleveys, joka on eduksi diffraktioilmiön ehkäisemisessä. Korkean taajuuden omaava primäärinen ääniaalto vaimennetaan riittävän ohuella metallilevyllä ja matalampi sekundäärinen aalto jatkaa kulkuaan. [46]

Diffraktion vaikutusta paneelitesteissä on tutkinut myös J. C. Piquette *airbox*-menetelmällä, jossa käytetään kahta eri paneelin kokoa ja isomman paneelin kaltaista paneelia, jossa on pienemmän paneelin kokoinen ilmalaatikko (airbox). Tutkimuksessa todettiin pienen paneelin äänen vaimenemisen olevan matalilla taajuuksilla yhtä suurta kuin ilmalaatikkolevyllä, jonka käytännössä tulisi vaimentaa ääntä tehokkaasti. Tutkimuksessa käytetyillä parametreilla voitiin todeta, että diffraktion vaikutus voi liian pienten lateraalisten mittojen omaavilla näytteillä olla lähes yhtä suurta kuin näytettä ei olisi ollenkaan. Diffraktion vaikutus voitiin todeta myös muuttamalla hydrofonin paikkaa lähemmäs näytettä, jolloin diffraktion aiheuttama piikki katosi mittaustuloksista. [48]

Etenemis- ja heijastusvaimennustuloksissa voi näkyä piikkejä tai huojuntaa, jotka johtuvat resonanssista. Jäykkyyden ja/tai taajuuden kasvaessa piikit heikkenevät ja mittaustulos käyttäytyy ennustettavammin. Paneelimittauksissa resonanssista johtuvia piikkejä voi eliminoida käyttämällä useampaa hydrofonia. Useammalla hydrofonilla, riittävän monella mittauksella ja signaalinprosessoinnilla voidaan mittaustulos keskiarvottaa ja saada käyttäytymään odotetulla tavalla. [49]

5. MITTAUSTULOKSET

Tässä luvussa esitetään työssä esiintyneet keskeiset mittaustulokset, jotka vaikuttivat mittausympäristön kehitykseen ja varsinaiset tulokset päivitetyllä mittausympäristöllä. Kaikki merkitykselliset mittaustulokset ovat löydettävissä liitteistä 3 ja 4. Mittausympäristön kehitysvaiheessa suoritettiin myös muita epävirallisia mittauksia, jotka tukevat tässä luvussa esitettyjä havaintoja.

5.1 Ensimmäisen mittausympäristön mittaustulokset

Ensimmäiset mittaukset suoritettiin käyttämällä 5,5-15,5 kHz taajuusaluetta. Mittausohjelmassa käytettiin pyyhkäisyn kaistanleveytenä 1/6-oktaavia ja pulssinpituutta 1 ms. Näytteet puristettiin 6 mm paksujen polykarbonaatista valmistettujen kehysten väliin (700x700 mm), joiden keskellä oli 600x450 mm reikä näytettä varten. Jokaista näytettä varten tehtiin vapaa mittaus, kehyksen kanssa tehty mittaus ja mittaus, jossa näyte oli asennettuna kehykseen. Lähettimen ja hydrofonin väliseksi etäisyydeksi määritettiin aluksi 1,5 m ja näyte asennettiin keskelle. Liitteen 2 kuvaajissa esitetään vapaan mittauksen erotus kehykselliseen mittaukseen, vapaan mittauksen erotus näytemittaukseen ja kehysmittauksen erotus näytemittaukseen. Jälkimmäinen on näistä tärkein ja kuvaa parhaiten näytteen ominaisuuksia. Kaksi edellistä kuvaa kehyksen merkitystä mittaustuloksiin, joista nähdään paremmin myös mittausinstrumenttien paikkojen vaihteluiden vaikutukset mittaustuloksiin.

Materiaaleina testeissä olivat alumiini, polykarbonaatti ja polyuretaani. Ensimmäisissä mittauksissa kaikkien materiaalien kohdalla etenemisvaimennuksen suuruutta ei voida määrittää. Verrattaessa näyte- ja kehysmittauksia erot äänenpainetasoissa eivät kasva taajuuden kasvaessa. Äänenpainetasojen erot ovat välillä -1,0–1,0 dB ja merkittäviä eroja eri materiaalien välillä ei ole. Tietyillä taajuusalueilla äänenpainetasot kasvavat ja toisilla heikkenevät. Muuttamalla lähettimen ja hydrofonin paikkaa mittaustulokset vaihtelevat. Lähettimen ja vastaanottimen ollessa yhtä kaukana näytteestä etenemisvaimennukset ovat pieniä, kuten myös lähettimen ollessa lähellä näytettä. Hydrofonin ollessa lähellä näytettä ja lähettimen kaukana voidaan todeta suurimmat vaihtelut äänenpainetasoissa. Edellä mainitut havainnot voi nähdä Liitteen 2 kuvista 1-5.

Mittauksia jatkettiin vanhalla testimenetelmällä alumiininäytteen kanssa, koska se on näytteistä eniten vaimentava materiaali. Mittausohjelma pidettiin samana edelliseen verrattuna, mutta taajuusalue nostettiin 10–80 kHz:iin. Hydrofonin ripustusetäisyys

näytteestä oli 0,375 m ja lähettimen 0,75 m. Mittausohjelma ilmoitti mittauslaitteiden väliseksi etäisyydeksi n. 1,11 m, joka on 1,5 cm vähemmän verrattuna ripustusetäisyyteen. Liitteen 3 kuvaajasta 1 voidaan nähdä, että kehyksen vaikutus korkeimmilla taajuuksilla heikkenee ja etenemisvaimennus kasvaa taajuuden kasvaessa.

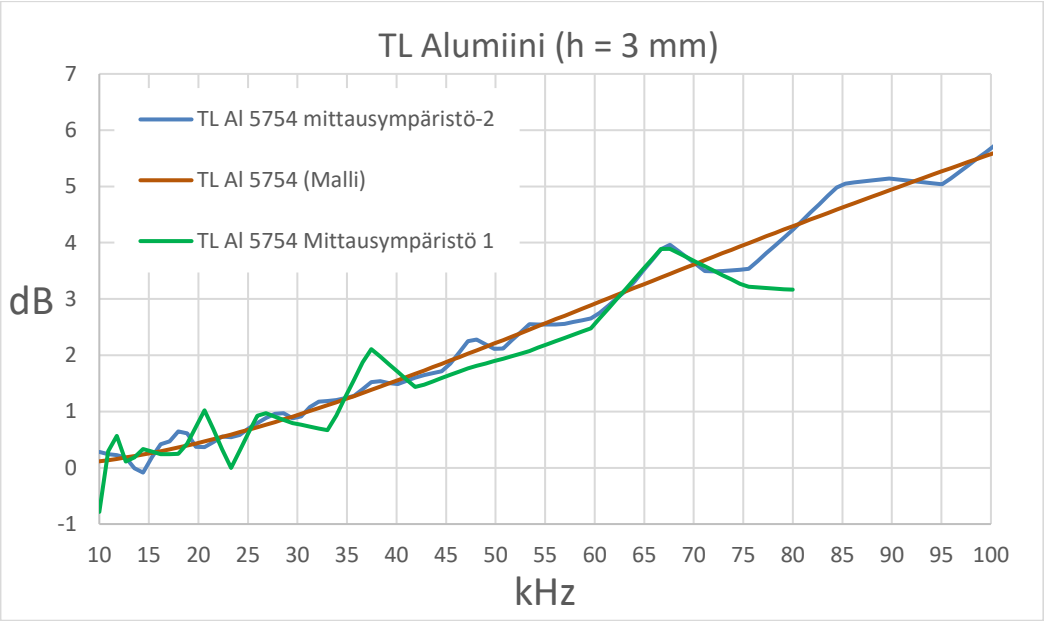
Samalla mittausohjelmalla suoritettiin mittaus tuntemattomalle muovilevylle, joka oli mitoiltaan 20x700x900 mm. Levylle tehtiin kolme mittausta ja levy ripustettiin ilman kehystä. Levyn etenemisvaimennuksen suuruutta ei voida tuloksen perusteella todeta, mutta mittaustulokset kahden viimeisen mittauksen osalta ovat lähes identtiset. Mittausetäisyys toisen ja kolmannen mittauksen osalta ovat toisiaan lähempänä kuin ensimmäinen mittaus. Matalimmilla taajuuksilla tulokset ovat yhteneväisempiä mittausetäisyydestä riippumatta. Mittaustulos nähtävissä Liitteen 3 kuvassa 2.

Edellä esiteltyjen tulosten lisäksi suoritettiin lukuisia muita mittauksia, jotka vahvistivat menetelmässä epäiltäviä puutteita. Mittauksia suoritettiin myös toiseen projektiin liittyvissä mittauksissa, jotka tukivat tehtyjä havaintoja. Tämän lisäksi havaittiin vesimittauksissa, että päivän aikana suoritetut vesimittaukset vaihtelivat ajan mukaan. Aamupäivällä suoritetut mittaukset antoivat matalammat äänenpainetasot kuin iltapäivällä suoritetut mittaukset. Vesimittaustuloksia on esitetty Liitteen 3 kuvassa 3.

5.2 Toisen mittausympäristön tulokset

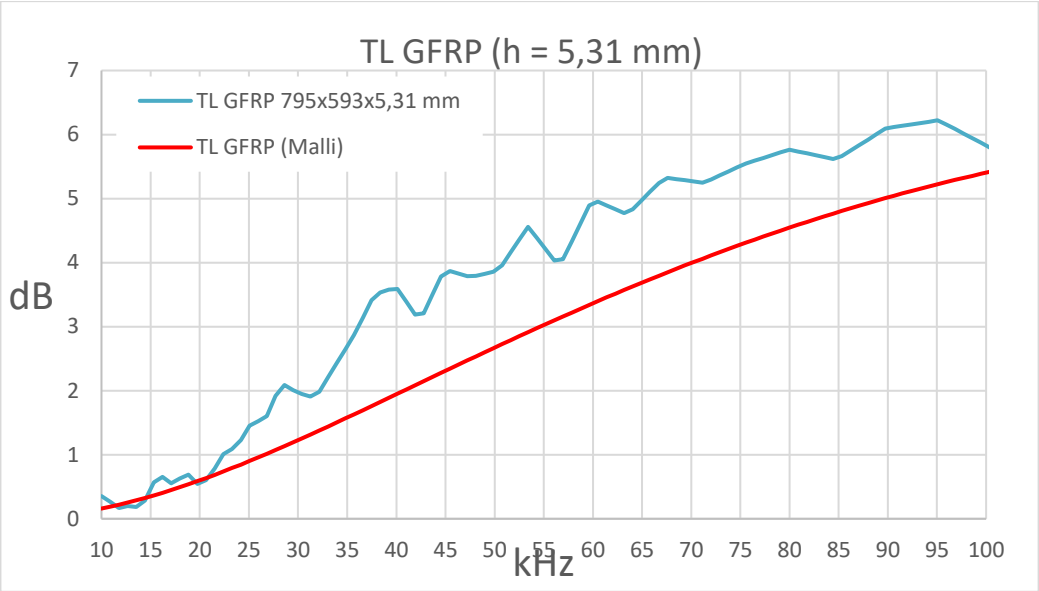
Jokaiselle materiaalille suoritettiin kolme peräkkäistä referenssimittausta ja materiaalimittausta. Aina asetuksen jälkeen altaan annettiin tasoittua 5 minuuttia, jonka jälkeen käynnistettiin mittaus. Mittausten välissä ei ollut odotusaikaa, vaan mittaukset tehtiin heti edellisen mittauksen päätyttyä. Referenssimittauksista ja näytemittauksista laskettiin keskiarvo, joita verrattiin toisiinsa. Tuloksissa ilmoitetaan referenssimittausten ja näytemittausten koko taajuusalueen keskihajonnan vaihteluväli ja keskihajonnan mediaani.

Kuvassa 24 on esitetty alumiinilevyn mittaustulokset. Kuvasta nähdään, että vaimeneminen kasvaa taajuuden kasvaessa ja mukailee kaavan 62 mukaista mallia. Kolmen peräkkäisen mittaustuloksen keskihajonnat vesi- ja materiaalimittauksissa ovat pieniä. Materiaalimittauksissa keskihajonta on vesimittauksiin nähden korkeampaa, mutta on äänenpainetasoltaan enimmillään 0,036 dB. Mittaustuloksen rinnalle on laitettu myös ensimmäisellä mittausympäristöllä saatu vihreä kuvaaja, joka ei noudata mallia yhtä tarkasti.



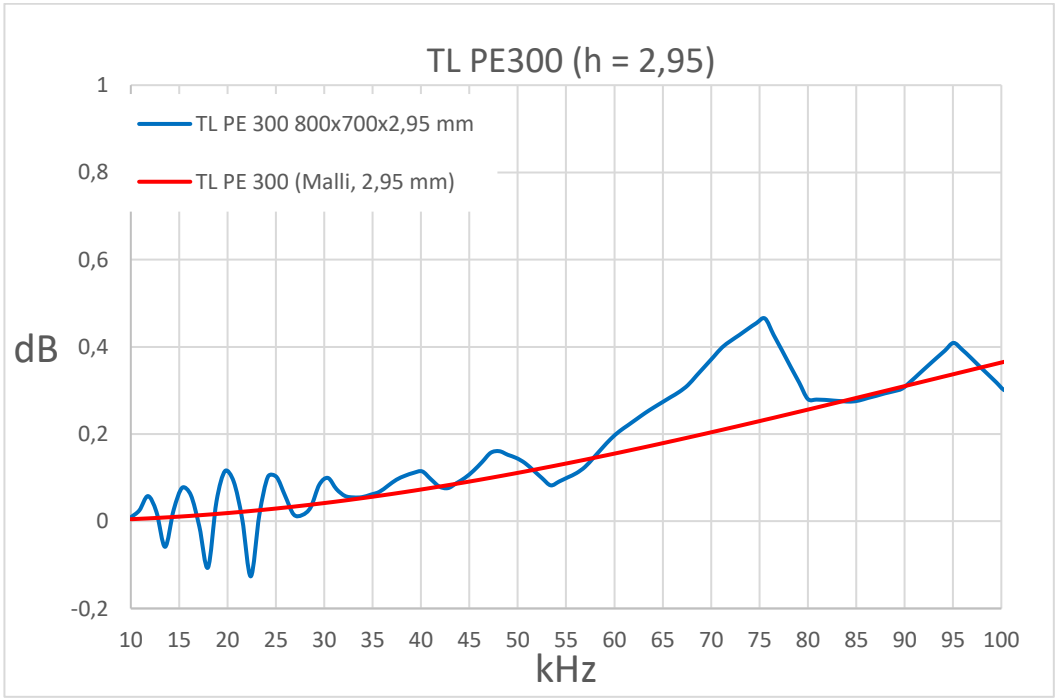
Kuva 24. *$AlMg_3$ 5754 -levyn äänen etenemisvaimennus taajuusvälillä 10-100 kHz.*

Lasikuitulevyllä, jonka paksuus oli 5,31 mm, äänenpainetasot laskivat taajuuden mukaan suhteessa vapaaseen mittaukseen. Keskihajonta vapaissa mittauksissa on yhtä suurta kuin alumiinilevymittauksien vapaissa mittauksissa, mutta näytemittauksissa keskihajonta on huomattavasti suurempaa. Taajuusalueella n. 30–50 kHz keskihajonta oli suurinta, mutta kuitenkin enimmillään n. 0,1 dB. Koko taajuusalueen keskihajonnan mediaani näytteellä oli n. 0,04 dB. Homogeeniselle materiaalille suunnattu malli ennustaisi hieman matalampaa etenemisvaimennusta korkeammilla taajuuksilla. Lasikuitulevyn mittaustulokset ovat nähtävissä kuvassa 25.



Kuva 25. *Lasikuitulevyn etenemisvaimennus taajuusvälillä 10–100 kHz.*

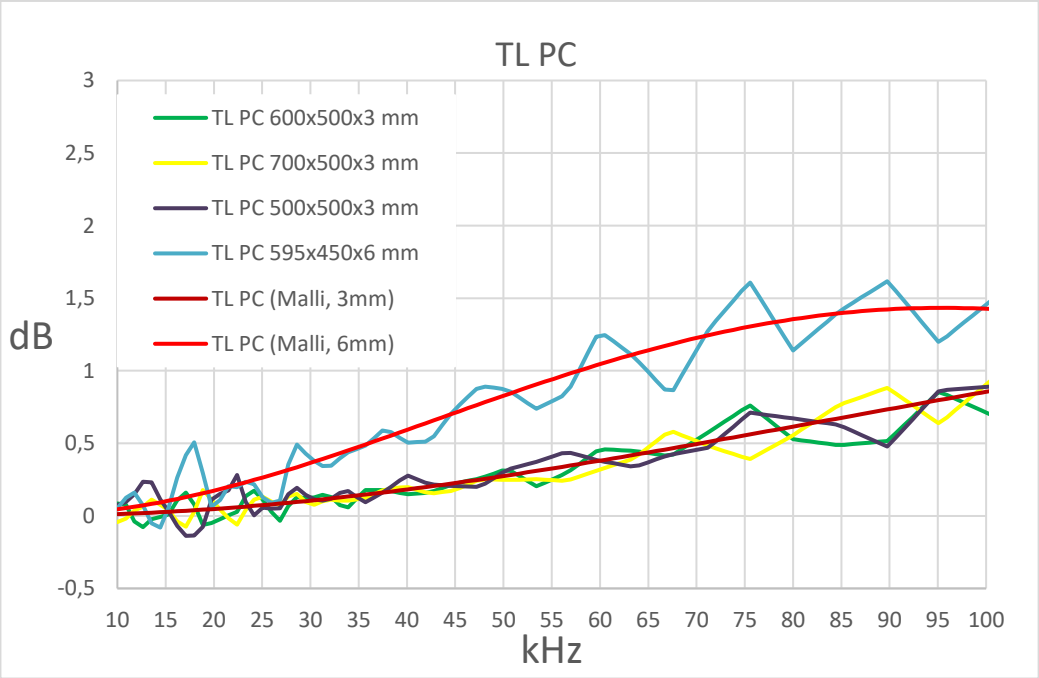
Kuvassa 26 on polyeteenilevyn mittaustulokset. Kuvasta nähdään, että etenemisvaimennus on pientä. Enimmillään etenemisvaimennus on n. 0,6 dB ja vaimeneminen alkaa n. 30 kHz kohdalta. Matalimmilla taajuuksilla on nähtävissä resonanssia ja tulokset ovat linjassa teoreettisen mallin kanssa. Mittauksien keskihajonnat ovat alle 0,03 dB molemmissa mittauksissa.



Kuva 26. *Polyeteenin etenemisvaimennus taajuusalueella 10–100 kHz.*

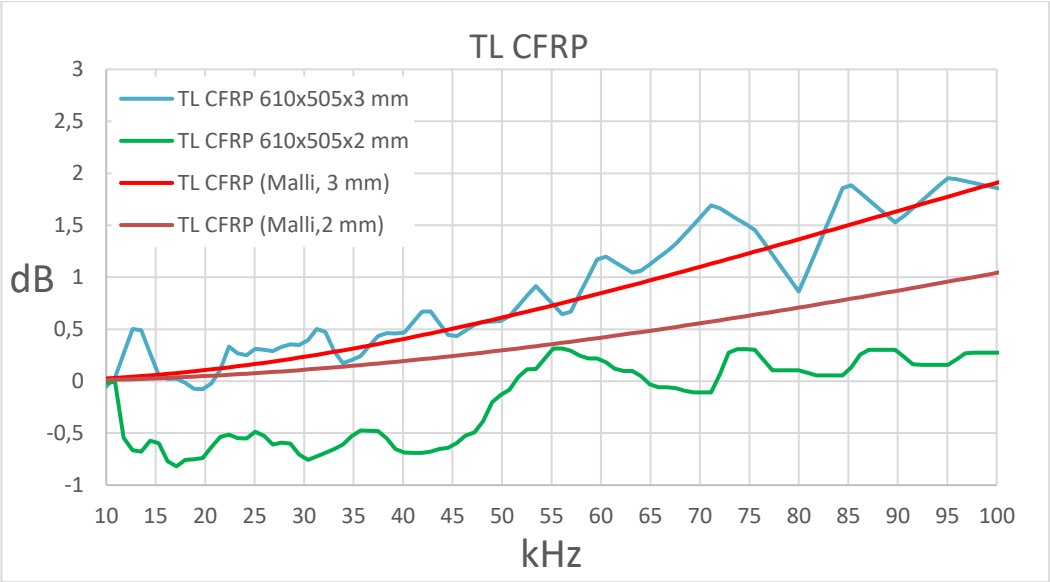
Polykarbonaattilevyjä oli useampaa eri kokoa ja kuvasta 27 voidaan todeta etenemisvaimennusmittausten olevan hyvin lähellä mallin mukaista kuvaajaa.

Polykarbonaattilevyn paksuuden kasvaessa etenemisvaimennuksessa taajuuden suhteen on vaihtelua. Taajuusalueella 50–90 kHz etenemisvaimennuksen vaihtelu on voimakkainta kaikilla näytteillä. Taajuusalueella 10–25 kHz etenemisvaimennus on voimakkaasti epälineaarista. Edellä mainitulla taajuusalueella tulisi diffraktion olla myös voimakkainta. Sivumitoiltaan isoimmalla näytteellä vaihtelut äänen etenemisvaimennuksessa ovat edellä mainitulla taajuusalueella pienintä ja pienimmällä suurinta. Vaihtelusta ei kuitenkaan voida päätellä johtuuko ero diffraktiosta, eri kokoisen näytteen erilaisesta värähtelystä vai eri vaiheessa tulevista signaaleista. Etenemisvaimennus levyillä työn taajuusalueella vaihtelee 0–1,5 dB:n välillä. Keskihajonta mittauksissa oli korkein paksuimmalla näytteellä (0,04 dB).



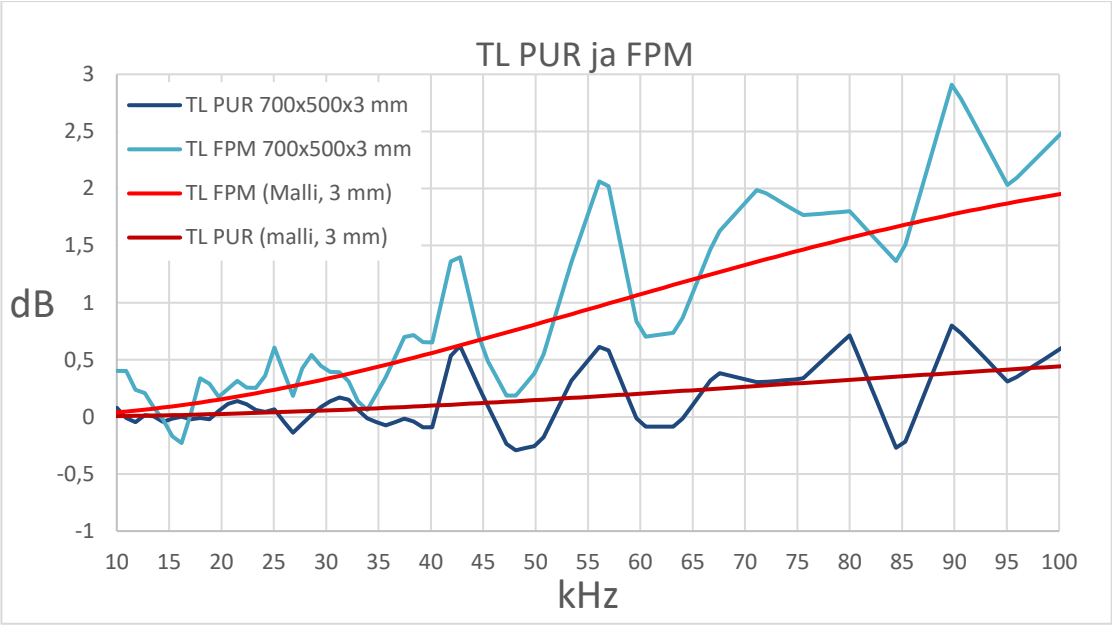
Kuva 27. *Polykarbonaattilevyjen etenemisvaimennukset.*

Hiilikuitulevyn etenemisvaimennuskuvaajat ovat nähtävissä kuvassa 27. Hiilikuitulevyjen etenemisvaimennusmittauksissa käytettiin kahta levyä, joista ohuemman levyn etenemisvaimennus on negatiivista aina taajuuteen 45 kHz asti, jonka jälkeen etenemisvaimennus kasvaa. Etenemisvaimennusta on nähtävissä taajuusalueella 55–100 kHz, mutta se ei juurikaan kasva. Paksumman levyn etenemisvaimennus on säännönmukaisempaa ja seuraa homogeenisen materiaalin mallia. Vahvemman hiilikuitulevyn mittausten keskihajonta oli korkeimmillaan 0,1 dB ja ohuemmalla levyllä 0,03 dB.



Kuva 28. *Hiilikuitulevyjen etenemisvaimennus.*

Elastomeereille tehdyissä mittauksissa käytettiin tukikehikkoa, jonka vaikutus on nähtävissä kuvassa 29. Molempien kuvaajien korkeimmat ja matalimmat kohdat esiintyvät samoilla taajuuksilla. Kuvasta voidaan nähdä, että FPM-kumi vaimentaa ääniaaltoja paremmin, mikä oli oletettua. Kehikossa on monta rajapintaa ja reunaa, joista ääniaallot voivat heijastua tai sirota, jolloin hydrofoni vastaanottaa eri reittejä tulleita ääniaaltoja. Eri reittejä pitkin tulevat ääniaallot tulevat hydrofonille hieman eri aikaan, jolloin kuvaajat eivät ole täysin lineaarisia. Ilmiö on nähtävissä kaikissa kuvaajissa. Mittauksissa keskihajonta oli korkeintaan 0,02 dB FPM-kumin osalta ja 0,04 dB PUR-näytteen kanssa.



Kuva 29. *FPM-kumin ja polyuretaanin etenemisvaimennukset.*

Edellä esitettiin esimerkkejä äänenpainetasomittauksista erilaisten näytteiden, näytevahvuuksien ja mittausteknisten eroavaisuuksien osalta. Materiaalimittausten lisäksi mittauspäivän ensimmäistä ja viimeistä vapaata mittausta verrattiin toisiinsa. Mittauksissa näytteenpidin asetettiin samaan korkeuteen ja päivän ensimmäinen mittaus toimi myös ensimmäisen näytteen referenssimittauksena. Vesimittauksia vertailtiin, koska aikaisemmat mittaukset antoivat viitteitä mittaustulosten muutoksesta päivän aikana. Liitteen 4 kuvissa 2–5 on esitelty vesimittaustuloksia. Liitteen 4 kuvaajassa 2 on kunkin materiaalin vesimittauksen suhde kaikkien vesimittausten keskiarvoon pois lukien kehysmittaukset. Kuvaajasta nähdään vesimittausten olevan samankaltaisia keskenään.

Mittauspäivän ensimmäisillä ja viimeisillä vesimittauksilla ei ole eroa toisiinsa pois lukien kehysmittaukset, joissa kaksi polykarbonaattilevyä muuttaa vapaan mittauksen luonnetta. Edellä mainitut tulokset ovat nähtävissä liitteen 4 kuvaajissa 3–5.

5.3 Äänennopeus ja tiheys

Näytteiden akustisen impedanssin laskemiseksi määritettiin näytteiden tiheys ja äänennopeus. Tiheyden määrityksessä käytettiin Wallace-tiheysmittaria x21B ja äänennopeuden määrityksessä käytettiin Sauter TN-US Version 1.4 01/2018 GB -paksuusmittaria. Paksuusmittarissa on 7 MHz:n anturi, joka soveltuu mittamaan 0,75–80,0 mm seinämävahvuuksia (teräs). Paksuusmittaria voi käyttää myös äänennopeuden selvittämiseen, jos näytteen paksuus on tiedossa. Näytemateriaalien tiheys määritettiin vain yhdestä näytelevystä leikatusta palasta, koska levyjä mahdollisesti käytettäisiin jatkossakin. Näytekappaleiden paksuus mitattiin työntömitalla kolmesta kohdasta. Paksuuden keskiarvoa

käytettiin hyväksi äänennopeuden määrityksessä. Taulukossa 3 on esitetty materiaalien tiheys, äänennopeus ja kriittinen taajuus f_c, jonka merkitystä pohditaan luvussa 6.3.

Taulukko 3. *Näytemateriaalien tiheys ρ, äänennopeus c_l*

	Tiheys (g/cm^3)	*Äänennopeus c_l* (m/s)	*Kriittinen taajuus f_c (kHz)*
Al5754	2,673	6339	77,4
PC (Makroflex)	1,193	2239	281,1
GFRP (36 %)	1,851	3030*	25,1
CFRP (28±3 %)	1,425	3070*	50,2
PUR (Etrane NDI)	1,240	1750*	-
FPM (Vitron)	1,832	1700*	-
PE 300	0,953	2287	569,7

* ulkoinen lähde

Äänennopeuden määrittäminen työssä käytetyllä paksuusmittarin anturilla ei soveltunut komposiittien, polyuretaanin ja FPM-kumin äänennopeuden mittaukseen. Komposiitit ovat anisotrooppisia ja sisältävät useita kohtia, joista ääni voi sirota, jolloin paluusignaali heikkenee olemattomiin. FPM-kumi ja polyuretaani vaimentavat äänisignaalia riittävän hyvin ja korkeataajuinen äänisignaali vaimenee ennen kuin se palaa takaisin anturille. Uuden anturin hankinta näitä mittauksia varten ei ole välttämätöntä ja mallissa käytetään lähteistä saatuja lukuarvoja [50]. Lasikuitukomposiitin äänennopeudeksi määritettiin 3030 m/s. Äänennopeuden määrityksessä käytettiin G. Wróbelin ja S. Pawlakin epoksihartsin lasikuitupitoisuuteen liittyvässä tutkimuksessa johdettua kaavaa [51].

6. TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa analysoidaan luotuja mittausympäristöjä ja mittaustuloksia 2. mittausympäristön osalta. Apuna tulkinnassa käytetään heijastus- ja etenemisvaimennuksen mallia, joka on esitelty luvussa 5.2. Tämän lisäksi esitetään Brekhovskikhin teorioihin perustuvan mallin avulla, miten alumiinilevy vaimentaisi ääniaaltoja, jos tasoaallon tulokulmaa muutettaisiin.

6.1 Mittausympäristö-1

Ensimmäisellä mittausympäristöllä ei saatu luotettavia ja/tai tulkittavia tuloksia, mutta mittaustulokset ja havainnot konkretisoivat paneelitestin mittausympäristöön liittyvää problematiikkaa. Mittauksien elementeillä on mahdollisuus liikkua kolmen akselin suhteen ja mittaustuloksista havaittiin, että pienikin muutos mittaukseen liittyvien elementtien paikan kanssa johtaa erilaiseen tulokseen. Toisin sanoen hydrofonin täytyy olla samassa akustisessa kentässä eri mittauksissa [46]. Elementtien tarkalla paikan määrityksellä varmistetaan myös, että kohtisuoruusehdot ja mittausetäisyydet pysyvät samana.

Elementtien paikan muutoksista voitiin todeta, että hydrofonin ollessa mahdollisimman lähellä näytettä äänenpainetasot vaihtelivat eniten. Kehyksestä ja näytteen reunoista diffraktoituneet ääniaallot saapuvat kauempana sijaitsevalle hydrofonille voimakkaampina aiheuttaen pienemmän etenemisvaimennuksen. [46]

Mittausyksikön ilmoittama etäisyys hydrofonin ja lähettimen välillä poikkesi manuaalisesti mitatusta etäisyydestä. Mittausyksikkö laskee asetetun aikaikkunan aikana lähetetyn signaalin ja vastaanotettujen signaalien saapumisajoista keskiarvon. Keskiarvotetun aikaeron ja mittausohjelmaan asetetun veden äänen etenemisnopeuden perusteella ohjelma laskee instrumenttien välisen etäisyyden. Mittausyksikön ohjelmassa ei huomioida materiaalin aiheuttamaa muutosta ääniaallon etenemiseen. Korkeimman äänennopeuden omaavalla materiaalilla (Al5754) mittausetäisyyden virhe olisi n. 2 mm. Etäisyyden määrityksessä tulisi myös huomioida, että mittauselementtien kiinnityskohta on mittauselementtien keskikohdassa. Keskikohta ei välttämättä ole hydrofonin aktiivinen pinta, jossa signaali vastaanotetaan. Hydrofonit ovat säteiltään ja mitoiltaan erilaisia, joten tutkimuksen toistettavuuden kannalta olisi hyvä ilmoittaa manuaalinen mittausetäisyys ja ohjelman ilmoittama etäisyys. Tässä mittausympäristössä etäisyysmittaukseen vaikutti myös elementtien epätarkka ripustaminen.

Mittaustuloksista voitiin havaita, että matalilla taajuuksilla etenemisvaimennusta ei voida havaita, mutta taajuuden kasvaessa yli 20 kHz:n etenemisvaimennusta voidaan havaita ainakin alumiininäytteellä, ja se voidaan nähdä yksinkertaisen mallin mukaisena, mutta epätarkkana. Mittaustuloksien epätarkkuutta lisäsi kehyksen käyttäminen, joka vaikutti hydrofonin akustiseen kenttään. Ripustustekniikassa näyte tulisi ripustaa suoraan näytteeseen poratuista rei'istä tai kehyksen tulisi vaimentaa ääniaallot. Kolmantena vaihtoehtona kehyksen tulisi olla riittävän iso käytettävän taajuuden suhteen, jotta se ei vaikuttaisi mittauksiin. Viimeisin vaihtoehto on epäkäytännöllinen liian suuren kehyksen ja näytteen koon suhteen. Näytteen ripustustekniikka vaikuttaa myös näytteen värähtelyyn [52].

Mittausympäristön rakenne ei ollut riittävän jäykkä. Painavammat näytteet aiheuttivat puomiin enemmän taipumaa, jolloin näyte oli oletettua syvemmällä. Ripustuksessa käytettävät narut venyivät mittauselementtien painosta, jolloin oletetut linjaukset pettivät. Naruripustus ei ole riittävän jäykkä eliminoimaan elementtien kiertoliikettä, joka voi syntyä veden aaltoliikkeistä. Näytteen kiertyminen johtaa kohtisuoruusehdon pettämiseen.

Mittausympäristön keveys ja ylimääräisten rakenteiden vähäinen määrä veden alla on selkeä etu, mutta käytettävyys on huono. Elementtien paikalleen laittaminen vaatii paljon aikaa vievää mittaamista ja tarkistamista ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Mittauksista saadun datan mukaan saman mittaussarjan mittausten välillä voi olla yli 10 mm ero, joka muuttaa mittaustulosta.

6.2 Mittausympäristö-2

Mittausympäristöllä saatiin mittaustuloksia, jotka käyttäytyivät homogeenisille ohuille levyille tarkoitetun yksinkertaisen mallin mukaisesti. Vapaa- ja näytemittauksessa etäisyydet pysyivät samoina eri mittausten välillä, vaikka rakennelmaa oli siirrettävä mittausten välillä. Muutettaessa lähettimen, hydrofonin ja näytteenpitimen korkeutta voitiin havaita pieni muutos mittausetäisyydessä, mutta mittausten välillä mitat eivät muuttuneet.

Mittausympäristön säätäminen vaatii usean pultin avaamista ja uudelleen kiristämistä. Näytteenpitimien huono liukuminen kannatinprofiilissa, huono ergonomia ja useiden pulttien avaaminen teki näytteen asettamisesta hankalaa. Irrotettu näytteenpidin oli vaikea asentaa tukiprofiiliin, varsinkin näytteen ollessa kiinni näytteenpitimessä. Pystyprofiileja ei voinut asentaa aivan toistensa lähelle, joten hydrofonia ei saanut aivan näytteen viereen. Mahdollisimman lähelle asennettu hydrofoni vähentää diffraktoituneiden ääniaaltojen vaikutusta mittaustuloksiin [52].

Hydrofoni ja lähetin kiinnitettiin yksinkertaisesti teipillä tukiprofiiliin, ja mittauspäivien välillä niihin ei koskettu. Kiinnitystapa ei kuitenkaan takaa hyvää toistettavuutta, jos testirakennelma puretaan ja rakennetaan uudestaan. Kiinnitystapa ei tue myöskään eri mallisten mittalaitteiden, kuten suuntautuvan mittalaitteen asennusta, jota paneelitestissä usein käytetään. [53]

Kehyksellisissä mittauksissa virhettä mittauksiin tuo itse kehys, jonka vaikutusta voi arvioida vertaamalla vapaa-, kehys- ja näytemittausta keskenään. Kehyksen ja näytteen väliin jää pieniä ilmakuplia, jotka voivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Ilman akustinen impedanssi on huomattavasti pienempi kuin veden tai työssä käytettyjen materiaalien. Ääniaallon osuessa ilmakuplaan se vaimenee tehokkaasti [47, s. 287–289]. Ilmakuplien määrää voisi vähentää käyttämällä erilaista kehystä, jossa kontaktipinnat olisivat minimoitu. Kehyksen kanssa tehtyjä mittauksia ei kirjallisuudesta löydy, mutta akustisia paneelimittauksia elastomeereille on tehty jäykän taustalevyn avulla. [49]

Mittausympäristön toimivuuden varmistamiseksi lisämittauksia alumiinilevyllä olisi voinut tehdä. Työn mittauksissa käytettiin pulssin pituutena 0,7 ms. Eri pulssin pituuksilla tehdyt mittaukset olisivat voineet kertoa, miten lyhyellä pulssin pituudella saadaan mallin mukaisia ja/tai tarkempia tuloksia. Pulssin pituuden tulisi olla mahdollisimman lyhyt diffraktion ehkäisemiseksi [46]. Mittauksia olisi ollut hyvä tehdä paksummilla näytteillä. Työssä käytettyjen näytteiden etenemisvaimennus on jäykkyyskontrolloitua, eikä massakontrolloitua etenemisvaimennusta ei havaittu. Materiaalin vaimennuskertoimen määrityksessä paneelin tulisi olla riittävän paksu [42]. Taajuusalueena käytettiin 10–100 kHz, joka oli VDS:n kannalta mielenkiinnon kohteena. Mittaukset korkeammalla taajuusalueella, yhdessä paksumpien näytteiden kanssa, olisivat mahdollistaneet etenemisvaimennuksen jaksollisuuden havaitsemisen [15, s. 155].

6.3 Mittaustulosten tulkinta

Homogeeniset ja jäykät materiaalit käyttäytyivät akustisissa mittauksissa akustisten impedanssien ja yksinkertaisen mallin mukaisesti. Alumiinilevy noudattaa tarkimmin mallin kuvaajaa koko taajuusalueella. Polyeteenilevyssä on nähtävissä selkeä jaksollinen resonanssi-ilmiö, joka tasoittuu taajuuden ylittäessä 25 kHz. Eri kokoisilla polykarbonaattilevyillä oli tarkoitus tutkia diffraktion vaikutusta mittauksissa. Diffraktion vaikutuksesta taajuusalueella 10–20 kHz saatiin viitteitä, mutta kyseisellä taajuusalueella mittauksissa on liian paljon hajontaa. Diffraktion vaikutus olisi voinut tulla paremmin esille käyttämällä paksumpia ja sivumitoiltaan erikokoisia näytteitä, kuten tässä, mutta isommilla eroilla.

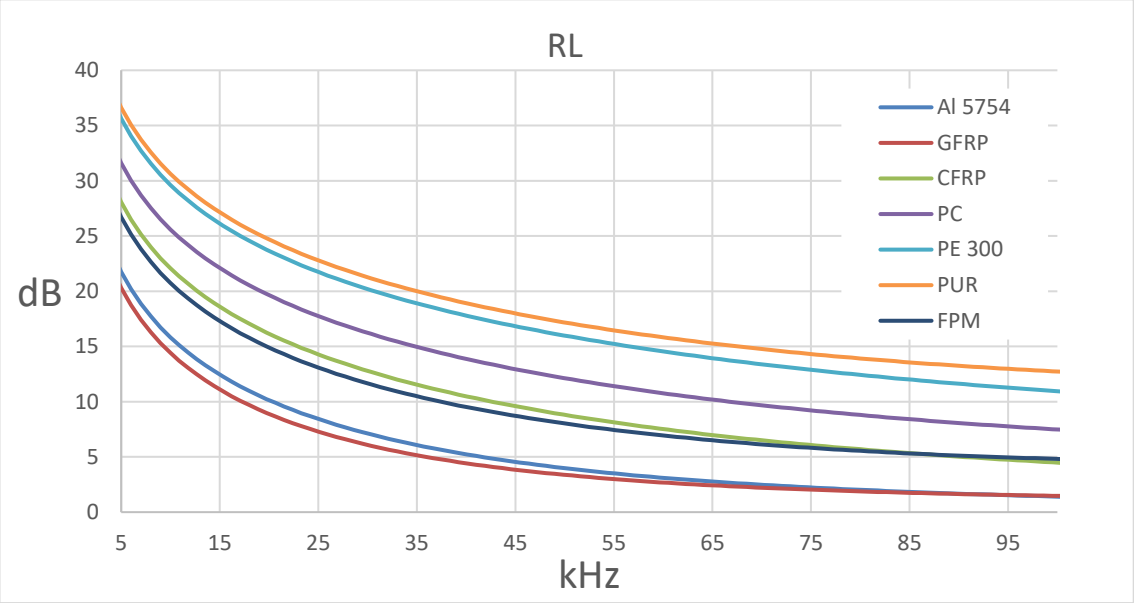
Taajuusalueella paksumman lasikuitulevyn etenemisvaimennus oli suurempaa kuin akustiselta impedanssiltaan vastaavan homogeenisen materiaalin etenemisvaimennus. Lasikuitulevyn suurempi etenemisvaimennus johtuu levyn rakenteesta. Komposiittilevyissä on enemmän sisäisiä rajapintoja, joista ääniaallot voivat heijastua, taipua tai sirota. On myös mahdollista, että kyseisessä komposiittirakenteessa tapahtuu enemmän äänen absorptiota, mutta lasikuitu ja epoksi eivät ole ominaisuuksiltaan ääniaaltoja parhaiten absorboivia materiaaleja [54].

Hiilikuitulevyjen etenemisvaimennuksien käyttäytyminen poikkesi toisistaan, vaikka levyt ovat ainoastaan eripaksuisia. Kuituvahvistettujen komposiittilevyjen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa paksuus, kuitujen orientaatio laminaateissa, laminaattien asettelu, laminaattien määrä, kuidun laatu, kuidun muotosuhde, kuidun pituus, matriisimateriaalin ominaisuudet, kuidun ja matriisin adheesio, huokoisuus, kuitujen osuus komposiittirakenteessa ja valmistusmenetelmä [53]. Mekaaniset ominaisuudet puolestaan vaikuttavat levyn värähtelyyn [54]. Ohuemman hiilikuitulevyn erilainen käyttäytyminen voi johtua eri määrästä kuitukerroksia ja niiden erilaisesta asettelusta. Asian varmistamiseksi tarvittaisiin enemmän tietoa kyseisten hiilikuitulevyjen valmistuksesta ja ominaisuuksista. FRP-kumi- ja polyuretaanimittauksissa oli samoja puutteita kuin ensimmäisellä mittausympäristöllä tehdyissä mittauksissa ja erilaista ripustustekniikkaa olisi pitänyt käyttää. Tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, että FRP-kumi vaimentaa ääntä tehokkaammin.

Aikaisemmissa mittauksissa havaitut erot vesimittauksissa johtuivat lähettimen puutteellisista alkuvalmisteluista. Lähetin ei ollut lionnut vesialtaassa mittauksia aloittaessa. Mittausinstrumentteja tulisi liottaa altaassa vuorokausi ennen mittauksia, jotta niiden ominaisuudet eivät muutu mittauksien aikana. Tämän lisäksi kuplien muodostus instrumenttien pintaan on voimakkaampaa, jos lähetin siirretään altaaseen kuivana ja lämpimämpänä kuin altaan vesi. [44]

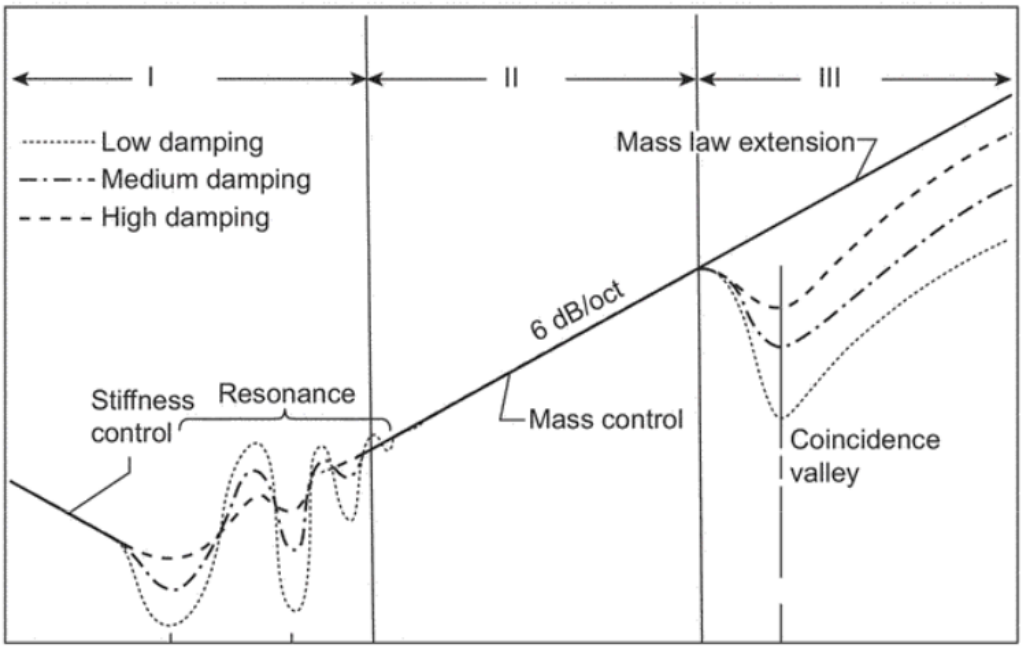
Työssä ei mitattu heijastusvaimennusta, joka olisi vaatinut toisen hydrofonin paneelin eteen. Näytteiden heijastusvaimennusta suoritettujen etenemisvaimennusmittauksien kaltaisissa olosuhteissa voidaan arvioida yksinkertaisen mallin avulla, joka on nähtävissä kuvassa 30. Kuvasta nähdään heijastuneen ääniaallon menettämä äänenpainetaso taajuuden suhteen. Heijastusvaimennus on suurinta materiaaleilla, joiden akustinen impedanssi on lähempänä väliaineen akustista impedanssia. Malli tukee etenemisvaimennusmittauksien tuloksia, mutta mallia ei voi soveltaa ei-heterogeenisiin ja absorboiviin näytteisiin. Edellä mainittu ehto sulkee pois komposiittirakenteet ja elastomeerit. Samoja ehtoja noudattava etenemisvaimennusmalli osoitti, ettei mallia voi käyttää komposiittien kanssa. Elastomeerien suhteen mallin toimivuutta ei voida varmentaa puutteellisen

mittaustavan vuoksi, mutta heijastusvaimennuksen tulisi olla esitettyä suurempaa absorption vuoksi.



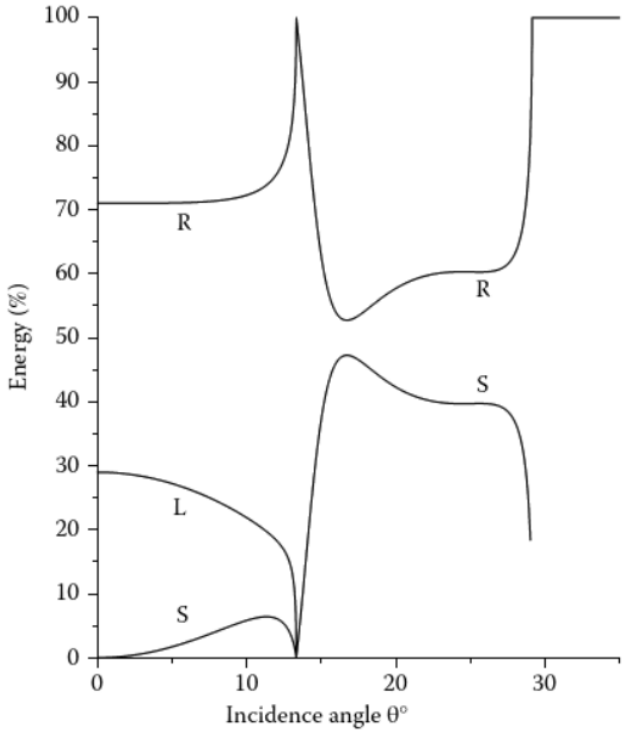
Kuva 30. *Työhön valittujen materiaalien teoreettinen heijastusvaimennus*

Materiaaleille ei tehty mittauksia eri tulokulmilla, jolloin taivutusaalto levyssä aktivoituu. Tuloksissa ei ole havaittavissa viitteitä taivutusaallosta, mutta ilmiön tunnistaminen on tärkeää akustisen ikkunan suunnittelussa. Taivutusaallon etenemisnopeus on taajuudesta riippuvainen ja tietyllä taajuudella vedessä kulkevan ääniaallon aallonpituus on yhtä suuri kuin levyn taivutusaallon aallonpituus. Tätä taajuutta kutsutaan kriittiseksi taajuudeksi f_c [25, 185–195]. Kriittisessä taajuudessa ääniaallon levyyn muodostama taivutusaalto on aallonpituudeltaan yhtä suuri kuin levyssä vapaasti esiintyvä taivutusaalto ja äänen etenemisvaimennus laskee merkittävästi. Ilman ääntä vaimentavia tekijöitä etenemisvaimennus laskisi teoriassa nollaan. Kriittisessä taajuudessa etenemisvaimennus voi laskea alle tason, joka olisi kyseessä ääniaallon osuessa tasoon kohtisuorasti. Paneelin kriittinen taajuus voidaan määrittää laskemalla, ja siihen vaikuttavat levyn jäykkyys ja rakenne [57]. Kuvassa 31 on esitetty homogeenisen paneelin etenemisvaimennukseen vaikuttavat kolme päätekijää. Matalimmilla taajuuksilla etenemisvaimennus on jäykkyyden kontrolloimaa, jolloin paneelissa esiintyy resonanssia. Taajuuden kasvaessa resonanssi vaimenee ja etenemisvaimennuksen määrittää paneelin pintatiheys m_p. Taajuuden edelleen kasvaessa saavutetaan paneelin kriittinen taajuus ja etenemisvaimennus laskee merkittävästi kapealla taajuusalueella. Työn materiaalien kriittiset taajuudet ovat esitetty taulukossa 2. [58, s. 352–354]



Kuva 31. *Paneelin etenemisvaimennusvaiheet taajuuden kasvaessa. [58, s. 353]*

Kulman muutos vaikuttaa myös paneelin etenemis- ja heijastumisvaimennukseen pitkittäisen ja poikittaisen ääniaallon luoman kompleksisen akustisen impedanssin myötä, kuten luvussa 2.4 on esitetty. Levyyn kohdistuvan ääniaallon tulokulma määrittää pitkittäisen ja poikittaisen ääniaallon etenemiskulman levyssä. Kulman kasvaessa kriittiseen kulmaan θ_c, pitkittäinen ääniaalto heijastuu levyn pinnasta kokonaan ja levyssä vaikuttavat enää poikittaisen ääniaallon aikaansaamat värähtelyt. Kulman edelleen kasvaessa myös poikittainen ääniaalto heijastuu levyn pinnasta, eikä levy enää välitä paineaaltoja väliaineeseen [59, s. 111–122]. Kuvassa 32 on havainnollistettu edellä mainittua ilmiötä alumiinilevyn heijastusvaimennuskertoimen (R), pitkittäisen aallon etenemisvaimennuskertoimen (L) ja poikittaisen aallon etenemisvaimennuskertoimen (S) avulla.



Kuva 32. *Alumiinilevyn etenemis- ja heijastusvaimennuskertoimet eri ääniaallon tulokulmilla. [59]*

Paneelin etenemis- ja heijastusvaimennukseen vaikuttaa paneelin kiinnitystapa, joka muuttaa värähtelyä levyssä [60]. Työn mittauksissa ja malleissa ei otettu huomioon kiinnitystavan vaikutusta ja sitä ei voi tuloksista nähdä. Mittausympäristön suunnittelussa levyn kiinnitystapa pyrittiin pitämään mahdollisimman minimaalisena, jotta se vaikuttaisi mahdollisimman pieneen alaan levystä. Levy olisi mahdollista kiinnittää ripustukseen myös puristimilla.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä oli kaksi osakokonaisuutta, joista ensimmäinen keskittyi vedenalaiseen ja materiaalien akustiikkaan. Toisessa osioissa kehitettiin mittausympäristöä materiaalien akustisien ominaisuuksien määrittämiseksi. Tässä luvussa käydään läpi molemmista osakokonaisuuksista löydetyt havainnot, esitetään kuoren valintaan liittyviä muita tekijöitä ja annetaan vaihtoehtoja kuoren materiaalivalintaan.

7.1 VDS:n akustisen ympäristön tunnistaminen

VDS:n akustisen suorituskyvyn suunnittelu on monimutkainen tehtävä. Suunnittelun lähtökohtana on ääniaaltojen etenemisen tunnistaminen meriympäristössä, jossa VDS:a halutaan käyttää. Meriympäristöt poikkeavat toisistaan syvyyden, lämpötilaprofiilien, suolapitoisuuden, eliöstön, virtauksien, pohjan ominaisuuksien, taustamelun ja olosuhteiden perusteella. Jokaisella tekijällä on vaikutuksensa ääniaaltojen etenemiseen ja niiden tunnistaminen mahdollistaa kohteen tarkan paikan määrityksen. Esimerkiksi Itämerellä on epätyypillinen lämpötilaprofiili verrattuna muihin meriin. Itämeri, matalana murtovesialueena, omaa suolaisemman vesipatsaan pohjassa suhteessa ylempiin vesikerroksiin. Suolaisemmassa pohjavedessä ääniaallot kulkevat selvästi nopeampaa kuin seuraavissa kerroksissa. Suolainen pohjavesi ja kesäajan lämmin, makea pintavesikerros mahdollistavat matalaan mereen etenemiskanavan ääniaalloille. Itämeressä äänennopeusprofiilit vaihtelevat myös alueellisesti. Pohjanmereltä tulevan jaksottaisen suolapulssin vaikutukset ja vuodenaikojen vaihtelut ovat voimakkaampia eteläisellä Itämerellä.[61]

Kuorimateriaalin valinta ei ole helppo tehtävä, koska kuoren pitää pystyä toimimaan akustisena ikkunana laajalle taajuusalueelle ja suojella kaikuluotauslaitteistoa. Työssä tutkittiin eri materiaalikategorioiden etenemisvaimennusta ja esiteltiin niiden mekaanisia ominaisuuksia. Alumiiniseoksesta valmistettu kuori olisi ilmeinen valinta hyvien mekaanisten ominaisuuksien osalta, mutta ääniaaltojen etenemisvaimennus olisi liian suuri korkeilla taajuuksilla. Lähetettyjen ääniaaltojen voimakkaampi heijastuminen alumiinisen kuoren sisäpinnasta lisäisi VDS:n kuoren sisäistä melua vaikeuttaen signaalin käsittelyä. [62, s. 419]

Homogeenisillä polymeerivaihtoehdoilla voidaan luoda akustisesti veden kanssa yhteensopiva kuori, mutta kuori ei kestäisi virtausvastuksen aiheuttamaa painetta suurimmilla vetonopeuksilla. Hiilikuidusta valmistetut komposiittilevyt antoivat viitteitä hyvistä

akustisista ominaisuuksista. Komposiittiratkaisuilla olisi mahdollista luoda VDS:llä mekaanisesti kestävä kuori, jonka akustisia ominaisuuksia voisi optimoida. Erilaisia komposiittirakenteita on tutkittu akustisina ikkunoina ja niitä on käytetty mm. laivojen luotainkupuratkaisuissa [63].

VDS:n kuoren voisi rakentaa kuitulujitetuista laminaateista, lujitetuista kankaista tai sandwich-rakenteesta. Sandwich-rakennetta on käytetty kaikuluotaimissa, jotka vastaanottavat vain itse lähetettyjä pulsseja. Silloin on mahdollista suunnitella rakenne aallonpituuden mukaan ja saada etenemisvaimennus mahdollisimman pieneksi halutulla taajuusalueella. Halutun taajuusalueen tulee olla kuitenkin korkea, koska muutoin kuoresta tulisi liian paksu [64]. VDS:n taajuusalue on laaja ja sillä on liian matala taajuusalue kuoren aallonpituuden mukaiselle suunnittelulle.

Kuitulujitetun komposiittirakenteen etuna on mahdollisuus valita kuitu- ja matriisimateriaalit, jotka ovat akustisesti yhteensopivia veden kanssa. Kuitu- ja matriisimateriaalien suhdetta voi muuttaa, jolloin esimerkiksi rakenteen tiheyttä voidaan säätää. Eduksi voidaan laskea myös kompleksiset muodot, joita metallisilla vaihtoehdoilla ei voida tehdä. Eri kuitulajikkeita voi yhdistellä haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Komposiittien valmistamisessa on kuitenkin haasteita, jotka vaikuttavat tuotteen laatuun. Huokoisuus ja adheesio-ongelmat luovat rakenteeseen ilmataskuja, jotka vaimentavat ääntä tehokkaasti. [65]

Kimmomoduulien, tiheyden ja Poissonin vakion avulla voidaan arvioida homogeenisten ja elastisten materiaalien akustisia ominaisuuksia suhteellisen tarkasti. Mekaanisia aaltoja vaimentavien, viskoelastisesti käyttäytyvien materiaalien kohdalla tarvitaan pidemmälle vietyä materiaalikarakterisointia. Materiaalin rakenteen muuttuessa kompleksiseksi ja/tai kerrostuneeksi lisääntyvät mekaanisia aaltoja vaimentavat rajapintailmiöt. Silloin vaimennuskertoimen määrittäminen akustisena mittauksena on suositeltavaa mallinnuksen tarkkuuden parantamiseksi. [66]

Kompleksisten materiaalien ja/tai rakenteiden akustisia ominaisuuksia voidaan mallintaa elementtimenetelmään perustuvalla FEM-laskennalla [35]. Mahdollisimman tarkka VDS:n akustisen ympäristön mallintaminen FEM-laskennalla vaatii ulkoisten ja sisäisten rakenteiden huomioon ottamista. Rakenne voi tietyillä taajuuksilla resonoida, tai akustisen ikkunan kriittinen taajuus voi olla käyteyllä taajuusalueella. Hydrostaattinen paine ja virtausvastus luovat rakenteeseen jännitystiloja, jotka vaikuttavat rakenteeseen muodostuvien mekaanisten aaltojen syntyyn. Edellä mainitut tekijät muodostavat ympärisäteilevän VDS:n ympärille äänenpainetason keilakuvion, jonka tulisi olla pyöreä ja mahdollisimman symmetrinen. Symmetrinen keilakuvio takaa sen, että kohteen

maksimihavaitsemisetäisyys on suunnasta riippumatta sama [17, s. 60–61]. Todellisen akustisen suorituskyvyn voi varmentaa vasta käytön mukaisilla meritesteillä [45, s.288–289].

7.2 Mittausympäristön kehitys

Akustisissa mittauksissa käytetty allas on mitoiltaan soveltuva paneelimittauksiin halutulla taajuusalueella. Mittausympäristöön voisi rakentaa ominaisuuden, jossa näytelevyä voisi kääntää, jolloin materiaalin akustisia ominaisuuksia eri tulokulmilla voisi arvioida. Heijastusvaimennusmittauksien suorittaminen olisi mahdollista lisäämällä mittausympäristöön hydrofonin myös näytteen eteen. Mittauksissa olisi hyvä käyttää paremmin suuntautuvaa lähetintä ja hydrofonia. Epälineaarisella parametrisellä lähetinjärjestelmällä suuntautuvuutta voitaisiin entisestään parantaa. Suuntautuvuuden paraneminen vähentää diffraktion vaikutusta ja mahdollistaa mittaamisen alle 10 kHz:n taajuuksilla [67]. Mitattaessa laajaa taajuusaluetta olisi hyvä käyttää useampaa kapeammalle taajuusalueelle soveltuvaa mittalaitetta [46]. Mittausympäristön käytettävyyttä voisi parantaa kiskoilla liikuteltavilla mittauselementeillä ja altaan yli menevällä sillalla. Näillä ratkaisuilla mittauksien asetusaika ja ylimääräinen liikuttelu vähenisivät. Altaan akustiikkaa voitaisiin parantaa vuoraamalla altaan reunat ääntä absorboivalla materiaalilla. Isompien vaimennuselementtien käyttö pienentäisi altaan kokoa liikaa. Altaan vuoraus vähentäisi myös altaan ulkopuolelta tulevia ääniä, jolloin mittaustarkkuus paranisi. [68]

7.3 Materiaalin valintaan vaikuttavia muita tekijöitä

VDS:n kuoren tai akustisen ikkunan materiaalivalintaan vaikuttaa akustisten ja mekaanisten ominaisuuksien lisäksi moni muu tekijä. Kuoren ja rungon kiinnitystapa ja yhteensopivuus vaikuttavat kuoren ominaistaajuuteen ja sitä kautta akustisiin ominaisuuksiin [69]. Kiinnityskohdissa on kuorimateriaalin heikko kohta. Syklinen kuormitus ja väärä kiinnitystapa voivat saada aikaan vaurion, joka muuttaa kuoren akustisia ominaisuuksia ja lyhentää käyttöikää [68]. Kiinnitystapa ei myöskään saisi vaikuttaa VDS:n hydrodynaamisuuteen. Ylimääräiset reiät, ulokkeet ja rungon huono muotoilu aiheuttavat turbulenttisia virtauksia ja kavitaatiota. Kavitaatio aiheuttaa paineaaltoja kuoreen ja häiriöitä VDS:n akustiseen ympäristöön, jolloin signaalin käsittely vaikeutuu. Kavitaation aiheuttamat paineaallot kuoreen voivat myös aiheuttaa vaurioita. Akustisen ikkunan pinnanlaatu vaikuttaa elollisen ja elottoman massan kiinnittymiseen, jolla voi olla vaikutusta äänen vaimenemiseen ja VDS:n keilan muodostumiseen [62, s. 240,417–419].

Pinnanlaatu vaikuttaa myös virtausvastukseen. Kuoren välittömässä läheisyydessä tapahtuvat häiriöt voimistuvat nopeuden kasvaessa. Merivesi täyttää VDS:n sisältä ja sisälle kertyy elotonta ja elollista massaa, joka kerääntyy ja kiinnittyy sisäpuolen rakenteisiin. Sisäisiä rakenteita ja kuoren sisäpintaa pitäisi pystyä huoltamaan, jolloin kuoren irrotus ja kiinnitys tulisi olla helppoa. Huoltotoimet eivät myöskään saisi vaurioittaa tai naarmuttaa kuoren pintaa. [71]

7.4 Vaihtoehdot kuoren materiaaliksi ja jatkotoimenpiteet

Kuoren materiaali voidaan valmistaa alumiini- tai titaaniseoksesta. Homogeenisen ja isotrooppisen materiaalin akustinen mallintaminen on yksinkertaisempaa, mikä voidaan katsoa eduksi vastaanotettavien signaalien analysoinnissa. Titaaniseoksen akustinen impedanssi on korkeampi, mutta parempien mekaanisten ominaisuuksien vuoksi kuoresta voidaan tehdä ohuempi ja alittaa alumiiniseoksesta tehdyn levyn etenemisvaimennus. Metallisista materiaaleista valmistettu kuori asettaa myös ehtoja VDS:n runkomateriaalille mahdollisten potentiaalierojen vuoksi [72].

Komposiittikuoren materiaalivaihtoehtoja, kombinaatioita ja valmistustekniikoita on runsaasti. Työn tulosten perusteella hiilikuitukomposiitti on etenemisvaimennuksen suhteen parempi vaihtoehto kuin alumiini. Sitä ei voi kuitenkaan liittää yhteen alumiinisen rungon kanssa ilman hyvää eristystä. Ilman eristystä alumiiniset osat voivat ruostua [72]. Hiilikuitukomposiitin iskulujuus on alhainen ja se voi murtua hauraasti, muuten hiilikuitukokomposiitista voi rakentaa vähintään yhtä lujan rakenteen kuin alumiinista. [73]

Aramidikuitukomposiiteilla voidaan myös rakentaa alumiinirakennetta vahvempi rakenne. Aramidikuitukomposiitti on myös joustava ja kestää paremmin iskuja kuin hiilikuitukomposiitti. Aramidikuidun heikkoutena on huono UV-säteilyn kesto, jolloin VDS olisi suojattava säilytyksen ajaksi auringon valolta tai siihen tulisi lisätä UV-säteilyä kestävä pinnoite. Tämän lisäksi aramidikuitu voi absorboida vettä 3,5 %. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan aramidikuidun kaltainen kuitu on PBO-kuitu (poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole). PBO-kuitu imee itseensä vain 0,6 % vettä ja se kestää hyvin kulutusta, mutta sekään ei kestä UV-säteilyä [74].

Korkean molekyylipainon omaavalla polyeteenikuidulla (UHMWPE) on myös hyvät mekaaniset ominaisuudet. UHMWPE-kuitu ei ime vettä, se kestää UV-säteilyä, ja sillä on alhainen kitkakerroin. UHMWPE-kuidulla on alhainen pintaenergia ja korkea kemikaalien kesto, jolloin kuitu vaatii esikäsittelyä komposiittien valmistuksessa hyvän adheesion saavuttamiseksi matriisimateriaalin kanssa. Kuidun alhainen sulamislämpötila rajaa lisää käytettävien matriisimateriaalien määrää. Kuitu on tiheydeltään 0,97 g/cm^3, joka tekee

siitä mielenkiintoisen vaihtoehdon VDS:n kuorimateriaaliksi. UHMWPE-kuitua sisältäviä komposiitteja on käytetty köysissä, luotiliiveissä, suojapanssareissa, tutkan luotainkuvuissa, lentokoneissa, helikoptereissa ja lääketieteen sovelluksissa [75]. UHMWPE-kuidusta valmistettujen komposiittien akustisia ominaisuuksia on tutkittu ja niille tehty patentteja [54, 76]. Liitteen 1 taulukossa 3 on listattu eri kuitulajien ominaisuuksia.

VDS:n kuoren materiaalivalinnan kannalta on tärkeää tuntea kuoren vaikutus lähetettyyn ääniaaltoon tarkan kaikuluotauksen onnistumiseksi. Kuoren alhainen etenemisvaimennus antaa selkeän edun VDS:n kantaman kannalta, sillä jo 1 dB:n alhaisempi etenemisvaimennus mahdollistaa n. 0,5 km pidemmän kantaman. VDS:n kuoren valintaprosessia voisi jatkaa FEM-mallinnuksella ja tutkia komposiittivaihtoehtoja tarkemmin. VDS:n muut ulkoiset rakenteet ovat myös mahdollista valmistaa komposiitista, jolloin laite kevenisi ja hydrodynaamisten muotojen tekeminen olisi helpompaa. Keilakuvion symmetrian parantamiseksi voisi tutkia vaihtoehtoa, jossa akustinen ikkuna ei ole tasapaksu. Paksuuden vaihtelulla voisi vaikuttaa keilakuvion maksimikohtiin tasoittaen eroa minimikohtien kanssa. Veden alla tehtäviä akustisia mittauksia varten mittausympäristöä tulisi kehittää tai ostaa palvelu laitoksista, joissa mittausympäristöt ovat valmiina ja pitkälle kehittyneet.

LÄHTEET

[1] D. G. Brassington, The Canadian Development of VDS, CFMWS. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): http://www.cntha.ca/static/documents/papers/VDS_Development.pdf

[2] Konsberg-internetsivut, ST2400, Anti-Submarine Warfare Sonar, Variable Depth Sonar. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/anti-submarine-warfare-sonar-st-2400

[3] Thalesgroup-internetsivut, CAPTAS-4 Variable depth sonar. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/captas-4-variable-depth-sonar

[4] Q. Li, Digital Sonar Design in Underwater Acoustics: Principles and Applications, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, s. 190–191. Saatavissa (viitattu 5.9.2019): DOI: 10.1007/978-3-642-18290-7.

[5] M. J. Isakson, T. Neilsen and A. Worley, Inversions of reflection loss measurements of a smooth water/sand interface, in Anonymous Dordrecht: Springer Netherlands, 2006, s. 213-231. Saatavissa (viitattu 5.9.2019): https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/978-1-4020-4386-4_16.

[6] E. Ginzel, B. Turnbull, Determining Approximate Acoustic Properties of Materials, e-Journal of Nondestructive Testing (NDT) ISSN 1435-4934, 2016. Saatavissa (viitattu 5.9.2019): https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzel.pdf.

[7] R. P. Hodges, Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar, Hoboken, NJ: Wiley, 2010. Saatavissa (viitattu 5.9.2019): http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=nlebk&AN=321021&site=ehost-live&scope=site

[8] W. Kuperman, P. Rou, Underwater Acoustics. In: Rossing T. (eds) Springer Handbook of Acoustics. Springer Handbooks. Springer, New York, 2007.

[9] Open University, Seawater: Its Composition, Properties and Behaviour [Internet]. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann; 2002. (Oceanography; vol. 2nd ed. / reprinted with corrections). Saatavissa (viitattu 6.9.2019): http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=nlebk&AN=207279&site=ehost-live&scope=site

[10] P. C. Etter, Underwater Acoustic Modeling and Simulation (5th ed.), CRC Press, 2018. Saatavissa (viitattu 10.9.2019): https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpUAMSE01E/underwater-acoustic-modeling/underwater-acoustic-modeling

[11] D. A. Waite, Sonar for Practising Engineers (3rd Edition), John Wiley & Sons, 2002. Saatavissa (viitattu 13.9.2019): https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSPEE0014/sonar-practising-engineers/sonar-practising-engineers

[12] R. J. Urick, Sound Propagation in the Sea, Defence Advanced Research Projects Agency, USA, 1979.

[13] K. Yang et al., Transmission Characteristics of Convergence Zone in Deep-Sea Slope, Applied Acoustics, vol 139, s. 222–228, 2018. Saatavissa (viitattu 18.4.2020): https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.05.004

[14] JR. Apel, Principles of Ocean Physics, London: Academic Press; 1988. Saatavissa (viitattu 11.10.2019): http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=nlebk&AN=241626&site=ehost-live&scope=site

[15] L. E. Kinsler, et al., Fundamentals of Acoustics (4th Edition) John Wiley & Sons, 1999. Saatavissa (viitattu 15.10.2019): https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFAE00003/fundamentals-acoustics/fundamentals-acoustics

[16] L. Qihu, Digital Sonar Design in Underwater Acoustics, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. Saatavissa (viitattu 15.10.2019): https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/978-3-642-18290-7

[17] M. Ainslie, Principles of Sonar Performance Modelling, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. Saatavissa (viitattu 17.10.2019): https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/978-3-540-87662-5

[18] P. Ghadimi et al., Sea surface effects on sound scattering in the Persian Gulf region based on empirical relations, Journal of Marine Science and Application, Harbin Engineering University, 2015. Saatavissa (viitattu 27.10.2019): https://doi.org/10.1007/s11804-015-1306-x

[19] A. N. Gavrilov, Low-frequency acoustic propagation loss in the Arctic Ocean: results of the Artic Climate Observations using Underwater experiment, The Journal of Acoustical Society of America, 2006. Saatavissa (viitattu 28.10.2019): https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a433378.pdf

[20] H. Hobæk, H. Sagen, On underwater sound reflection from layered ice sheets, Cornell University, 2016. Saatavissa (viitattu 28.10.2019): https://arxiv.org/abs/1604.02247v1

[21] A. Hirose, K. Lonngren, Fundamentals of Wave Phenomena (2nd Edition) - 5.4 Sound Waves in Liquids, Institution of Engineering and Technology, 2010. Saatavissa (viitattu 2.12.2019): https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011E0O94/fundamentals-wave-phenomena/sound-waves-in-liquids

[22] L. Cremer, M. Heckl, B. Petersson, Structure-Borne Sound: Structural Vibrations and Sound Radiation at Audio Frequencies (3rd; ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. Saatavissa (viitattu 12.2.2019): https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/b137728.

[23] Pedagogiikka netissä (internet-sivu). Saatavissa (viitattu 2.12.2019): https://peda.net/pori/perusopetus/koulujen-kotisivut/pl7/psyl/opetus/oppiaineet22/fysiikka/7-luokka/7-aallot/v%C3%A4r%C3%A4htelij%C3%A4

[24] M. Harrison, Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles, Butterworth-Heinemann, pp. 234–268,2004. Saatavissa (viitattu 2.12.2012) https://doi.org/10.1016/B978-075066129-4/50007-9

[25] F. Fahy et al., Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response (2nd ed.), Elsevier Science & Technology, 2006. Saatavissa (viitattu 3.12.2019): https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=287926

[26] R. M. Redondo, Optimization of Bending Wave Loudspeakers, Master's Thesis, Chalmers University of Technology, 2007. Saatavissa (viitattu 3.12.2019): https://www.semanticscholar.org/paper/Optimization-of-Bending-Wave-Loudspeakers-Redondo/0149bd024566a101b9b99ca78094d19a1d468127#extracted

[27] V. Giurgiutiu, Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors, Academic Press, 2nd ed. Oxford, England: Elsevier; s. 199–292,2014. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418691-0.00005-8

[28] L. M. Brekhovskikh, Waves in Layered Media, Elsevier (2nd Edition), 2012. Saatavissa (viitattu 30.10.2019): https://books.google.fi/books?id=tDuNmVJAPXEC&printsec=frontcover&dq=bibliogroup:%22Applied+mathematics+and+mechanics%22&hl=fi&sa=X&ved=0ahUKEwjG8tK6isTlAhW9ysQBHVF7CHsQ6AEIKjAA#v=onepage&q&f=false

[29] H. Bai et al, From Local Structure to Overall Performance: An Overview on the Design of an Acoustic Coating, Materials (Basel, Switzerland)*,* vol. 12, *(16),* pp. 2509, 2019. Saatavissa (viitattu 14.11.2019): https://doi.org/10.3390/ma12162509

[30] B. Yuan et al, Underwater acoustic properties of graphene nanoplatelet-modified rubber, Journal of Reinforced Plastics and Composites*,* vol. 37, *(9),* pp. 609-616, 2018. Saatavissa (viitattu 14.11.2019): https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1177%2F0731684418754411

[31] I. Herrero-Durá et al., Limits of perfect sound absorption in thin aluminum square plates, Conference Paper, EuroNoise, Crete, 2018. Saatavissa (viitattu 15.11.2019): https://www.researchgate.net/publication/325425667_Limits_of_perfect_sound_absorption_in_thin_aluminum_square_plates/link/5b0d69354585157f871f8b53/download

[32] L. Sun et al., Measurement of sound absorption by underwater acoustic material using pulse-separation method, Applied Acoustics, volume 85, pp. 106–110, 2014. Saatavissa (viitattu 19.2.2012): https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.04.009

[33] M. Oblak et al., An impedance tube submerged in a liquid for the low-frequency transmission-loss measurement of a porous material, Advance Knowledge in Applied Acoustics, Electronics Newsweekly, 2018 Aug 28. Saatavissa (viitattu 19.2.2012): https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/2091972500?accountid=14242

[34] D. M. Kenney et al., A short Water-Filled Pulse Tube for the measurement of the Acoustic Properties of Materials at Low Frequencies, väitöskirja, Georgia Institute of TechnologySep, 1997. Saatavissa (viitattu 19.2.2020): https://www.icacommission.org/Proceedings/ICA1998Seattle/pdfs/vol_4/2833_1.pdf

[35] L. Guolong, et al., Acoustic Characteristics of Underwater Composite Materials at Oblique Incidence of Sound Wave, Noise & Vibration Worldwide. 2013 May;44(5):12–7. Saatavissa (viitattu 19.2.2020): https://doi.org/10.1260/0957-4565.44.5.12

[36] S.J. Lee et al., Acoustic characteristics of composite materials as acoustic window at oblique incidence of sound waves, Current Applied Physics, volume10 (2, 2010, s. 381–385). Saatavissa (viitattu 27.2.2020): https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.06.031

[37] J. D. N. Cheeke, Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, CRC Press LLC, 2012. ProQuest Ebook Central. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=945471

[38] Kevra-internetsivut, Prepreg, Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://kevra.fi/tuotteet/lujitteet/prepreg/

[39] Teledyne RD Instruments, Ocean Surveyor/Ocean Observer-manuaali. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): http://www.teledynemarine.com/Documents/Brand%20Support/RD%20INSTRUMENTS/Technical%20Resources/Manuals%20and%20Guides/Ocean%20Surveyor_Observer/Ocean%20Surveyor%20Installation%20Guide_Apr18.pdf

[40] E. Ginzel, R, MacNeil, R. Ginzel, M. Zuber, A. Sinclar, Acoustic Properties of the Elastomeric Materials Aqualene™ and ACE™. The e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934, Vol.20, 2015. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://www.ndt.net/article/ndtnet/2015/9_Ginzel.pdf

[41] Rado-internetsivut, FPM, Fluoro Rubber. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://www.rado-rubber.com/specialities/fpm

[42] P. Mott, C. Roland, R. Corsaro, Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber, Journal of The Acoustical Society of America; volume 111(4), s.1782–1790, 2002. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): http://www.polymerphysics.net/pdf/JAcoustSocAmer_111_1782_02.pdf

[43] Matweb-internetsivut, Your Source for Materials Information. Saatavissa (viitattu 18.4.2020): matweb.com

[44] J-P. Marage, Y. Mori, Sonar and Underwater Acoustics, John Wiley & Sons, USA, 2010. Saatavissa (viitattu 5.10.2019): https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSUA00003/sonar-underwater-acoustics/sonar-underwater-acoustics

[45] R. J. Bobber, Underwater electroacoustic measurements. Washington: Naval Research Laboratory, 1970. Saatavissa (viitattu 8.10.2019): https://pdfs.semanticscholar.org/0908/164579de9f46cd00a3756d5c8c508643f775.pdf

[46] V. F. Humphrey et al., Acoustic characterization of panel materials under simulated ocean conditions using a parametric array source, Journal of the Acoustical Society of America*,* vol. 124, *(2*, 2008, s. 803-814). Saatavissa (viitattu 8.10.2019): https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1121/1.2945119

[47] H. Medwin, C. Clay, Fundamentals of Acoustical Oceanography, Boston: Academic Press; 1998. Saatavissa (viitattu 8.10.2019): http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=nlebk&AN=207418&site=ehost-live&scope=site

[48] J. C. Piquette, Direct Measurement of edge diffraction from soft underwater acoustic panels, the Journal of the Acoustical Society of America vol 95, (6,1994, s. 3090–3099). Saatavissa: (viitattu 7.1.2019): https://www.semanticscholar.org/paper/Direct-measurements-of-edge-diffraction-from-soft-Piquette/aa849b17b5870b3c78386d27ca7086cb968f9c04#extracted

[49] G. A. Beamiss et. al., The use of parse planar array sensor for measurements of the acoustic properties of panel materials at simulated ocean conditions, Conference: UACE2015, 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition, Crete, Vol. 1, (2015, s. 235–242). Saatavissa (viitattu 11.3.2020): https://www.researchgate.net/publication/280491034_The_use_of_a_sparse_planar_array_sensor_for_measurement_of_the_acoustic_properties_of_panel_materials_at_simulated_ocean_conditions

[50] Instruction Manual, Digital Ultrasonic Thickness Gauge SAUTER TN-US Version 1.401/2018GB. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://docs.rs-online.com/0186/0900766b81686a61.pdf

[51] G. Wróbel, S. Pawlak, Ultrasonic evaluation of the fibre content in glass/epoxy composites, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 18.1-2: 187-190, 2002. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://www.researchgate.net/profile/Gabriel_Wrobel/publication/42107448_Ultrasonic_evaluation_of_the_fibre_content_in_glassepoxy_composites/links/09e4150e81395c8f23000000/Ultrasonic-evaluation-of-the-fibre-content-in-glass-epoxy-composites.pdf

[52] K. Kim et al., Free vibration analysis of rectangular plate with arbitrary edge constraints using characteristic orthogonal polynomials in assumed mode method. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2012 Sep;4(3):267–80. Saatavissa (viitattu 12.3.2020): https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0095

[53] P. H. Mott et al., Acoustic and dynamic mechanical properties of a polyurethane rubber, The Journal of the Acoustical Society of America, volume 111 (4), 2002, s. 1782–90. Saatavissa (viitattu 14.3.2010): https://doi.org/10.1121/1.1459465

[54] J. Y. Guinge et al., Defense Research Establishment Atlantic, Acoustic Properties of Sonar Dome Materials, 1995. Saatavissa (viitattu 17.3.2020): https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1003730.pdf

[55] Donald V. Rosato, Dominick V. Rosato, Reinforced Plastics Handbook (Third Edition), Elsevier Science, 2005, s. 613–764. Saatavissa (viitattu 17.3.2020): https://doi.org/10.1016/B978-185617450-3/50009-8

[56] M. S. Qatu, Vibration of Laminated Shells and Plates, Academic Press, 2004, s. 109–179. Saatavissa (viitattu 17.3.2020): https://doi.org/10.1016/B978-008044271-6/50006-5

[57] M. A. Kenawy et al., Theoretical determination of critical frequency fc of some acoustic material panels, 12th International Congress on Sound and Vibration 2005, volume 2. s.1530-1537.Saatavissa (25.3.2020): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/153crqv/scopus2-s2.0-84881593640

[58] F. Mizi, F. Feng, Advanced High Strength Natural Fiber Composites in Construction, Elsevier, s. 352-354, 2017. Saatavissa (viitattu 26.2.2020): https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAHSNFCC5/advanced-high-strength/advanced-high-strength

[59] J. Cheeke, N. David, Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves, CRC Press LLC, ProQuest Ebook Central, s. 111–122, 2012. Saatavissa (viitattu 26.3.2020): https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/i4qs1o/alma9910678837705973

[60] Zhang, Xuefeng & Li, Wen, Vibration and sound radiation from a rectangular panel with any boundary condition, The Journal of the Acoustical Society of America, volume 24(4), 2008. Saatavissa (viitattu 26.3.2020): DOI: 10.1121/1.4782929

[61] G. Grażyna, Study of Seasonal Acoustic Properties of Sea Water in Selected Waters of the Southern Baltic, Polish Maritime Research, vol. 1, s 25–30, 2016. Saatavissa (viitattu 28.3.2020): https://doaj.org/article/a6738627eeac4df9b810f68121ad7b06

[62] M. I. Crocker. Handbook of Acoustics. John Wiley & Sons, 1998. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011NDYZ2/handbook-acoustics/interior-c-general-characteristics

[63] A. Mouritz, E. Gellert, P. Burchill, K. Challis, Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, Composite Structures. volume 53(1), s. 21–42, 2001. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://doi.org/10.1016/S0263-8223(00)00175-6

[64] United States 9411040 B2, Systems and Methods for Acoustic Window, Goodrich Corporation, Charlotte, NC (US), D. G. Finck, 14/312176, jättöpäivämäärä 23.06.2014, julkaistu 09.08.2016, s.8, 2016. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://patents.google.com/patent/US9411040B2/en

[65] G. Fernlund, et al. Causes and remedies for porosity in composite manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 139. 2016. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): DOI: 10.1088/1757-899X/139/1/012002

[66] J. C. Piquette. Shear material property determination from underwater acoustic panel tests. The Journal of the Acoustical Society of America 115, 2110, 2004. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://doi.org/10.1121/1.1687833

[67] M. J. Martin et al., The low frequency characterisation of underwater material properties in a pressure vessel via single, dual and multiple hydrophone techniques, Conference: 2nd International Conference on Underwater Acoustic Measurements, Technologies and Results, 2007. Saatavissa (viitattu 2.4.2020):

https://www.researchgate.net/publication/313153453_The_low_frequency_characterisation_of_underwater_material_properties_in_a_pressure_vessel_via_single_dual_and_multiple_hydrophone_techniques

[68] Precision acoustics-internetsivut, Anechoic Test Tank Linings. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): https://www.acoustics.co.uk/product/aptflex-f28/

[69] M. Hussain, M. N. Naeem, Effect of Various Edge Conditions on Free-Vibration Characteristics of Isotropic Square and Rectangular Plates, Advanced Engineering Testing, Aidy Ali, IntechOpen, 2018. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): DOI: 10.5772/intechopen.80672

[70] R. Wang et al., Fatigue damage model based on the natural frequency changes for spot-welded joints, International Journal of Fatigue, 2008. Saatavissa (viitattu 3.4.2020): DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.08.008

[71] M. Ahmadzadehtalatapeh, M. Mousavi, A Review on the Drag reduction Methods of the Ship Hulls for Improving the Hydrodynamic Performance, International Journal of Maritime Technology, vol. 4, s. 51–64, 2015: Saatavissa (viitattu 3.4.2020): http://ijmt.ir/article-1-428-en.html

[72] Hyperphysics-internetsivut, Standard Electrode Potentials in Aqueous Solution at 25°C. Saatavissa (viitattu 3.4.2020): http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/electpot.html

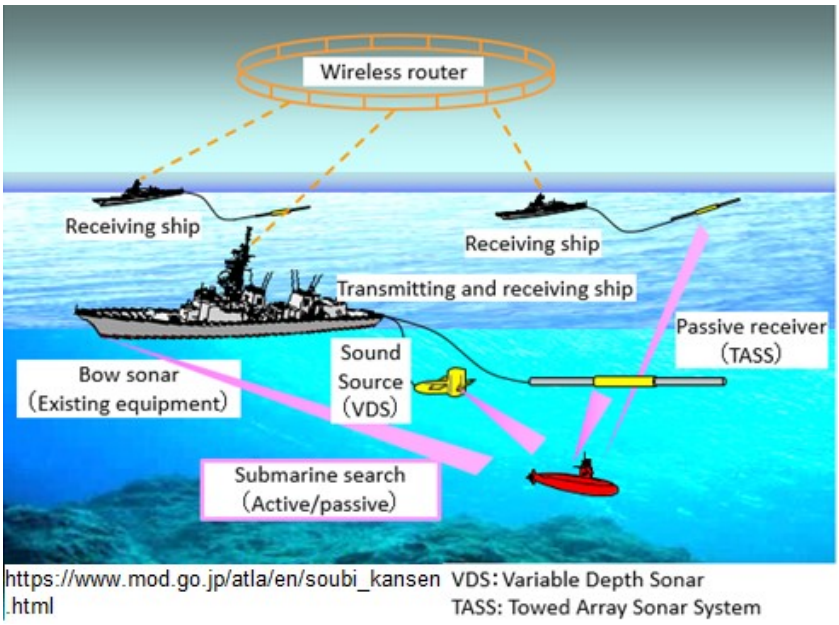
[73] China-Composites-internetsivut, Advantages & Disadvantages of Carbon Fiber. Saatavissa (viitattu 3.4.2020): https://www.china-composites.net/news/advantages-disadvantages-of-carbon-fiber-1585756.html.

[74] A. Huseyin et al., High Performance Fibers: A Review on Current State of Art and Future Challenges, Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University, vol. 27(2), s.130 -155, 2019: Saatavissa (viitattu 3.4.2020): https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/772170

[75] Y. Gautam et al, Application of UHMWPE Fiber Based Composite Material, International Journal of Research in Advent Technology, Vol.6, No.7, 2018. Saatavissa (viitattu 3.4.2020): https://www.researchgate.net/publication/327221940_Application_of_UHMWPE_Fiber_Based_Composite_Material

[76] United States Patent 4784898, High Sonar Transmission Composition, The B. F. Goodrich Company, Akron, Ohio, R. S. Raghava, jättöpäivämäärä 13.10.1987, julkaistu 15.11.1988. Saatavissa (viitattu 3.4.2020): https://patents.google.com/patent/EP0311783A2/un

LIITE 1: VDS JA MATERIAALIEN OMINAISUUDET



Kuva 1. *VDS toimintaympäristössään.*

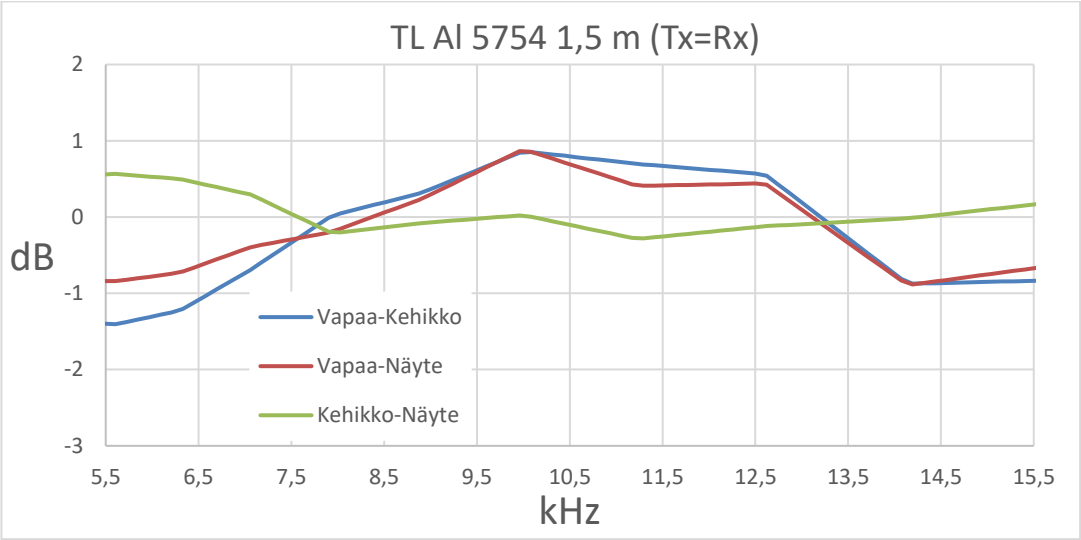
Taulukko 1. *Näytemateriaalien ominaisuuksia. [43]*

Materiaali	AL 5754	GFRP	CFRP	PC	PE	PUR	FPM
ρ (g/cm^3	2,673	1,851	1,425	1,193	0,963	1,24	1,832
E (GPA)	70,3	15	90–140	2,3	1–1,4	7,6 Mpa (100%)	6,5 Mpa (100%)
ν	0,33	-	-	0,41	0,46	0,5	0,5
f_c (kHz)	77,4	79,6	33,5	276	569,6	-	-
c_l (m/s)	6339	3030	3070	2239	2287	1750	1700
c_t (m/s)	3144	-	-	826	566	-	-

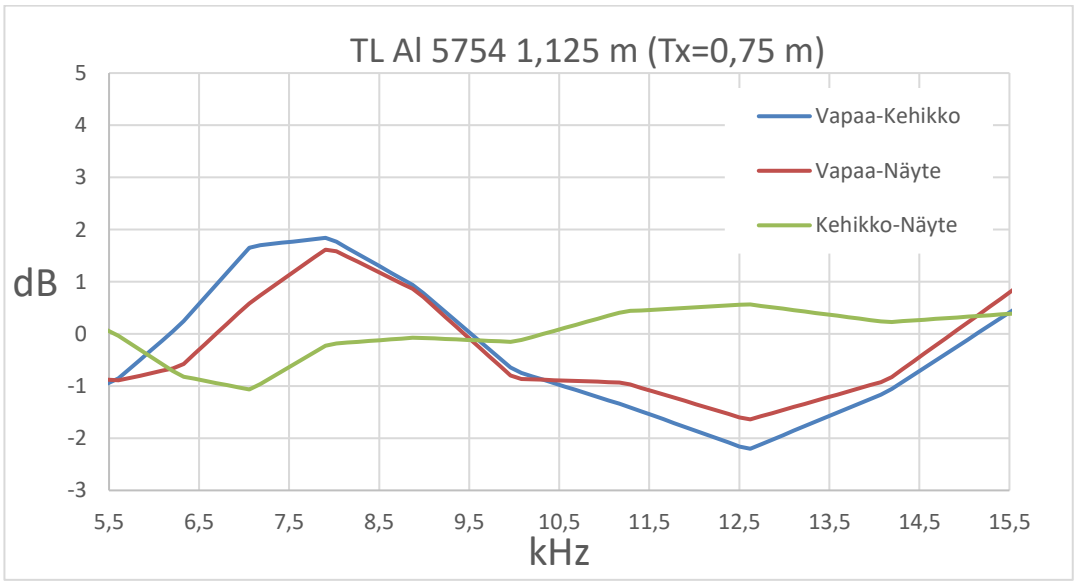
Taulukko 2. *Kuitumateriaalien ominaisuuksia. [43,73,74,75]*

Materiaali	Hiilikuitu	Aramid	E-lasi	UHMWPE	PIPD	PBO
E (Gpa)	180-600	65-130	76	91-120	330	280
ρ (g/cm^3	1,75-2,15	1,45	2,58	0,97	1,7	1,58
Vetolujuus (Gpa)	2,2-3,8	2,8-3,4	1,8-3,4	2,7-3,7	4	5,8
murtovenymä (%)	1-1,5	1,2-3,8	4,7	2,9-3,8	1,4	3,1
Puristuslujuus (Gpa)		0,35-0,45	4,2		1	0,2
UV-kesto	+	-	+	+	+	-
Kemikaalit	+	+	+	+	+	+
Vettyminen (%)	-	1-7	-	-	4,5	0,6-2,0

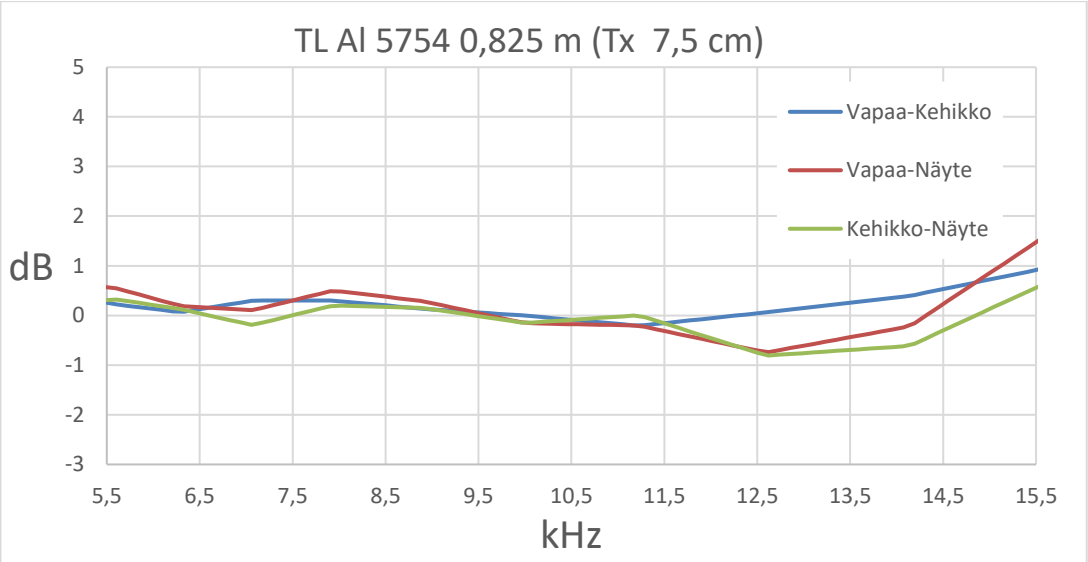
LIITE 2: MITTAUSTULOKSET 1, MITTAUSYMPÄRISTÖ-1, TAAJUUSALUE 5,5–15,5 KHZ



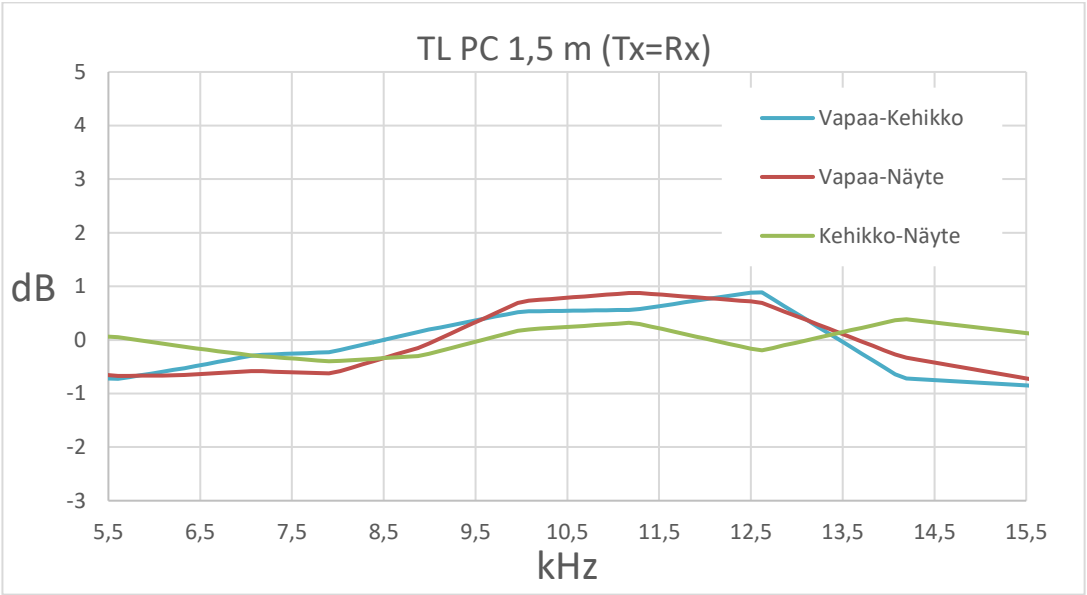
Kuva 1. *Alumiinilevyn etenemisvaimennus. Lähetin (Tx) ja hydrofoni (Rx) yhtä kaukana näytteestä ja mittavälineiden välinen etäisyys 1,5 m.*



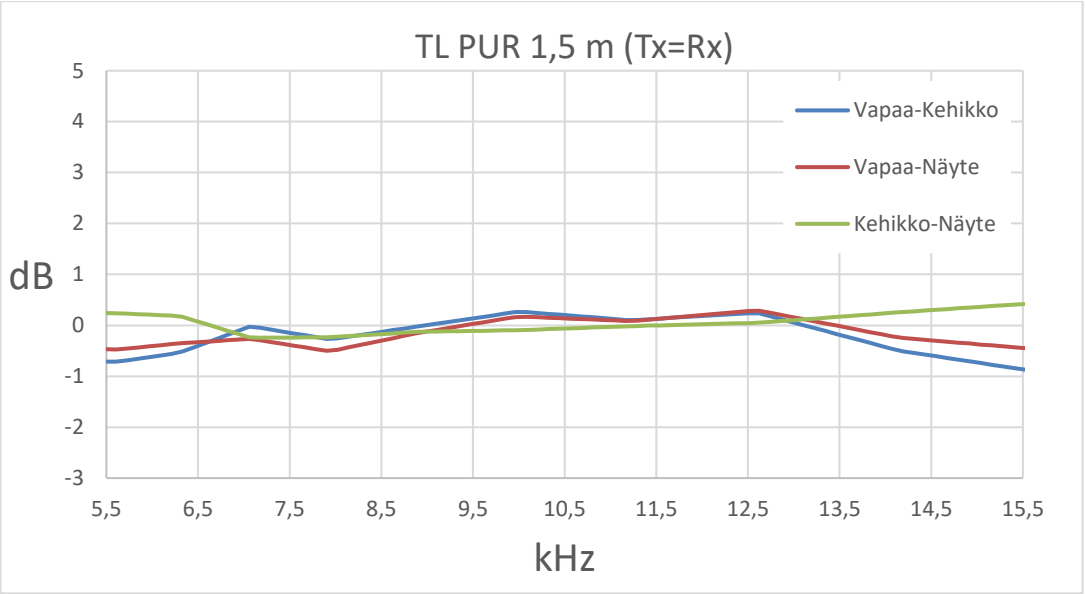
Kuva 2. *Alumiinilevyn etenemisvaimennus. Lähetin (Tx) 0,75 m näytteestä ja mittavälineiden välinen etäisyys 1,125 m.*



Kuva 3. *Alumiininäytteen etenemisvaimennus. Lähetin (Tx) 7,5 cm etäisyydellä näytteestä ja mittavälineiden välinen etäisyys 0,825 m*

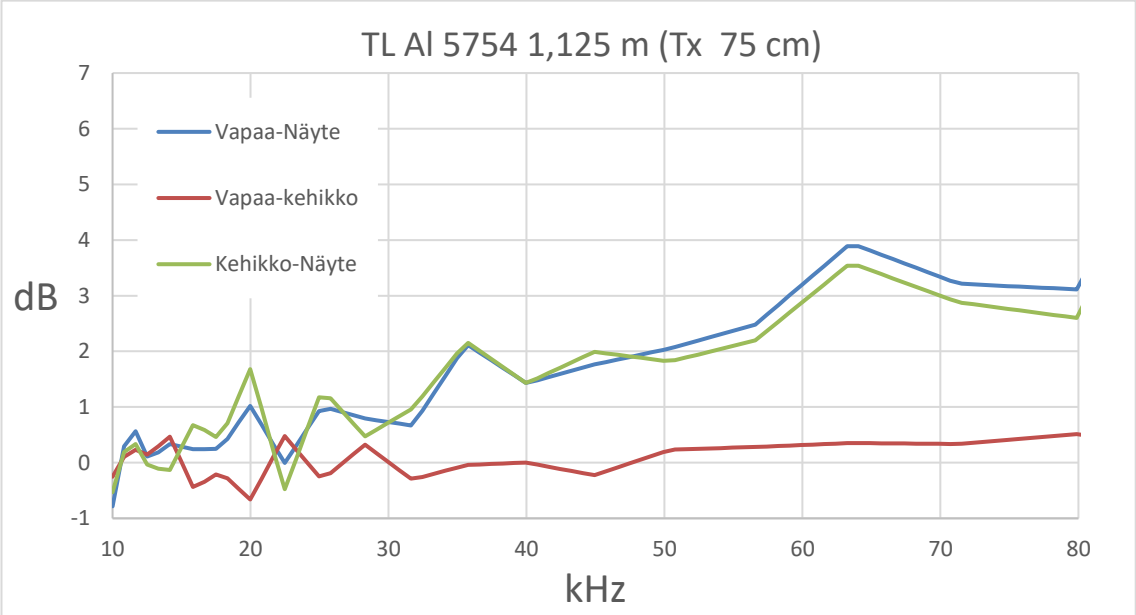


Kuva 4. *Polykarbonaattilevyn etenemisvaimennus. Hydrofoni (Rx) ja lähetin (Tx) yhtä kaukana näytteestä ja mittalaitteiden välinen etäisyys 1,5 m.*

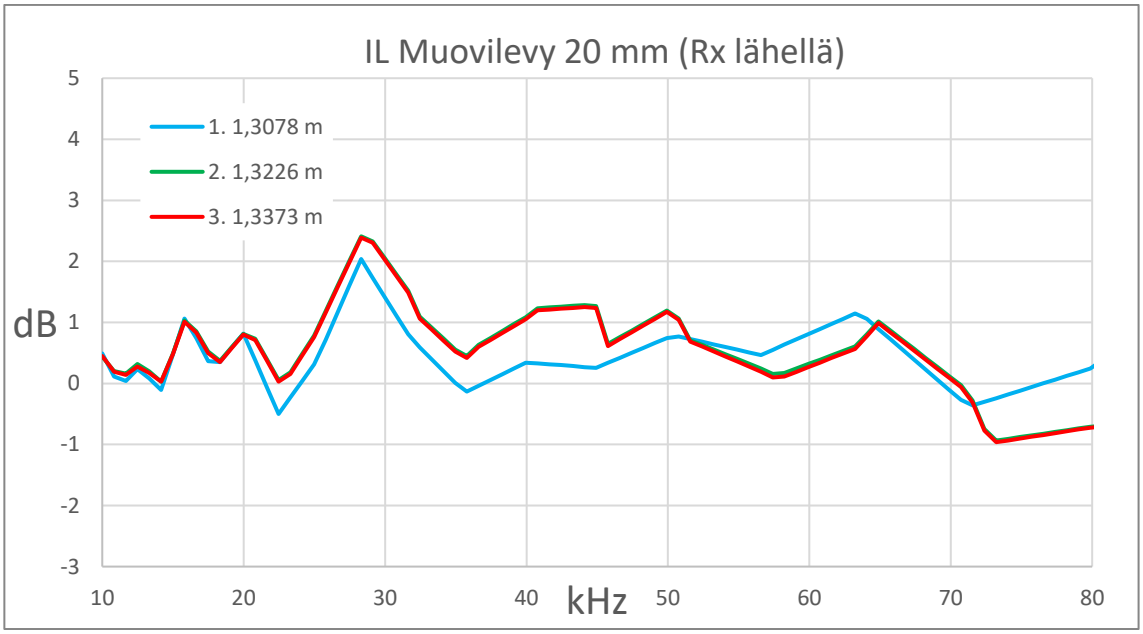


Kuva 5. *Polyuretaaninäytteen etenemisvaimennus. Hydrofoni (Rx) ja lähetin (Tx) yhtä kaukana näytteestä ja mittavälineiden välinen etäisyys 1,5 m.*

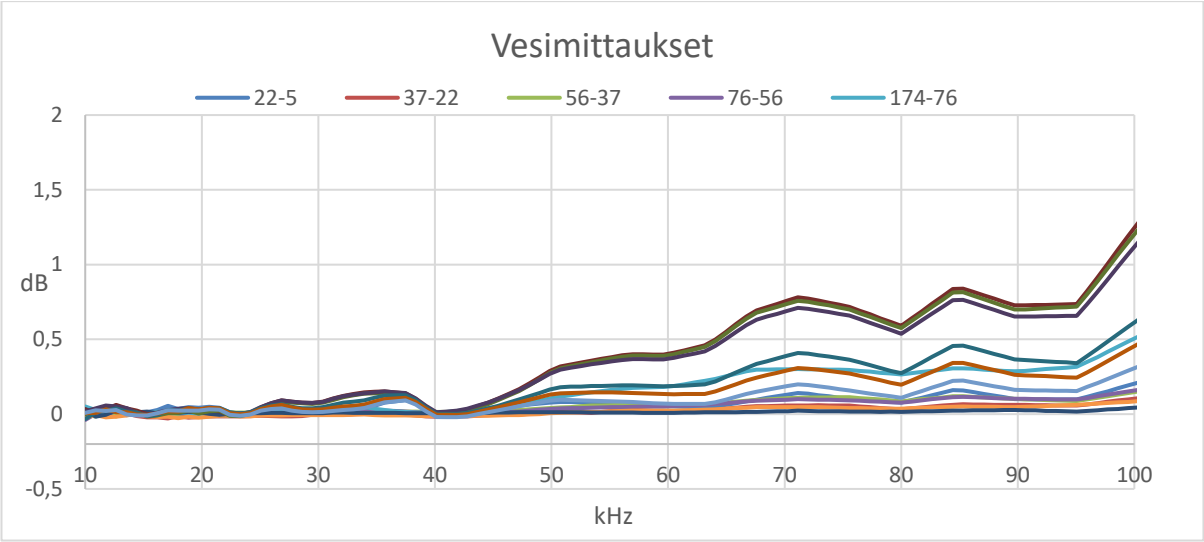
LIITE 3: MITTAUSTULOKSET 2, MITTAUSYMPÄRISTÖ-1, TAAJUUSALUE 10–80 KHZ



Kuva 1. *Alumiinilevyn etenemisvaimennus. Lähetin (Tx) 0,75 m näytteestä ja mittavälineiden välinen etäisyys 1,125 m.*

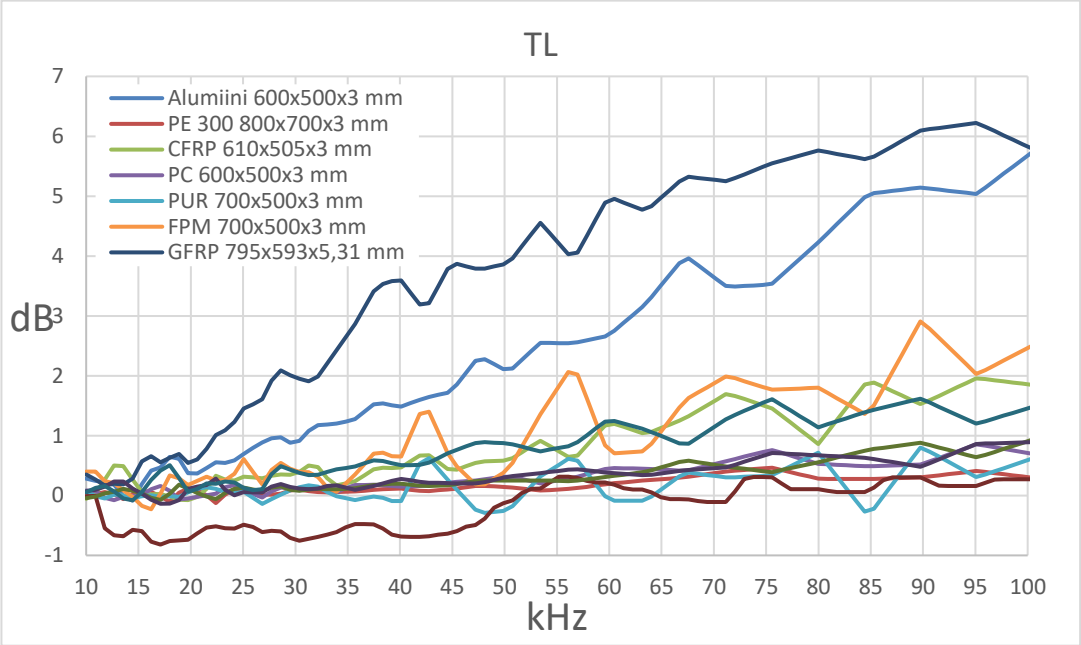


Kuva 2. *Muovilevyn etenemisvaimennus. Hydrofoni (Rx) näytteen lähellä ja mittavälineiden välinen etäisyys n. 1,3 m.*

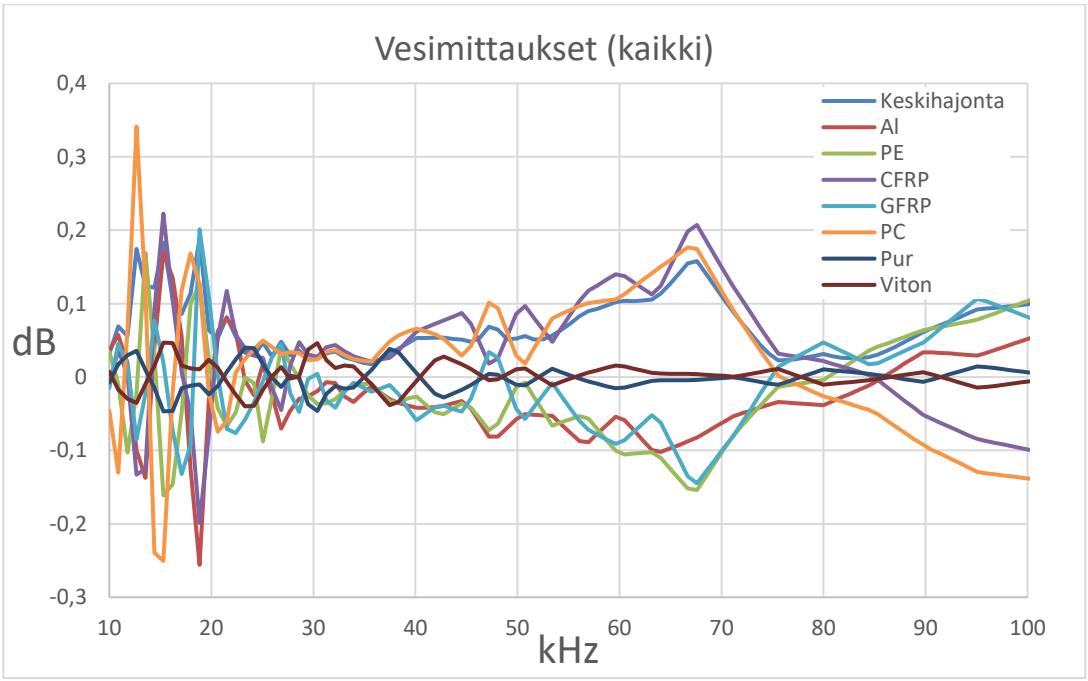


Kuva 3. *Eri ajanhetkillä suoritettujen vesimittausten äänenpainetasojen erotukset.*

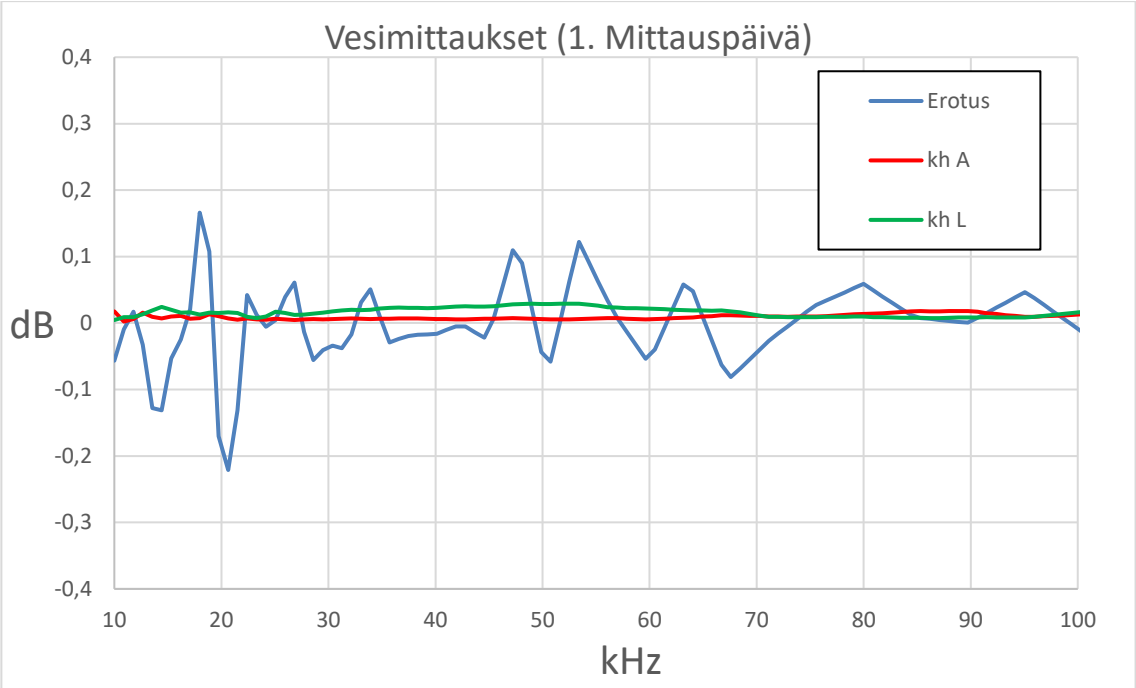
LIITE 4: MITTAUSTULOKSET 3, MITTAUSYMPÄRISTÖ-2, TAAJUUSALUE 10–100 KHZ



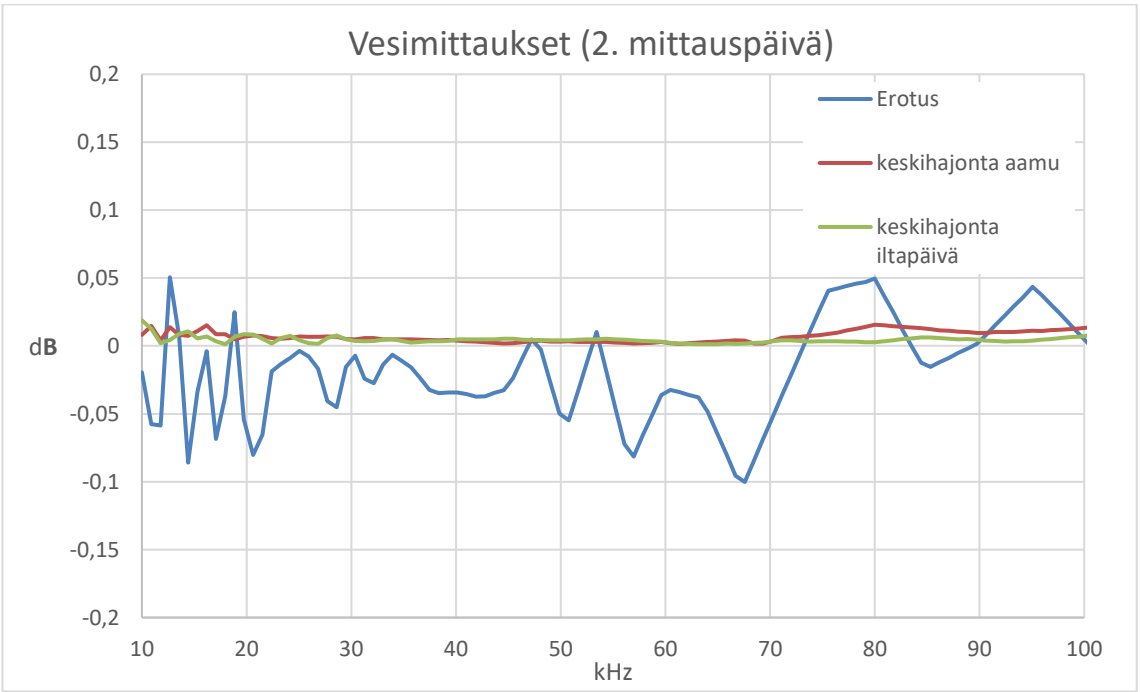
Kuva 1. *Kaikkien näytteiden etenemisvaimennukset.*



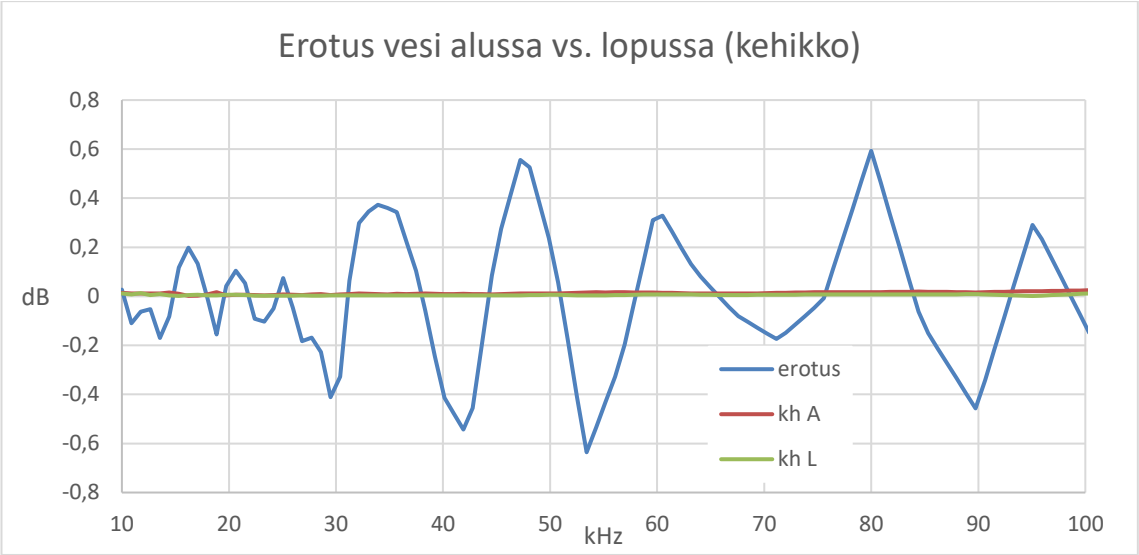
Kuva 2. *Näytteiden vesimittausten äänenpainetasojen erotus kaikkien näytteiden vesimittausten keskiarvosta.*



Kuva 3. *1. Mittauspäivän alkumittauksen keskihajonta (kh A), loppumittauksen keskihajonta (kh L) ja alku- ja loppumittauksen äänenpainetasojen erotus.*



Kuva 4. *2. Mittauspäivän aamumittauksen keskihajonta, loppumittauksen keskihajonta ja alku- ja loppumittauksen äänenpainetasojen erotus*



Kuva 5. *Kehikollisten mittauksien alkumittauksen keskihajonta (kh A), loppumittauksen keskihajonta (kh L) ja alku- ja loppumittauksen äänenpainetasojen erotus*