



Alexi Vuohelainen

Geofysikaaliset mittaukset osana merenmittausta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

13.3.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Aleksi Vuohelainen
Otsikko: Geofysikaaliset mittaukset osana merenmittausta
Sivumäärä: 27 sivua
Aika: 13.3.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Maanmittaustekniikka
Ohjaajat: Lehtori Ilkka Partonen

Insinööriyössä oli tarkoituksena esitellä tyypilliset geofysikaalisissa mittauksissa käytettävät merenmittausmenetelmät sekä käydä läpi niiden heikkouksia ja vahvuuksia. Työn tavoitteena oli luoda aineisto, josta on helppo ymmärtää geofysikaalisten mittausten perusteet siten, että työtä voidaan käyttää perehdytysaineistona.

Työ toteutettiin esittelemällä geofysikaalisissa mittauksissa käytettävistä mittaustyypeistä monikeilainluotaus, viistokaikuluotaus sekä matalataajuusluotaus. Lisäksi käytiin läpi näiden mittausten menetelmien heikkouksia ja vahvuuksia sekä esiteltiin keinoja, miten mittaustyyppien heikkouksia voidaan paikata käyttäen muita mittaustyyppien niiden tukena. Työssä esiteltiin myös geofysikaalisten mittaustulosten käyttökohteita sekä aineiston käsittelyä ja tulkintaa.

Insinööriyössä todettiin, että jokaisella mittaustyyppillä on omat heikkoutensa, jotka heikentävät mittaustietojen laatua, mikäli käytetään vain yhtä mittaustapausta. Käytettäessä samanaikaisesti useampaa mittaustapaa saadaan yksittäisten mittaustapojen heikkouksien seurauksia vähennettyä. Hyödyntämällä useita mittaustyyppien saadaan parempaa mittaustietoa.

Avainsanat: merenmittaus, geofysikaaliset mittaukset, matalataajuusluotain, viistokaikuluotain, monikeilain

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Aleksi Vuohelainen
Title: Marine geophysical surveying
Number of Pages: 27 pages
Date: 13 March 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Land Surveying
Supervisors: Ilkka Partonen, Senior Lecturer

The final year project aimed at introducing typical surveying methods used in marine geophysical surveying, discussing the benefits and disadvantages of each. The goal was to create a material where the basic principles of geophysical surveying are clearly presented.

The project collected information about various surveying methods used in marine geophysical surveying and introduced their strengths and weaknesses. Furthermore, the thesis discussed the intended use of the surveying material, together with the processing and interpretation of the surveying data.

The project established that each surveying method has its own weaknesses which affect the quality of the surveying data if the method is the sole one used. When paired with other surveying methods, the weaknesses can be effectively reduced.

The project concluded that the basic principle of marine geophysical surveys is that the more surveying methods are used simultaneously, the better the final data quality of individual surveying method is.

Keywords: geophysical surveying, marine surveying, sub bottom profiler, sidescan sonar, multibeam echosounder

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Merenmittauksen historiaa	2
3	Geofysikaaliset mittaukset	5
3.1	Monikeilain	7
3.2	Viistokaikuluotain	9
3.3	Matalataajuusluotain	13
3.3.1	Chirp-mittalaitteet	15
3.3.2	Boomer	17
4	Matalataajuusluotaindatan tulkinta	20
5	Yhteenveto	23
	Lähteet	24

Lyhenteet

Backscatter:	Merenmittauksessa käytettävä mittaustapa, jossa palaavan kaiun sijaan kuunnellaan kaiun voimakkuutta.
Batymetria:	Meren tai pintavesimuodostuman syvyyden mittaamista. Vastaa topografiaa, joka on maan pinnanmuotojen mittaamista.
Boomer:	Matalataajuusluotain, joka käyttää matalampia äänen taajuuksia.
Chirp:	Matalataajuusluotain, joka käyttää korkeampia äänen taajuuksia.
HF:	<i>High frequency</i> . Korkeataajuus.
Hydrofoni:	Vedenalaisen äänen kuuntelulaite.
Hz:	Hertsi. Taajuuden yksikkö.
IMU:	<i>Inertial measurement unit</i> . Mittaa kaltevuuskulmia.
LF:	<i>Low frequency</i> . Matalataajuus.
MBES:	<i>Multi-beam echo sounder</i> . Monikeilain.
SBP:	<i>Sub-bottom profiler</i> . Matalataajuusluotain.
SSS:	<i>Side scan sonar</i> . Viistokaikuluotain.
Streamer:	Vedenalaisen äänen kuuntelulaite, joka koostuu useista hydrofoneista.

Termokliini:	Vedessä oleva lämpötilan harppauskerros eli kerros, jossa lämpötila muuttuu äkisti.
Transponderi:	Laite, joka lähettää ja vastaanottaa signaaleja.
USBL:	<i>Ultra-short baseline</i> . Vedenalainen paikannusmetodi.
Väliaine:	Aine, jossa jokin ilmiö, kuten ääniaallon eteneminen tapahtuu.

1 Johdanto

1800-luvulla mantereet olivat jo hyvin kartoitettuja toisin kuin vesistöt. Vaikka tarvetta vesistöjen kartoitukselle oli, ei siihen ollut vielä keksitty tehokkaita keinoja. Tämä muuttui 1840-luvulla, kun sekä tieteelliset että kaupalliset yhteisöt rupesivat kehittämään merenmittausta. Mittauslaitteet alkoivat kehittyä köyden päässä olevasta punnuksesta alkeellisiin kaikuluotaimiin, jotka lähettivät yksittäisen kaiun pohjaan antaen sijainnin syvyystiedon.

Nykyaikaisella mittauskalustolla voidaan ääniaaltoja hyödyntäen tuottaa aukontonta dataa pohjan batymetriasta sekä sen tiheydestä ja voidaan kerätä tietoa kymmeniä metriä meren pohjan alapuolisista maalajikerroksista.

Opinnäytetyön tavoitteena on esitellä geofysikaalisissa mittauksissa käytettäviä mittaustyyppejä, mittalaitteita ja niiden tuottamaa aineistoa siten, että työtä on mahdollista käyttää perehdytysaineistona. Työssä vertaillaan myös eri mittaustyyppien vahvuuksia sekä heikkouksia ja esitellään keinoja, miten mittaustyyppien heikkouksia voidaan paikata käyttäen muita mittaustyyppejä niiden tukena.

2 Merenmittauksen historiaa

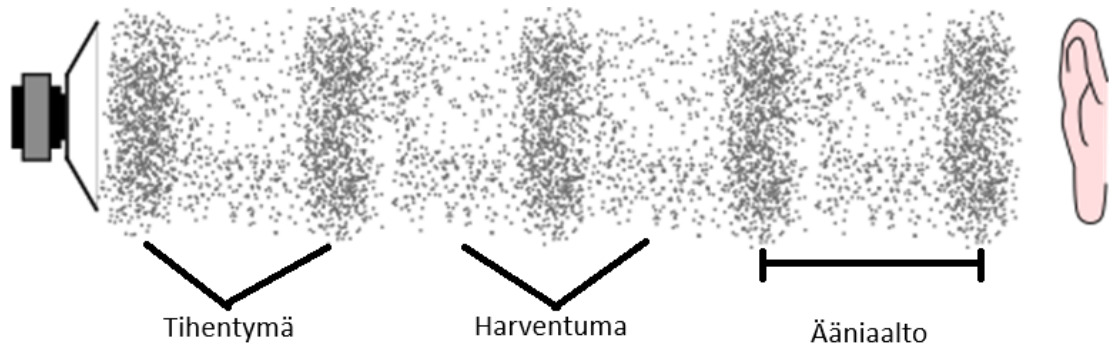
Geofysikaaliset mittaukset perustuvat ääneen. Ääni on mekaanista värähtelyä, joka etenee väliaineessa, kuten vedessä tai ilmassa. Ihminen aistii sellaisen värähtelyn, joka on ihmiskorvan kuuloalueella eli 20 – 20 000 Hz. Äänen nopeus vaihtelee sen mukaan, mikä toimii äänen väliaineena. Esimerkiksi ilmassa äänen nopeus on noin 340 metriä sekunnissa, kun vedessä se on noin 1500 metriä sekunnissa. [1; 2; 3.]

Äänen olemassaolo vedessä havaittiin Leonardo da Vincin toimesta vuonna 1490. Hän havaitsi, että kun laittaa pitkän putken toisen pään veteen ja toisen pään korvan juureen, voi kuulla laivojen äänen pitkienkin matkojen päästä. Tätä alkeellista keinoa käytettiin vielä ensimmäisessä maailmansodassa, jolloin vastaanlainen putki asetettiin myös toiselle korvalle. Kun putkien vedenalaiset osat olivat erillään toisistaan, pystyttiin alus paikantamaan sen tuottaman äänen perusteella. [4, s. 2.]

Yksi ensimmäisistä vedenalaisen äänen tutkimuksista suoritettiin vuonna 1827, kun sveitsiläinen fyysikko Daniel Colladon ja ranskalainen matemaatikko Charles Sturm mittasivat vedenalaisen äänen nopeutta Genevenjärvellä. He kellottivat valonlähteen ja vedenalaisen kellon lyönnin eroa ja saivat tulokseksi 1435 metriä sekunnissa. Nykyinen arvio äänen nopeudesta vedessä on 1482 metriä sekunnissa. [4, s. 2; 5.]

Sameassa ja suolaisessa merivedessä valo vaimenee enemmän kuin ääniaallot. Auringon valo yltää hyvissä olosuhteissa korkeintaan noin 200 metrin syvyyteen. Radioaallot taas vaativat valtavan antennin ja lähetystehon. Tämän vuoksi ääni on ylivoimainen signaali, kun signaalia lähetetään ja vastaanotetaan vedessä. [4 s. 1; 6; 7.]

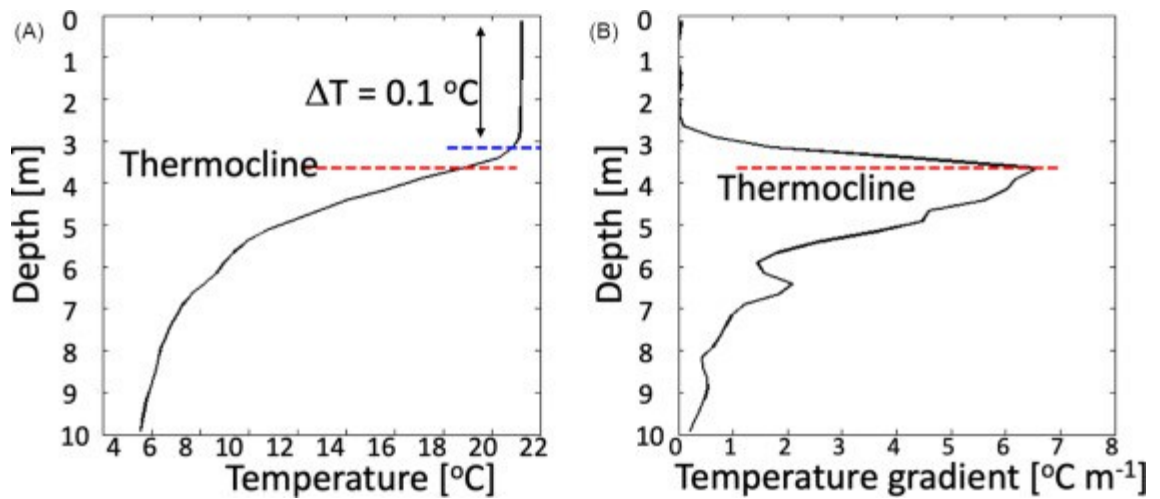
Ääni etenee vedessä luoden aaltomaisia paineenvaihteluita, jotka suuntautuvat pois päin äänenlähteestä. Nämä paineenvaihtelut voidaan havaita paineenvaihtelua havaitsevalla hydrofonilla. Kun ääntä lähetetään mittalaitteesta, vain murto-osa siitä kimpoaa hydrofonia kohti. Ääniaallot leviävät ympäri vesistöä, ne vaimenevat, siroavat eli hajoavat eri suuntiin ja absorboituvat väliaineeseen sekä äänen tielle tullessiin esteisiin muuttuen lämpöenergiaksi. Kuvassa 1 havainnollistettuna äänen aiheuttamaa paineenvaihtelua. [4, s. 12; 94.]



Kuva 1. Havainnollistus äänen aaltoliikkeestä [8.]

Tyypillinen meren profiili koostuu useammista kerroksista, jotka eroavat toisistaan lämmön, suolaisuuden ja paineen suhteen, joista kaikki vaikuttavat äänen nopeuteen. Veden kerroksista ylimpänä sijaitsee pintakerros, joka on altis päivittäisille ja paikallisille ilmaston aiheuttamille lämpötilanvaihteluille. Tuulisina päivinä pintakerroksen eri lämpöiset vesimassat voivat sekoittua aiheuttaen häiriötä äänen kulkuun. Pitkissä tyynissä ja aurinkoisissa sääolosuhteissa tämän sekoittuneen vesimassan lämpötilaerot tasaantuvat ja lämpötila laskee tasaisesti syvemmälle mentäessä. [4, s. 110.]

Pintakerroksen alapuolella on termokliini eli lämpötilan harppauskerros, jossa lämpötila muuttuu äkisti. Kesällä ja alkusyksystä, kun pintavesi on lämmintä, termokliini on voimakkaimmillaan. Pintavesien viilennyttyä termokliinikin heikentyy. Mitä voimakkaampi termokliini on, sitä vaikeampi äänen on sitä läpäistä. Voimakas termokliini aiheuttaa ääniaaltojen heijastumista. Kuvassa 2 on esitetty lämpötilan harppauskerros eli termokliini lämpötilan muutoksena suhteessa veden syvyyteen. [4, s. 110.]



Kuva 2. Veden lämpötilan muutos suhteessa mittaussyvyyteen [9].

Äänen nopeus vedessä on 1483 m/s, kun ilmassa se on 340 m/s. Äänen nopeuteen vedessä vaikuttavat suureet ovat veden lämpötila, suolapitoisuus sekä hydrostaattinen paine. Näiden muuttujien vuoksi maantieteellinen sijainti, vuodenaika ja jopa kellonaika vaikuttavat äänen nopeuteen vedessä. [4, s. 104.]

Äänen nopeuteen vedessä vaikuttavat myös ilmakuplat, joita esiintyy varsinkin pintavesissä aaltojen ja turbulenssin aiheuttamana sekä biologisissa organismeissa kuten kalojen uimarakoissa. Taulukossa 1 on esitetty vedenalaiseen ääneen vaikuttavat suureet sekä niiden arvot. [4, s. 223.]

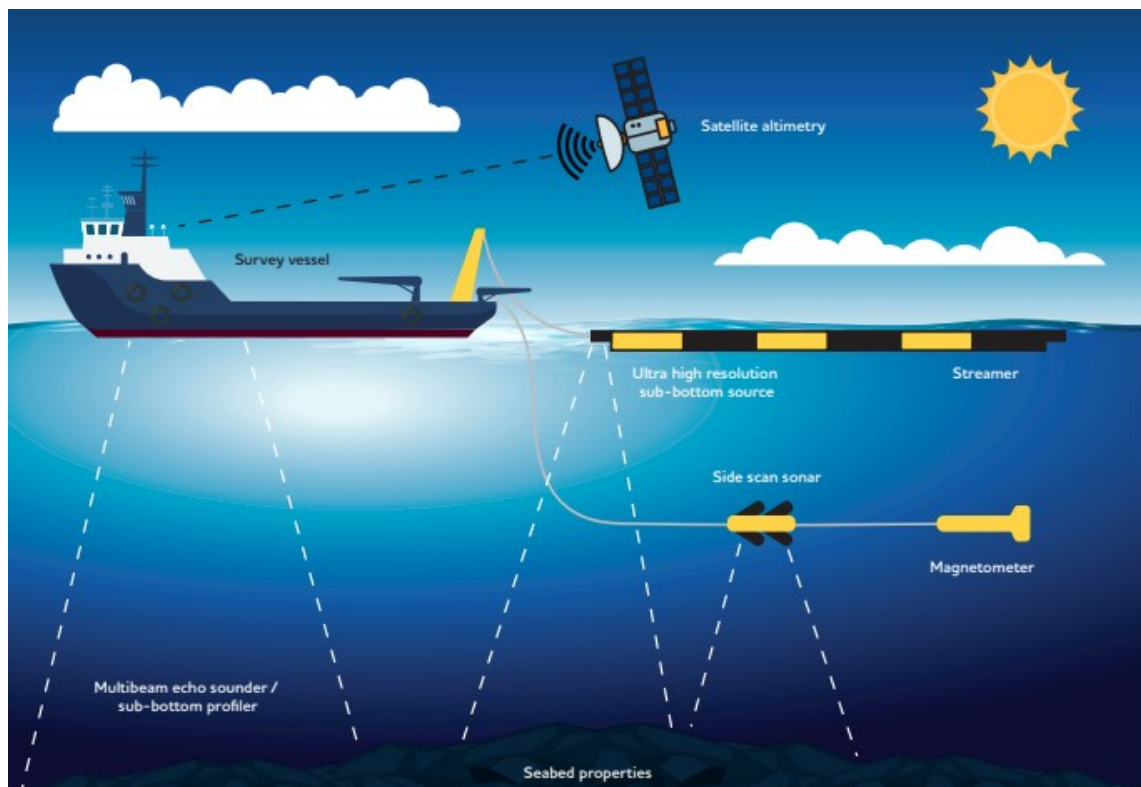
Taulukko 1. Likimääräiset arvot äänen nopeuden muutokselle vedessä [4, s. 108].

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

3 Geofysikaaliset mittaukset

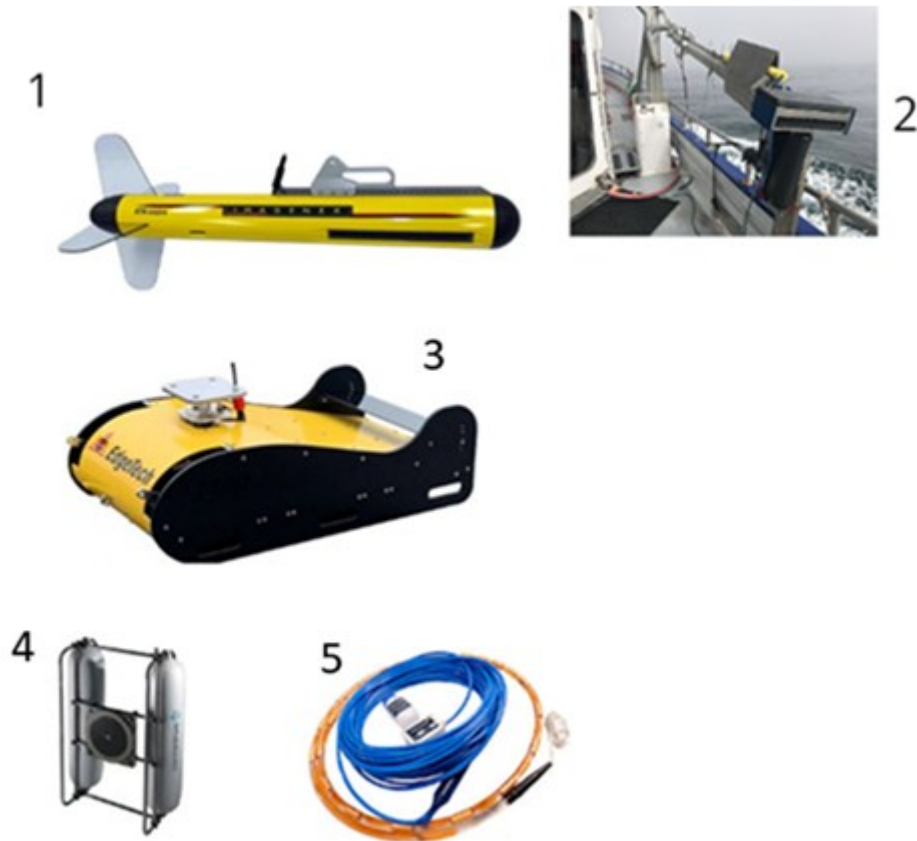
Geofysikaaliset mittaukset vesistöissä ovat tutkimuksia, jossa hyödynnetään ääntä, jotta saadaan tietoa jonkin vesialueen pohjan koostumuksesta, kuten maalajeista. Geofysikaalisia mittauksia hyödynnetään muun muassa geologisissa ja arkeologisissa tutkimuksissa mutta myös infrastruktuurin, kuten tuulivoimapuistojen suunnittelussa. [10.]

Tyypillisesti geofysikaaliset tutkimukset sisältävät monikeilain- (MBES, Multi-beam echo sounder), matalataajuusluotain- (SBP, Sub-bottom profiler) ja viistokaikuluotaindataa (SSS, Sidescan sonar). Kerätystä mittausdatasta voidaan luoda karttoja, joita esimerkiksi tuulivoimapuistojen suunnittelijat voivat hyödyntää suunnitelmissaan ja tarkentaa alueita, joihin kohdennetaan tarkempia tutkimuksia kuten geoteknisiä kairausnäytetutkimuksia. Kuvassa 3 on havainnollistettu mittaustilanteesta. [10.]



Kuva 3. Geofysikaalisia mittauksia suorittava alus [10].

Geofysikaaliset mittaukset koostuvat usean eri mittalaitteen tuottamasta datasta, joita yhdistelemällä saadaan mahdollisimman luotettava tulos vesistön pohjan koostumuksesta. Kuvassa 4 on esitelty tyypillisiä geofysikaalisissa mittauksissa hyödynnettäviä mittalaitteita. [10.]



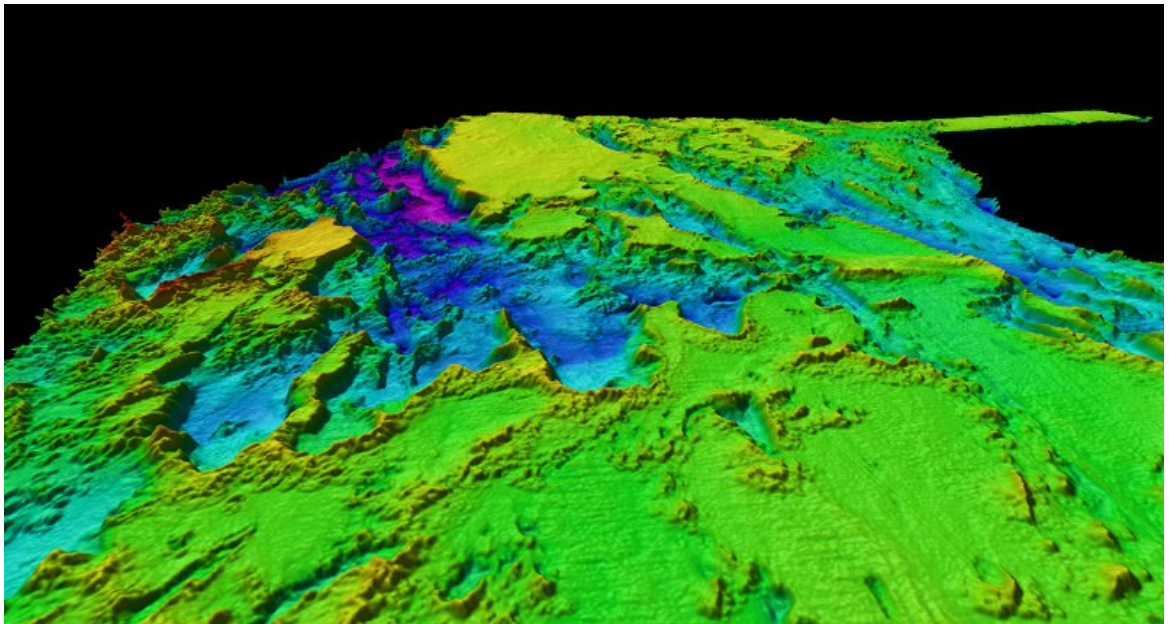
Kuva 4. Geofysikaalisissa mittauksissa käytettäviä laitteita. Alkaen ensimmäisestä, kuvassa esiintyvät mittalaitteet ovat viistokaikuluotain, monikeilain, matalataajuusluotaimet chirp ja boomer sekä boomerin kanssa käytettävä streamer-hydrofoni. [11; 12; 13; 14; 15.]

3.1 Monikeilain

Monikeilain eli MBES (Multibeam echo-sounder) koostuu lähettimestä ja vastaanottimesta. Lähetin muuttaa elektronisen signaalin akustiseksi pulssiksi ja vastaanotin muuttaa akustisen pulssin takaisin elektroniseksi signaaliksi. Mittausohjelmisto laskee, kuinka kauan lähtevän ja palaavan pulssin ero on, ja merkitsee heijastuspinnalle eli vesistön pohjalle pisteen. Näistä pisteistä syntyy tarkka kolmiulotteinen kuva pohjan batymetriasta eli pohjan muodoista. [16.]

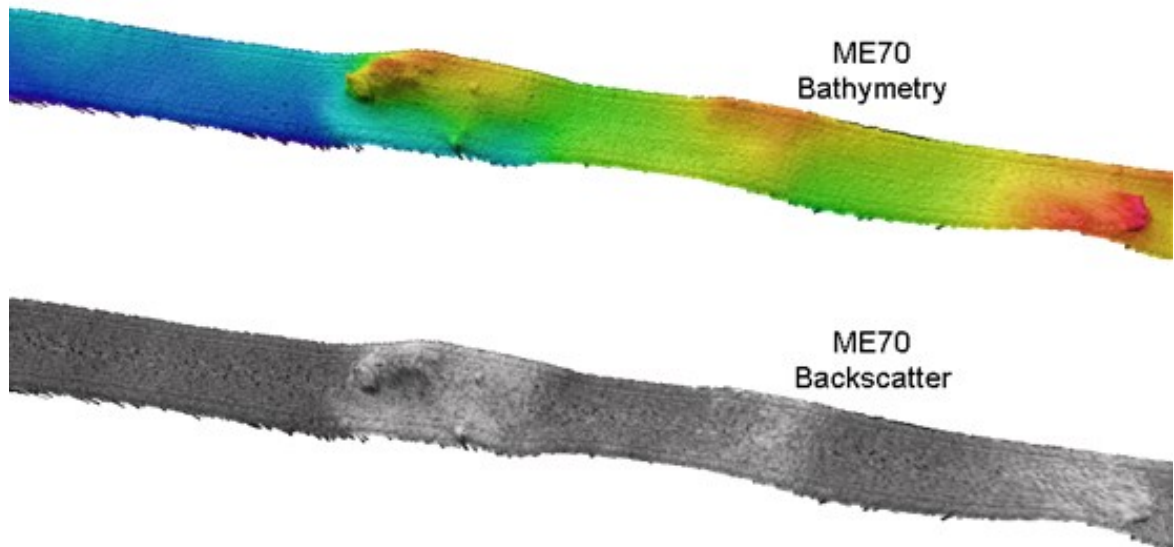
Jotta pystytään luomaan tarkkoja kuvia pohjan batymetriasta, tulee monikeilaimen sijainti olla tarkasti tiedossa. Tätä seurataan satelliittipaikannuksella sekä IMU (inertial measurement unit) -laitteella, joka mittaa satoja kertoja sekunnissa monikeilaimen kaltevuuskulmia sekä pysty- että vaakasuunnassa. [16.]

Koska veden nopeuteen vaikuttavat veden suolaisuus, syvyys sekä lämpötila, tulee mittaajien tarkastaa veden nopeusprofiili muutaman tunnin välein siihen tarkoitettulla mittalaitteella. Näitä korjauksia hyödyntämällä mittausohjelmisto korjaa pohjassa olevien objektien sijainnin. Kuvassa 5 monikeilaimella mitattua batymetriaa. [16.]



Kuva 5. Monikeilainmittauksella luotu kolmiulotteinen kuva vesistön batymetriasta [17].

MBES-laitteistolla voidaan myös tuottaa backscatter-dataa. Pohjan batymetrian sijaan backscatter-aineistosta nähdään pohjan materiaalin tiheys, sillä backscatterissa tarkastellaan kaiun keston sijaan kaiun voimakkuutta. Kun tiedetään, että tiheämpi aine palauttaa voimakkaamman kaiun, voidaan aineistosta päätellä muun muassa pohjan maalajeja. Kuvassa 6 on rinnakkain batymetria- ja backscatter-dataa. [18.]



Kuva 6. Ylhäällä batymetria-aineistoa alhaalla backscatter-aineistoa samasta kohteesta. Backscatteraineistossa voimakkaampi paluukaiku eli tiheämpi aines piirtyy vaaleampana. [19.]

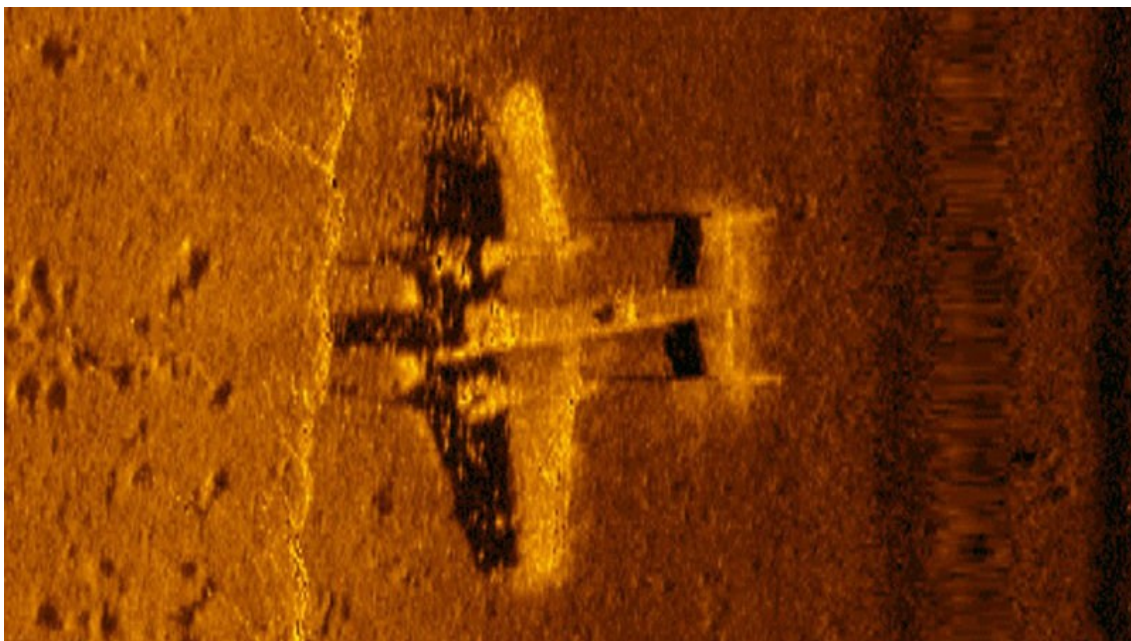
Monikeilainaineiston vahvuus on sen tarkkuus. Koska monikeilain on kiinteästi asennettuna, voidaan laitteen sijainti mitata suhteessa GNSS-paikantimeen. Tämän vuoksi sen paikantamiseen ei liity samanlaisia haasteita kuin esimerkiksi aluksen perässä vedettävään viistokaikuluotaimen. Näin ollen sitä voidaan käyttää referenssiaineistona, kun pyritään korjaamaan muun aineiston paikannusvirheitä. [20.]

3.2 Viistokaikuluotain

Viistokaikuluotain eli SSS (Side-scan sonar) on kaikuluotaintyyppi, joka lähettää ääniaaltoja viuhkamaisena muodostelmana kohti pohjaa ja kuuntelee sieltä palaavia kaikuja. MBES backscatter -mittauksen tavoin viistokaikuluotain mittaa palaavan kaiun voimakkuutta, ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi pohjan maalauskarttoitukseen. [21.]

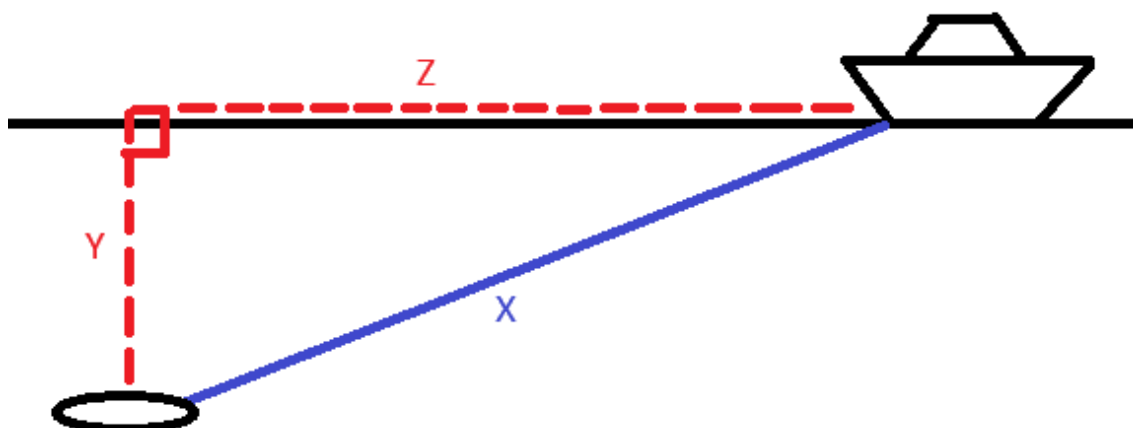
Viistokaikuluotaindatan ero MBES backscatteriin on siinä, että kun MBES antaa yhden backscatter-arvon per ääniheijaste, antaa viistokaikuluotain lähes jatkuvaa signaalia, tuottaen näin korkeampiresoluutioista dataa. [22.]

Vaikka viistokaikuluotaimella voidaan tuottaa parempiresoluutioista dataa kuin monikeilaimella, on sillä yksi suuri heikkous: viistokaikuluotaimen tulee olla riittävällä etäisyydellä pohjasta, jotta datan laatu olisi mahdollisimman hyvää. Tämän vuoksi luotain ei voi olla kiinteästi alukseen kiinnitetty, vaan se on kiinni aluksen perässä vedettävässä vedenalaisessa niin kutsutussa kalassa. Tämä luo haasteita paikannuksen suhteen, kun luotaimen sijaintia ei voida laskea tarkasti suhteessa aluksen satelliittipaikantimeen. Kuvassa 7 viistokaikuluotaimella kuvattu toisen maailmansodan aikainen pommikone. [23.]



Kuva 7. Viistokaikuluotainkuva toisen maailmansodan aikaisesta pommikoneesta, joka löytyi Papua-Uusi-Guineasta vuonna 2017 [21].

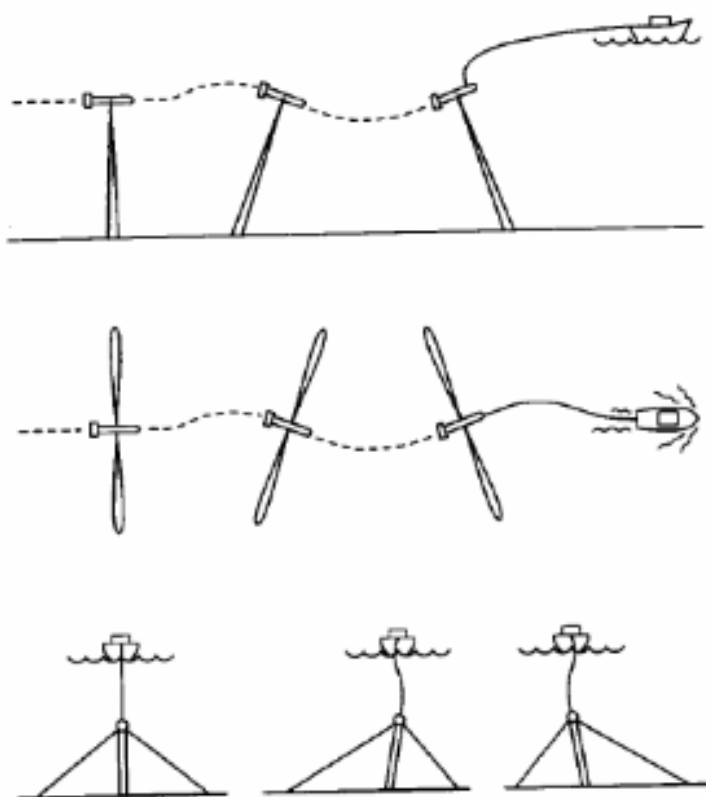
Viistokaikuluotaimen kalan sijainnin voi laskea käyttämällä hinauskaapelin pituutta. Tämä paikannustapa aiheuttaa kuitenkin häiriötä paikannukseen, sillä muun muassa virtaus ja kalan syvyys johtavat etäisyyseroihin kalan ja mittausaluksen välillä. Sivuttainen virtaus aiheuttaa myös viistokaikuluotainkalan siirtymistä pois ajolinjalta aiheuttaen sivuttaista paikannushäiriötä. Kuvassa 8 kuvataan mittausaluksen ja viistokaikuluotaimen sijaintien suhdetta. [24.]



Kuva 8. Mittausaluksen perässä vedettävä viistokaikuluotain. Vaikka tiedetään kaapelin mitta X , niin syvyystiedon puuttuessa emme saa horisontaalista etäisyyttä viistokaikuluotaimen ja mittausaluksen välille. Lisäksi veden virtaus aiheuttaa kaapelin X kaareutumista luoden lisää paikannusepävarmuutta. [24.]

Viistokaikuluotainkalan voi myös paikantaa käyttämällä USBL (Ultra-short baseline) -paikanninta. USBL on akustinen paikannusjärjestelmä, joka koostuu alukseen kiinnitettävistä lähetinvastaanottimista ja kalaan kiinnitettävästä transponderista. Alukseen kiinnitetty lähetinvastaanotin lähettää äänisignaalin, jonka kuullessaan transponderi vastaa eri taajuisella äänellä takaisin. Näin saadaan laitteiden etäisyys tietoon. Alukseen kiinnitetyt lähetinvastaanottimet sijaitsevat erillään toisistaan. Kun palaava äänisignaali osuu niihin eri aikaisesti, voidaan laskea äänen tulosuunta. Näitä kahta parametriä hyödyntämällä voidaan laskea tarkka viistokaikuluotaimen sijainti suhteessa mittausaluukseen. [25; 26.]

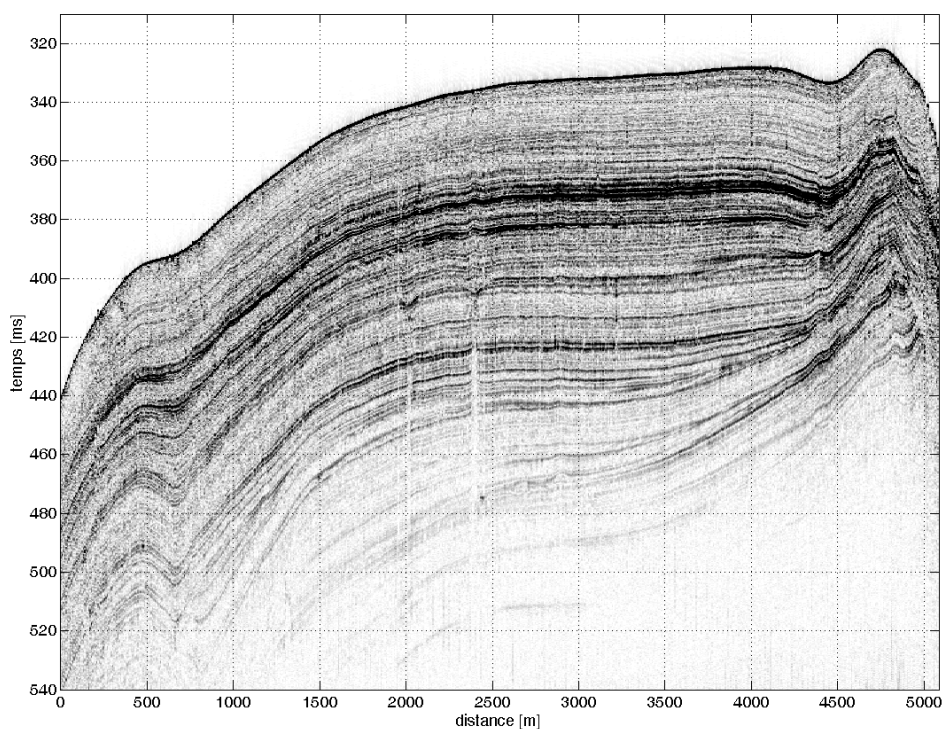
Vaikka USBL-paikannuksella päästään parempaan paikannustarkkuuteen kuin pelkän kaapelin pituuden hyödyntämisellä, siihen sisältyy silti monia ongelmia. Kun USBL-lähetinvastaanotin lähettää ääntä kohti transponderia, kulkee se pitkän aikaa veden pintakerroksissa, jossa on paljon äänen kulkuun vaikuttavia muuttujia kuten veden harppauskerros sekä aaltojen ja aluksen aiheuttamat ilmakuplat vedessä. Nämä voivat aiheuttaa huomattavaa häiriötä paikannustarkkuuteen, minkä vuoksi aineiston sijaintia voidaan joutua korjaamaan käyttäen monikeilainaineistoa referenssipintana. Kuvassa 9 havainnollistetaan miten viistokaikuluotaimen liikkeet vaikuttavat mittausdatan laatuun. [27.]



Kuva 9. Viistokaikuluotaimen liikkeet vaikuttavat mittausdatan laatuun [28].

3.3 Matalataajuusluotain

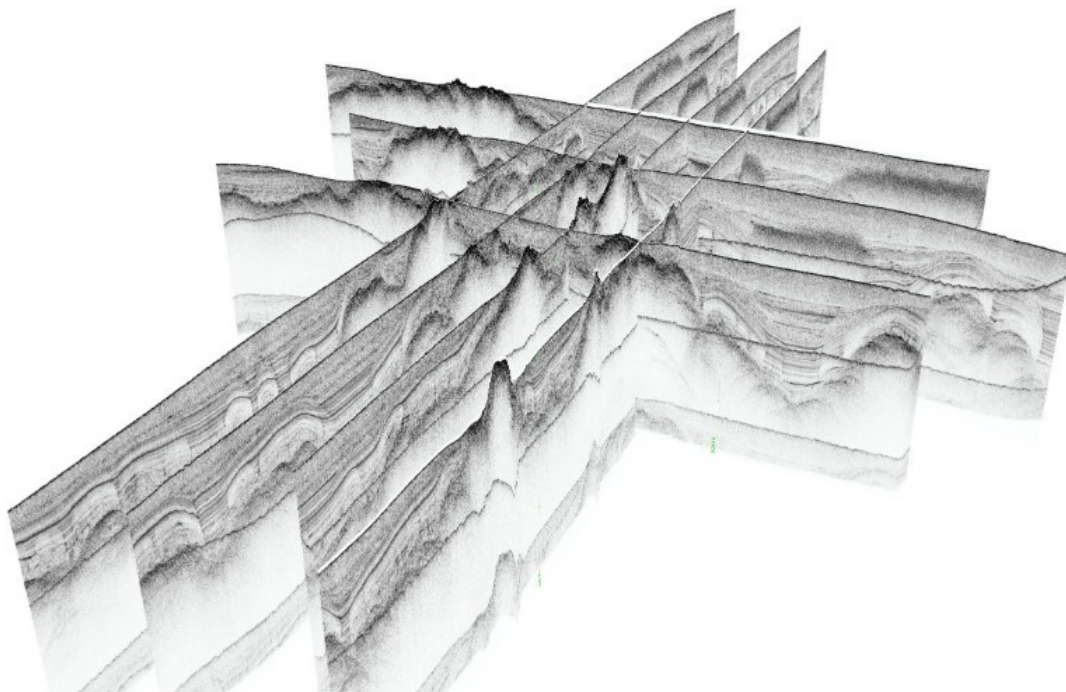
Matalataajuusluotain eli SBP (Sub-Bottom Profiler) on mittalaite, joka lähettää matalataajuisia ääniaaltoja kohtisuoraan merenpohjaan. Kun ääniaallot osuvat pohjaan, osa niistä läpäisee maakerroksen jatkaen syvemmälle maa-ainek- sessa, kunnes kimpoaa takaisin kohti vastaanotinta. Kun mitataan kulunut aika, jonka ääniaalto on kulkenut pohjaan ja sieltä takaisin, voi tietokone laskea sy- vyyden, jossa se on käynyt. Mittausohjelmisto luo mittauksen perusteella profii- lin, jossa ääniaallon heijastanut sijainti piiryy palanneen heijastuksen voimak- kuuden perusteella. Mitä enemmän jokin pinta on heijastanut ääniaaltoja, sen voimakkaamana se piiryy profiiliin. Koska aineen tiheys vaikuttaa ääniaallon heijastuvuuteen, voidaan profiilista päätellä pohjassa olevat sedimentit ja niiden paksuudet. Kuvassa 10 matalataajuusluotaimen luoma profiili. [29; 21.]



Kuva 10. Tyypillinen matalataajuusluotaimen luoma profiili [30].

SBP-mittalaitteita on monia erilaisia, ja niiden käyttämät taajuudet vaihtelevat 0,4 – 50 kHz:n välillä. Mitä matalampi taajuus, sitä paremmin se läpäisee pohjan sedimentit ja sitä syvemältä dataa saadaan. Toisaalta mitä korkeampi taajuus on, sitä tiheämpää datan resoluutio on. Tämän vuoksi tyypillisesti dataa kerätään useammilla mittalaitteilla, jolloin saadaan hyödynnettyä kaikkien käytettyjen taajuuksien vahvuudet. [31.]

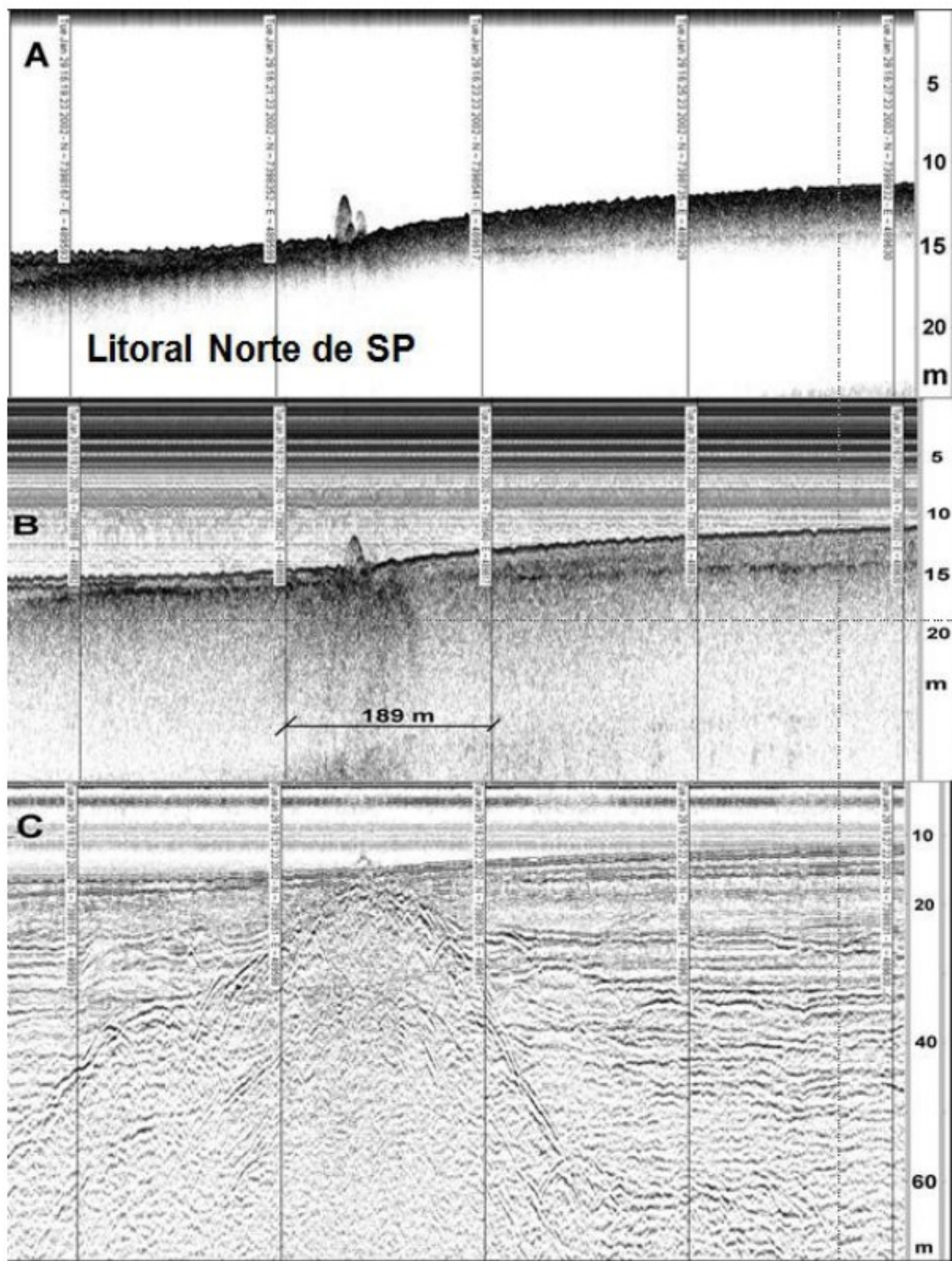
Matalataajuusluotaimen heikkous on se, että se voi kerätä dataa vain suoraan aluksen ajolinjan alta. Tämän vuoksi täydellistä peittoa mitta-alueesta on vaikea saavuttaa matalataajuusluotaindatalla. Kun matalataajuusaineisto on tullut digitoitu, voidaan sitä hyödyntämällä interpoloida eli laskea uusia sedimenttikerrosten syvyysarvoja profiilien väliin hyödyntäen tunnettuja profiilien syvyysarvoja. Interpoloituja arvoja ei voida kuitenkaan pitää täysin luotettavina, sillä tyypilliset luotauksen ajolinjat ovat vähintään 100 metrin etäisyydellä toisistaan. Kuvasta 11 nähdään miten matalataajuusprofiilien välestä ei ole saatavilla mittausdataa. [29.]



Kuva 11. Matalataajuusluotainprofiilit saadaan vain suoraan ajolinjan alta, jolloin ajolinjojen välistä ei ole saatavilla mittausdataa [32].

3.3.1 Chirp-mittalaitteet

Chirp on matalataajuusluotain, joka lähettää ääntä useammalla eri taajuudella. Tämä luo signaalista voimakkaamman, ja sillä saa aikaiseksi parempiresoluutiosta dataa. Chirp käyttää SBP-mittalaitteista korkeimpia taajuuksia. Kuvassa 12 Chirp matalataajuusprofiili verrattuna korkeampi- ja matalampitaajuiseen profiiliin. [33.]

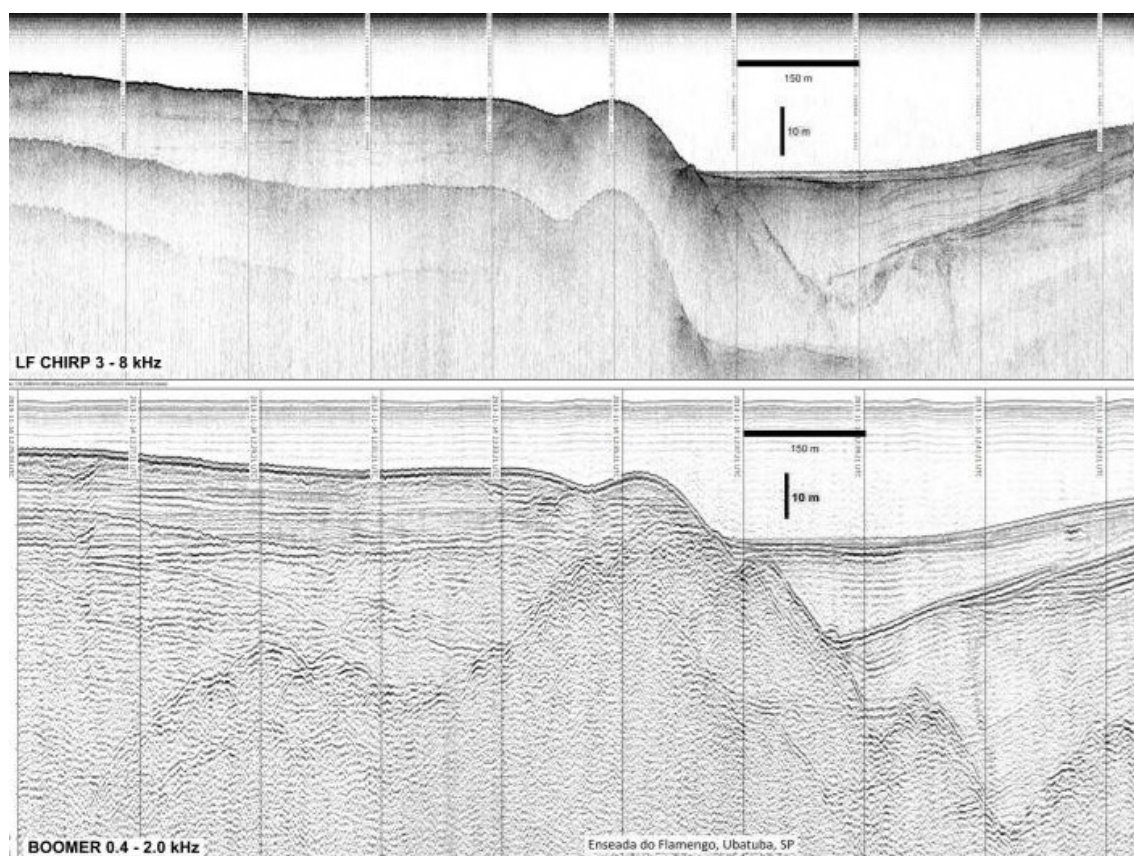


Kuva 12. Kuvassa ylläpäällä 24 kHz:n taajuinen profiili. Keskellä 2 – 8 kHz:n chirp-profiili. Alimpana 500 – 2000 Hz:n boomer-profiili. [34.]

3.3.2 Boomer

Matalammilla taajuuksilla toimiva boomer lähettää ääniaaltoja hyödyntäen fyysistä tärinää. Matalamman taajuuden vuoksi signaali uppoaa syvemmällä pohjaan, jolloin saadaan paikannettua syvemmälläkin sijaitsevat sedimenttikerrokset usein aina peruskallioon asti. [35, s. 3.]

Boomer-mittalaite on tyypillisesti kiinnitettyä aluksen perässä vedettävään katamaraanilauttaan. Koska katamaraani on veden pinnalla, ei sen paikantamiseen sisälly samankaltaisia ongelmia, kuin veden alla vedettävään viistokaiku- luotaimen. Kuvassa 13 chirp ja boomer -dataa samasta sijainnista. [31.]

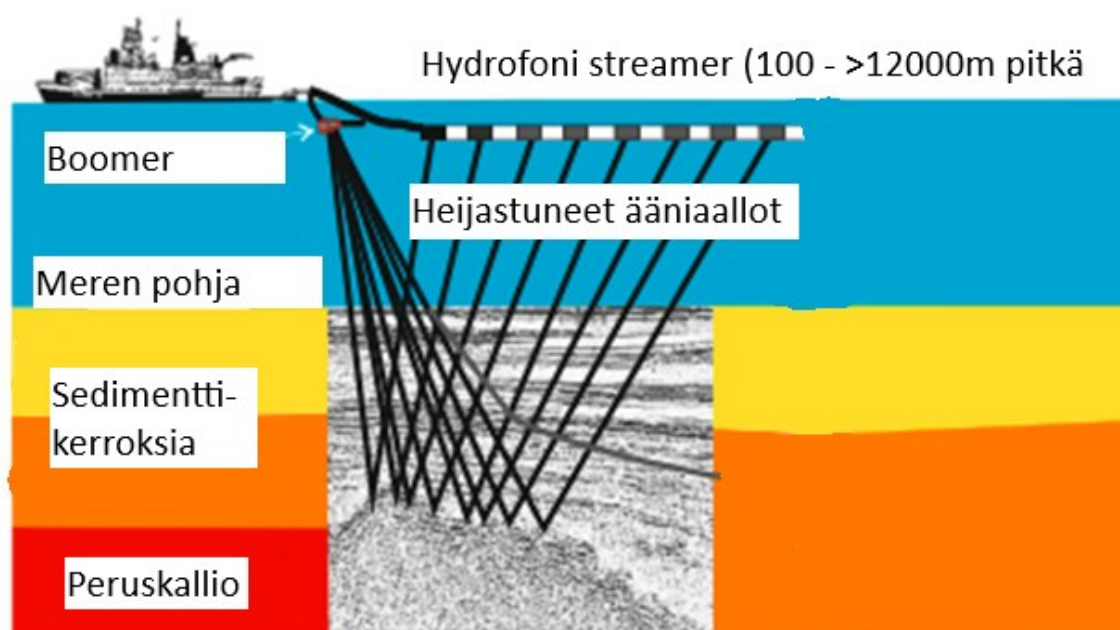


Kuva 13. LF chirp ja boomer -dataa samasta sijainnista. Chirp-datassa on nähtävissä myös tupla- ja triplaheijastuksia. [36.]

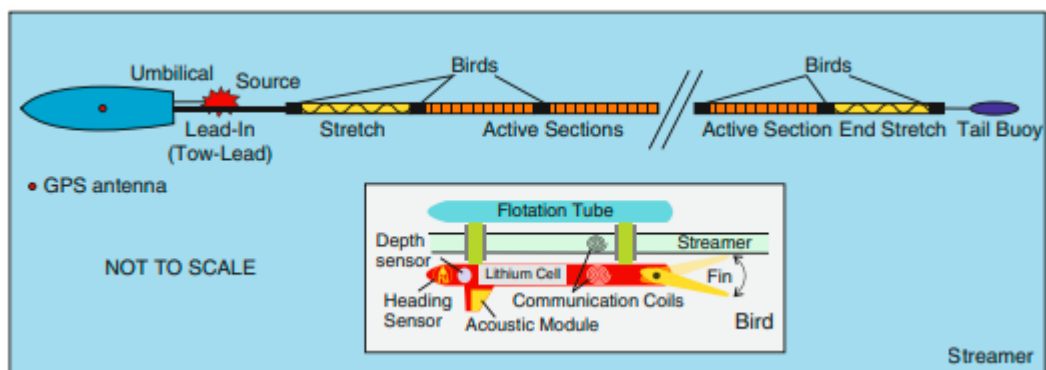
Boomer-matalataajuusluotaimen kanssa käytetään streamer-laitetta, joka koostuu monista hydrofoneista eli vedenalaisen äänen kuuntelulaitteesta.

Streamerin pituus voi vaihdella kymmenistä metreistä jopa satoihin metreihin riippuen luodattavan vesistön syvyydestä. [35.]

Matalimmilla taajuuksilla luodattaessa ääniaallot käyvät niin syvällä, että niiden paluukaikua ei voida enää tehokkaasti kuunnella mittalaitteeseen kiinnitetyllä vastaanottimella. Tämän vuoksi boomerin kanssa käytetään streameria, jolla saadaan vastaanotettua enemmän kaikuja. Kuvassa 14 on havainnollistus siitä, miten ääniaallot heijastuvat pohjan sedimenttikerroksista osuen lopuksi streameriin. Kuvassa 15 on esitetty streamerin koostumus. [35.]



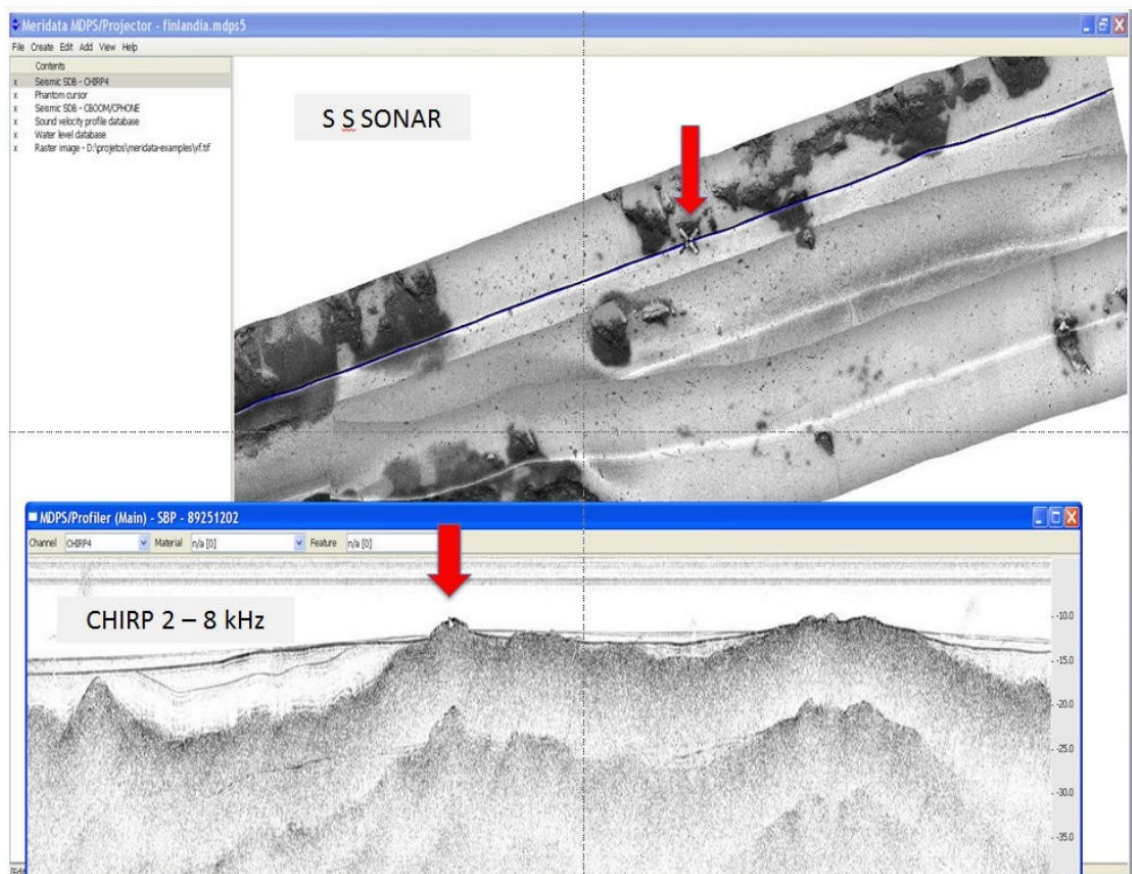
Kuva 14. Boomerin lähettämät ääniaallot heijastuvat pohjan sedimenttikerroksista osuen lopuksi streamer hydrofoniin [35].



Kuva 15. Streamer koostuu hydrofonien lisäksi muun muassa erilaisista vaikuttajista ja jousista [22].

4 Matalataajuusluotaindatan tulkinta

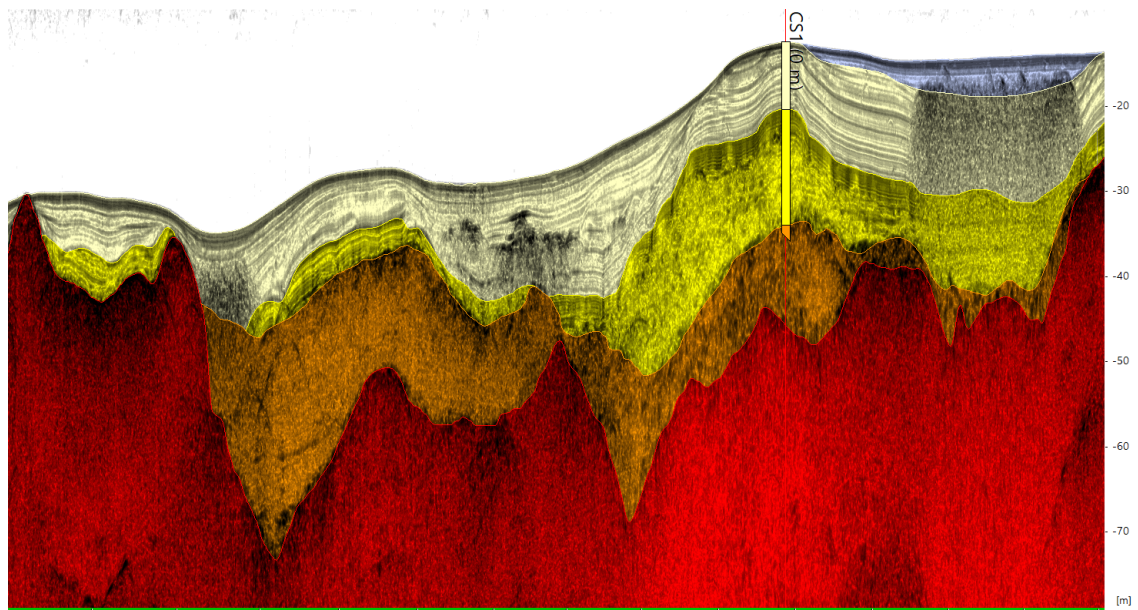
Matalataajuusluotaindata on käytännössä vain kuva, jota ei sellaisenaan voi käyttää erilaisten aineistojen luontiin. Tämän vuoksi se tulee tulkita. Tulkinta on digitointia, jossa pyritään päättämään mittausdatasta, mitä maalajeja siinä esiintyy. Tulkinnassa pyritään hyödyntämään kaikkea mahdollisesti käytettävissä olevaa dataa eli esimerkiksi MBES-batymetriadataa, viistokaikuluotaindataa sekä useampaa matalataajuusluotaindataa. Näitä hyödyntämällä voidaan aineisto tulkita samalla tuoden sen sedimenttikerrosten paksuus digitaaliseen muotoon. Kuvassa 16 nähdään miten viistokaikuluotaindataa voidaan hyödyntää matalataajuusluotaindatan tulkinnassa ja päinvastoin. [34.]



Kuva 16. Alempana kuvassa oleva matalataajuusluotainprofiili, jonka pintaan nouseva sedimenttikerros on nähtävissä myös viistokaikuluotaindatasta [34].

Tulkitsijalla tulisi olla riittävä tietämys sekä geologiasta sekä geofysiikasta eli siitä, miten erilaiset kerrokset ovat voineet syntyä sekä myös siitä, miten ääniaallot eri maa-ainesta välinaineena käyttäytyvät [35]

Matalataajuusluotaimen datan tulkinnassa käytetään luokkia, joihin mittauksella tuotettu profiili jaetaan. Käytettävät luokat riippuvat aineiston käyttötarkoituksesta sekä mittauslaitteiden määrästä. Mikäli mittaukset suoritetaan käyttäen vain yhdenlaista matalataajuusluotainta, ei luokittelua voida tehdä tarkasti. Tällöin luokat voivat olla savi ja määrittelemätön kova pohja, mikä voi tarkoittaa esimerkiksi hiekkaa, moreenia tai peruskalliota. Useampaa taajuutta hyödynnettäessä luokat voivat olla esimerkiksi muta, savi, hiekka, moreeni ja peruskallio. Vain yhtä korkeaa taajuutta käytettäessä luokkia saattaa olla vain savi ja määrittelemätön kova pohja. Kuvassa 16 on esitetty tulkittua viistokaikuluotaindataa. [38].



Kuva 17. Tulkittu viistokaikuluotaindata on jaoteltu viiteen eri sedimenttiluokkaan [37].

Tulkinnat ovat nimensä mukaisesti vain tulkintaa, eikä niitä voida pitää absoluuttisena totuutena. Tämän vuoksi tulkintojen tulee vain tukea tutkimuksia, kun esimerkiksi kartoitetaan potentiaalisia merituulivoimaloiden paikkoja. Varman tiedon pohjan sedimenttikerroksista saa geoteknisillä kairauksilla, joiden näytteistä nähdään, miten maa-ainekset ovat todellisesti kerrostuneet meren pohjassa. Geoteknisiä näytteitä voidaan myöhemmin käyttää tulkitsijoiden koulutukseen, kun voidaan verrata geoteknisiä näytteitä samasta sijainnista tehtyihin matalataajuusluotainaineistoihin. [35.]

5 Yhteenveto

Tällä työllä pyrittiin kartoittamaan kolmen eri merenmittaustyyppin, monikeilaimen, viistokaikuluotaimen ja matalataajuusluotaimen vahvuuksia ja heikkouksia. Työssä esiteltiin mittauskalustoa, niiden tuottamaa aineistoa sekä niiden käyttötarkoituksia.

Työssä havaittiin, että monet eri mittaustyyppin huonot puolet saadaan kohtalaisesti paikattua, kun niiden aineistoa täydennetään muilla mittaustyypeillä saadulla aineistolla. Mikäli esimerkiksi halutaan kerätä viistokaikuluotaindataa, on hyödyllistä mitata myös monikeilaindataa, sillä monikeilaindataa voidaan käyttää viistokaikuluotaindatan paikannuskorjauksiin.

Työn toisena tavoitteena oli kertoa yleisimmistä merenmittaustekniikoista siten, että ne on helppo omaksua, jolloin työtä voitaisiin käyttää merenmittauksen perehdytysmateriaalina. Työssä saatiin kerrottua geofysikaalisiin mittauksiin sisältyvistä eri mittaustyypeistä siten, että merenmittauksesta lainkaan kokemusta omaavan opiskelijan on helppo hahmottaa kokonaisuus, joka eri mittaustyypeistä rakentuu.

Työtä voisi jatkaa tuomalla siihen lisäksi muita mittaustyyppisiä, kuten magnetometrimittauksen, joka seuraa magneettikentän muutoksia. Sitä käyttämällä voidaan esimerkiksi löytää hylkyjä ja räjähteitä.

Lähteet

- 1 Joutsenvirta, Aarre. 2009. Ääni ja sävel. Verkkoaineisto. Sibeliushallitus. <<https://web.uniarts.fi/akustiikka/index6eb3.html?id=8&la=fi>>. Luettu 13.1.2025.
- 2 Joutsenvirta, Aarre. 2009. Kuuloalue, oktaavin käsite, diatonisuus. Verkkoaineisto. Sibeliushallitus. <<https://web.uniarts.fi/akustiikka/indexbf60.html?id=12&la=fi>>. Luettu 13.1.2025.
- 3 Joutsenvirta, Aarre. 2009. Hertsi, sentti ja desibeli. Verkkoaineisto. Sibeliushallitus. <<https://web.uniarts.fi/akustiikka/index7f5e.html?id=13&la=fi>>. Luettu 13.1.2025.
- 4 Urick, Robert J. 1975. Principles of underwater sound. New York: McGraw-Hill Book Company.
- 5 Kaproth-Joslin, Katherine A. 2015. The History of US: From Bats and Boats to the Bedside and Beyond. Verkkoaineisto. RadioGraphics. <<https://doi.org/10.1148/rg.2015140300>>. 30.5.2015. Luettu 10.12.2024.
- 6 Kaushal, Hemani & Kaddoum, Georges. 2016. Underwater Optical Wireless Communication. Verkkoaineisto. The NorthCap University. <https://www.researchgate.net/publication/301893140_Underwater_Optical_Wireless_Communication>. 29.4.2016. Luettu 13.12.2024.
- 7 Deep Light. 2004. Verkkoaineisto. National Oceanic and Atmospheric Administration. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04deepscope/background/deelight/deelight.html>>. 28.11.2022. Luettu 5.11.2024.
- 8 Categories of Soundwave. Verkkoaineisto. Bartleby. <<https://www.bartleby.com/subject/science/physics/concepts/categories-of-sound-wave>>. Luettu 10.1.2025.
- 9 Wells, Matthew & Troy, Cary. 2022. Surface Mixed Layers in Lakes. Teoksessa Mehner, Thomas & Tockner, Klement. Encyclopedia of Inland Waters. Elsevier.
- 10 Geophysical investigations for offshore renewables. 2023. Verkkoaineisto. Offshore Infrastructure regulator. <<https://www.oir.gov.au/sites/default/files/Fact%20sheet%20-%20Geophysical%20investigations%20for%20offshore%20wind%20-%20November%202023.pdf>>. 1.11.2023. Luettu 23.11.2024.

- 11 Imagenex 878 Sidescan Sonar. Verkkoaineisto. Unique Group. <<https://www.uniquegroup.com/product/imagenex-878-sidescan-sonar/>>. Luettu 7.1.2025.
- 12 Multibeam Echosounder (MBES) field Equipment. Verkkoaineisto. University of Otago. <<https://www.otago.ac.nz/surveying/services/facilities/multi-beam-echosounder-mbes-field-equipment>>. Luettu 7.1.2025.
- 13 3400: Portable Sub-bottom Profiler. Verkkoaineisto. Edgetech. <<https://www.edgetech.com/product/3400-portable-sub-bottom-profiler/>>. Luettu 7.1.2025.
- 14 Sound Source, Boomers. Verkkoaineisto. AAE Technologies. <<https://www.aaetechnologiesgroup.com/applied-acoustics/products/sub-bottom-profiling/sound-source-boomers/>>. Luettu 10.1.2025.
- 15 Hydrophones. Verkkoaineisto. AAE Technologies. <<https://www.aaetechnologiesgroup.com/applied-acoustics/products/sub-bottom-profiling/hydrophones/>>. Luettu 9.1.2025.
- 16 How multibeam sonar works. 2009. Verkkoaineisto. National Oceanic and Atmospheric Administration. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/09bermuda/background/multibeam/multibeam.html>>. 10.2.2015. Luettu 1.11.2024.
- 17 Multibeam Sonar. Verkkoaineisto. Ocean Exploration. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/multibeam.html>>. Luettu 23.11.2024.
- 18 Multibeam Backscatter. 2017. Verkkoaineisto. Geoscience Australia. <<https://www.ga.gov.au/scientific-topics/marine/survey-techniques/backscatter>>. 19.7.2017. Luettu 5.1.2025.
- 19 Seafloor Characterization. Verkkoaineisto. Center for Coastal and Ocean Mapping. <<https://ccom.unh.edu/theme/seafloor-characterization?page=1>>. Luettu 23.1.2025.
- 20 Zhao, Jianhu; Meng, Junxia; Zhang, Hongmei & Yan, Jun. 2017. Seabed Topography by Matching Seabed Classification Images. Verkkoaineisto. Remote Sensing. <<https://www.mdpi.com/2072-4292/9/12/1214>>. 24.11.2017. Luettu 9.3.2025.
- 21 Side-Scan Sonar. Verkkoaineisto. Ocean Exploration. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/side-scan.html>>. Luettu 13.1.2025.
- 22 Lekkerkerk, Huibert-Jan. 2016. Technology in Focus: Insides of Side-scan Sonar. Verkkoaineisto. Hydro International. <<https://www.hydro->

- international.com/content/article/insides-of-side-scan-sonar>. 19.5.2016. Luettu 13.1.2025.
- 23 Leblond, Isabelle & Bertholom, Alain. 2021. Towed sensors positioning with forward looking sonars: Application on a Side Scan Sonar. Verkkoaineisto. HAL open science. <<https://hal.science/hal-03240240v1/document>>. 28.5.2021. Luettu 10.1.2025.
 - 24 Crawford, Anna M. 2002. Methods of Determining Towfish Location for Improvement of Sidescan Sonar Image Positioning. Verkkoaineisto. Defence Research and Development Canada. <<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1005010.pdf>>. 1.4.2002. Luettu 12.12.2024.
 - 25 Wang, Wei; Zhu, Min & Yang, Bo. 2023. Two High-Precision Ultrashort Baseline Location Methods Based on Phase Difference. Verkkoaineisto. Institute of Electrical and Electronics Engineers. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10056767>>. 28.2.2023. Luettu 14.4.2024.
 - 26 What is An USBL system? Verkkoaineisto. Exail. <<https://www.exail.com/resources/knowledge-center/what-is-a-usbl-system>>. Luettu 4.1.2025.
 - 27 von Bröckel, Klaus. 2014. Echo Sounders versus Air Bubbles in Research Vessels. Verkkoaineisto. Hydro International. <<https://www.hydro-international.com/magazines/hydro-international-january-february-2014.pdf>>. 1.2.2014. Luettu 10.1.2025.
 - 28 Cobra, Daniel T.; Oppenheim, A.V. & Jaffe, Jules. 1992. Verkkoaineisto. Institute of Electronics Engineers. <https://www.researchgate.net/publication/3230739_Geometric_distortions_in_side-scan_sonar_images_a_procedure_for_their_estimation_and_correction>. 1.8.1992. Luettu 13.1.2025.
 - 29 Sub-Bottom Profiler. 2023. Verkkoaineisto. Ocean Explorer. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sub-bottom-profiler/sub-bottom-profiler.html>>. 26.6.2023. Luettu 11.12.2024.
 - 30 Sub-bottom profilers. 2019. Verkkoaineisto. French oceanographic fleet. <<https://www.flotteoceanographique.fr/en/Facilities/Tooling/Ship-Equipment/Echo-Sounding-Equipment/Sub-bottom-profilers>>. 27.9.2019. Luettu 11.12.2025.
 - 31 Calvert, Mike. 2022. Guide to Sub-Bottom Profiling. Verkkoaineisto. AAE Technologies. <<https://www.aaetechnologiesgroup.com/news/guide-to-sub-bottom-profiling/>>. 27.5.2022. Luettu 11.12.2025.

- 32 Sonarwiz for Sub-Bottom Profilers. Verkkoaineisto. Subsea Technologies. <<https://www.subseatechnologies.com/chesapeake-technology/sonarwiz/sub-bottom/>>. Luettu 1.12.2024.
- 33 Chaytor, Jason D. 2014. Sub-Bottom Profiling. Verkkoaineisto. Ocean Explorer. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/explorations/ex1404/logs/sept24/sept24.html>>. 24.8.2014. Luettu 5.12.2024.
- 34 de Souza, Luis Antonio Pereira; da Silva, Mariucha & Ola, Kim. 2013. Why multi-frequency approach on shallow water seismic investigation? Sociedade Brasileira de Geofisica.
- 35 Hübscher, Christian & Gohl, Karsten. 2014. Reflection/Refraction Seismology. Springer. <https://epic.awi.de/id/eprint/35930/1/Huebscher-Gohl_reflection-refraction-seismology_Encyclopedia-Marine-Geosciences_Springer_2014.pdf>. Luettu 28.10.2024.
- 36 Boomer or chirp sub-bottom profilers. Verkkoaineisto. SIG France. <<https://www.marine-seismic-equipments.net/methods/boomer-or-chirp>>. Luettu 10.1.2025.
- 37 Meridata MDPS data processing and interpretation software. Verkkoaineisto. Meridata. <<https://meridata.fi/mdps.shtml>>. Luettu 10.3.2025.
- 38 Saleh, Mohamed & Rabah, Mostafa. 2016. Seabed sub-bottom sediment classification using parametric sub-bottom profiler. Verkkoaineisto. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. <<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.01.004>>. 8.5.2019. Luettu 22.11.2024.