



Mats Tulander

Arctia Meritaito Oy:n monikeilainaineiston käsittelyprosessin arviointi ja selventäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

23.5.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Mats Tulander
Otsikko:	Arctia Meritaito Oy:n monikeilainaineiston käsittelyprosessin arviointi ja selventäminen
Sivumäärä:	31 sivua
Aika:	23.5.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Maanmittaustekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Ilkka Partonen, Metropolia Ammattikorkeakoulu Työpäällikkö Hanno Kurtti, Arctia Meritaito Oy

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli selventää Suomen vesialueilla monikeilaluotauksella tuotetun aineiston jälkikäsitteilyä. Työ tehtiin toimeksiantajalle, joka tuottaa aineistoa merikarttojen laatimiseen.

Työ alkoi arvioimalla yrityksen nykyistä sisäistä dokumentaatiota ja ohjeistusta aineistonkäsittelystä sekä arvioimalla vuoden 2023 mittauskauden tuloksia. Arvioinnin perusteella todettiin tarpeelliseksi päivittää yhtiön sisäisiä aineistonkäsittelyohjeita.

Työ edellytti tutustumista työnantajan aineistonkäsittelyprosessiin ja käytännön kokemusta käsittelystä kentällä. Kokemusta käsittelyprosessista kerättiin mittauskautena 2023 huhtikuun ja syyskuun välillä. Tietoa haettiin tämän lisäksi eri lähteistä verkosta, laitevalmistajilta ja erilaisista tutkimuksista teoriaosuuden tueksi.

Työn tuloksena luotiin yli 200-sivuinen yksityiskohtainen laadunvarmistuskäsikirja, joka kuvailee aineistonkäsittelyprosessin jokaista vaihetta. Tarkoituksena oli, että käsikirja selventää prosessia ja auttaa perehdyttämään uusia työntekijöitä tehtävään. Opinnäytetyön laajuus rajattiin yleiselle tasolle, jotta toimeksiantajan sisäiset prosessit pysyisivät salaisina.

Avainsanat: merenmittaus, aineistonkäsittely, MBES

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Mats Tulander
Title: Evaluation and Clarification of Post-Processing Process of Multibeam Sonar Data at Arctia Meritaito Oy
Number of Pages: 31 pages
Date: 23 May 2024

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

The aim of this final year project was to discuss the post-processing process of multibeam sonar data produced by the commissioning company for the production of nautical charts in Finnish waters. The project first reviewed the current documentation and guidelines for post-processing and evaluated the results of the surveys from the surveying season of 2023. Based on these evaluations and reviews it was determined that the current guidelines for post-processing needed to be updated.

The project required knowledge and experience of the company's data processing process, and practical experience in the field. Field work during the survey season of 2023 from April to September served as the basis for the project. Additionally, information was gathered from numerous manufacturers' publications and research papers.

The project resulted in a more than 200-page quality assurance guide that describes every step of the post-processing process in detail. The guide clarifies the process and helps new personnel to get onboard with the job. The company's internal processes were excluded from the published final year project, but the thesis still describes what to do the data and what standards to apply.

Keywords: hydrographic surveying, data processing, MBES

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Merenmittaus	3
2.1	Yleistä	3
2.2	Merenmittauksen historiaa	3
2.3	Monikeilaus	4
2.3.1	Paikannusjärjestelmä	6
3	Tekniset spesifikaatiot	9
3.1	Yleistä	9
3.2	S-44	9
3.2.1	TVU, THU ja TPU	9
3.2.2	Kohteiden tunnistus	10
3.2.3	Bathymetric Coverage eli syvyysmittauksen peitettävyyys	11
3.2.4	Mittausluokat	12
3.3	FIS44	14
3.3.1	Yleistä	14
3.3.2	Epävarmuustekijät	15
3.3.3	Kohteiden tunnistus	15
3.4	Operointikäsikirja	15
4	Aineistonkäsittely	16
4.1	Yleistä	16
4.2	Laadunvalvonta	16
4.3	Syvyyspisteaineistoon tehtävät korjaukset	18
4.3.1	Vedenkorkeus	18
4.3.2	Aluksen liikkeiden korjaukset	20
4.3.3	Äänennopeus	21
4.3.4	Virrehavaintojen poistaminen syvyyspisteaineistosta	27
5	Yhteenveto	31
	Lähteet	32

Lyhenteet

- EUREF-FIN: Euroopan terrestrisen vertausjärjestelmän 1989 suomalainen realisaatio.
- FIS44: Suomen kansallinen merenmittaussovellus.
- GNSS: *Global Navigation Satellite System*. Maailmanlaajuinen satelliittipainausjärjestelmä.
- IHO: *International Hydrographic Organization*. Kansainvälinen organisaatio, joka ohjeistaa merenmittaustoimintaa.
- IMU: *Inertial Measurement Unit*. Liikesensori, jolla voi havaita muutoksia kiihtyvyydessä ja kulmanopeudessa.
- Lidar: *Light Detection and Ranging*. Laserkeilaus.
- MBES: *Multibeam Echosounder/Multibeam Echo sounding*. Monikeilakaiku-luotaus.
- N2000: Euroopan korkeusvertausjärjestelmän kansallinen realisaatio.
- SVP: *Sound Velocity Profile*. Äänennopeusprofiili, joka havainnollistaa äänennopeutta vedessä.
- S-44: Kansainvälinen standardi merenmittaukselle.
- THU: *Total Horizontal Uncertainty*. Horisontaaliset epävarmuustekijät syvyyspisteaineistossa.
- TPU: *Total Propagated Uncertainty*. Kertyvät epävarmuustekijät syvyyspisteaineistossa.

TVU: *Total Vertical Uncertainty*. Vertikaaliset epävarmuustekijät syvyys-
pisteaineistossa.

1 Johdanto

Tämä työ merenmittausaineiston laadunvalvontaprosessin arvioinnista ja selvittämisestä tehtiin Arctia Meritaito Oy:lle. Lähtökohtana on käytetty yhtiön sisäistä dokumentaatioita aineistonkäsittelystä ja mittauskäytännöistä. Työ käsittelee erityisesti monikeilaluotauksella tuotettua aineistoa Suomen aluevesillä navigointiturvallisuuden tarpeisiin.

Työtä varten on ollut tärkeää perehtyä ja osallistua Meritaidon merenmittaustoimintaan. Kenttätyö Suomen vesillä sekä mitatun aineiston jälkikäsittely voidaan todeta ensimmäiseksi työvaiheeksi. Mittauskauden jälkeen on arvioitu aineiston laatua ja sitä, miten mittaukset ovat ylipäättään onnistuneet. Samalla on arvioitu Meritaidon sisäistä dokumentaatiota ja ohjeita aineistonkäsittelijöille ja pohdittu, mitä asioita on tärkeä tarkentaa ja korostaa, jotta toimintaa saataisiin kehitettyä jatkossa selkeämmäksi ja tehokkaammaksi.

Arviointien perusteella todettiin tarpeelliseksi tuottaa uusi laadunvarmistuskäsikirja Meritaidolle. Tavoitteena oli selkeyttää aineistonkäsittelyprosessia ja varmistaa yhteiset toimintatavat kaikille työntekijöille. Merenmittaus on myös hyvin kausiluonteista, joten uusia kausityöntekijöitä varten oli tärkeää luoda selkeä käsikirja, johon he voisivat tukeutua työvuoron aikana ja joka myös helpottaa heidän koulutustansa ja perehtymistä.

Tämä työ kuvaa Meritaidon sisäistä käsittelyprosessia yleisellä tasolla, ja siinä käydään läpi, mitä asioita merenmittauksessa ja erityisesti aineistonkäsittelyssä tulee huomioida. Työ ei sisällä yksityiskohtaisia työvaiheita yrityksen sisäisen tiedon salassapidon takia.

Meritaito on yksi Pohjois-Euroopan suurimmista merenmittausyrityksistä ja tarjoaa merenmittaus-, tutkimus-, suunnittelu ja tietopalveluja Suomessa sekä pohjoisen Euroopan merialueilla. Meritaito oli ennen osa Merenkululaitosta,

kunnes toiminta yhtiöitettiin Meritaidoksi vuonna 2010. Meritaito Oy yhdistettiin isompaan Arctia konserniin vuonna 2018. [1.]

Meritaidon asiakkaina ovat karttalaitokset ja viranomaiset, satamat, kunnat ja kaupungit, konsultit sekä teollisuus- ja energiayhtiöt. Merenmittauspalveluihin kuuluvat merenpohjan topografian kartoittaminen monikeilaluotauksella (MBES) ja Lidar-mittauksilla, tietoa pohjan materiaaleista ja kerrostumista, tietoa vesipatsaasta sekä muut geotekniset tutkimukset. Meritaidolla on Puolustusvoimien kanssa KATAKRI-turvallisuussopimus, joka mahdollistaa turvaluokiteltujen hankkeiden toteuttamisen Suomen vesillä. [1.]

2 Merenmittaus

2.1 Yleistä

Merenmittauksella tarkoitetaan merenpohjan fyysisten ominaisuuksien kartoittamista erilaisilla metodeilla. Tietoa merenpohjasta tarvitaan moneen eri käyttöön, kuten merikarttoihin ja ympäristötutkimuksiin sekä vedenalaiseen rakentamiseen ja siihen liittyviin merenpohjan tehtäviin muutoksiin, kuten ruoppaus. NykYTEKNIKALLA pystytään myös tutkimaan merenpohjan alla olevia sedimenttejä ja kallioperää. [2.]

2.2 Merenmittauksen historiaa

Merenmittauksella on pitkä historia, jonka aikana menetit ovat muuttuneet mekaanisista menetelmistä kaikuluotaintekniikkaan ja laserkeilaukseen. Vanhanaisissa tutkimuksissa käytettiin luotainsauvaa ja lyijypainolla sekä syvyysmerkinnöillä varustettua johtoa. Paikannus ratkaistiin sekstantin avulla. Työ suoritettiin käsin, mikä teki siitä työlästä ja aikaa vievää. Syvyyshavainnot saattoivat usein olla tarkkoja, mutta havaintojen määrät olivat vähäiset, joten mittauksen kattavuudet olivat pieniä. [3.]

1900-luvulla kehitettiin menetelmä merenmittaukseen, jossa kahden aluksen välillä vedettiin vaijeria, joka oli asetettu tiettyyn syvyyteen painojen ja poijujen avulla. Kun vaijeri törmäsi vedenalaiseen kohteeseen, kuten esimerkiksi kiveen, se kiristyi ja paljasti kohteen syvyyden ja sijainnin. [3.]

1930-luvulla kehitettiin ensimmäiset kaikuluotaimet, jotka käyttivät ääntä mittaamaan merenpohjan etäisyyttä suoraan aluksen alla. Ensimmäiset kaikuluotaimet käyttivät yhtä sädettä tai keilaa, joilla saatiin pitkä jono havaintoja merenpohjasta. Tämä nopeutti huomattavasti mittausprosessia, mutta dataan jäi paljon aukkoja mittauslinjojen väliin. [3.]

1960-luvulla kehitettiin uusia menetelmiä, jotka muuttivat perusteellisesti tapaa, jolla merenpohjaa kartoitetaan. Monikeilainjärjestelmät, englanniksi Multibeam

Echosounder (MBES), mahdollistivat merenpohjan kartoittamista viuhkamuotisella alueella aluksen alla, jolla saatiin kattava peittävyys tutkittavasta alueesta. Monikeilanjärjestelmällä mitattu aineisto vaatii jälkikäsitteilyä, jotta siitä saadaan tarpeeksi tarkkaa esimerkiksi merikarttatuotantoa varten. [3.]

2.3 Monikeilaus

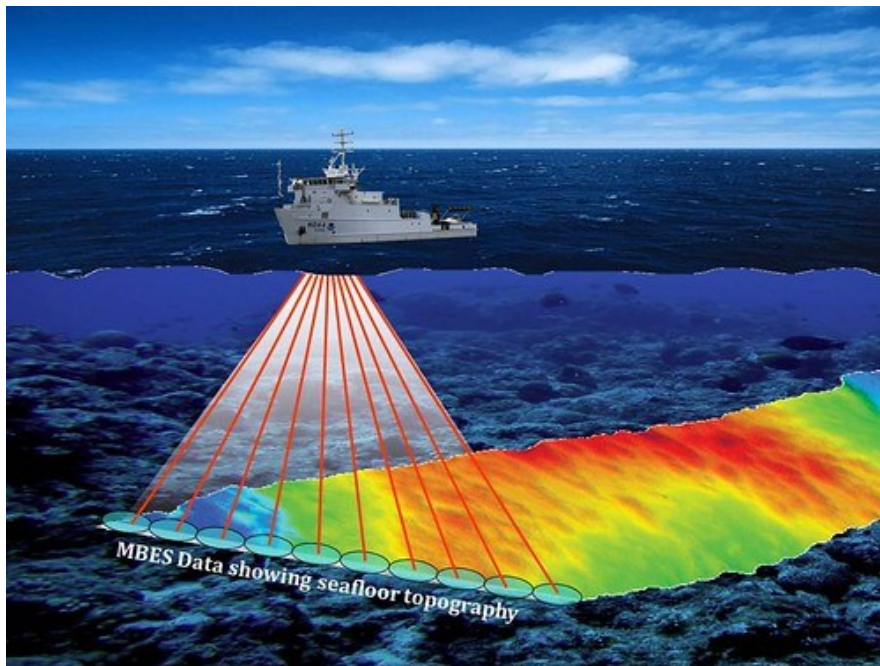
Monikeilauksella kartoitetaan merenpohjaa täyspeittoisesti. Monikeilaus viittaa siihen, että anturiryhmä, joka koostuu useammasta anturista, lähettää ja vastaanottaa monta äänipulssia samanaikaisesti viuhkan muodossa aluksen alla. Tällä menetelmällä saadaan syvyyshavaintoja suoraan aluksen alla nadiirissa sekä tietyssä sektorissa molemmilla puolilla alusta. Viuhkan leveyttä voidaan säätää muuttamalla luotaimen avautumiskulmaa. [4.]

Monikeilauksella saadaan kahdenlaista tietoa merenpohjasta. Syvyys lasketaan ajan perusteella, eli ajasta, jossa äänipulssi lähetetään anturista, osuu merenpohjaan ja kimpoaa takaisin anturiin. Tätä kutsutaan batymetriaksi tai syvyystiedoksi. Batymetria voidaan myös ymmärtää merenpohjan topografiana. Havainnot luovat 3D-pistepilven merenpohjasta. Pistepilvestä voidaan luoda erilaisia pohjamalleja eri käyttötarkoituksiin, esimerkiksi merikarttoihin. Tämän lisäksi saadaan tietoa merenpohjan fyysisistä ominaisuuksia paluusignaalin vahvuuden perusteella. Esimerkiksi kovat pinnat, kuten kivet ja kalliot, heijastavat enemmän ääntä kuin esimerkiksi hiekka tai lieju. [4.]

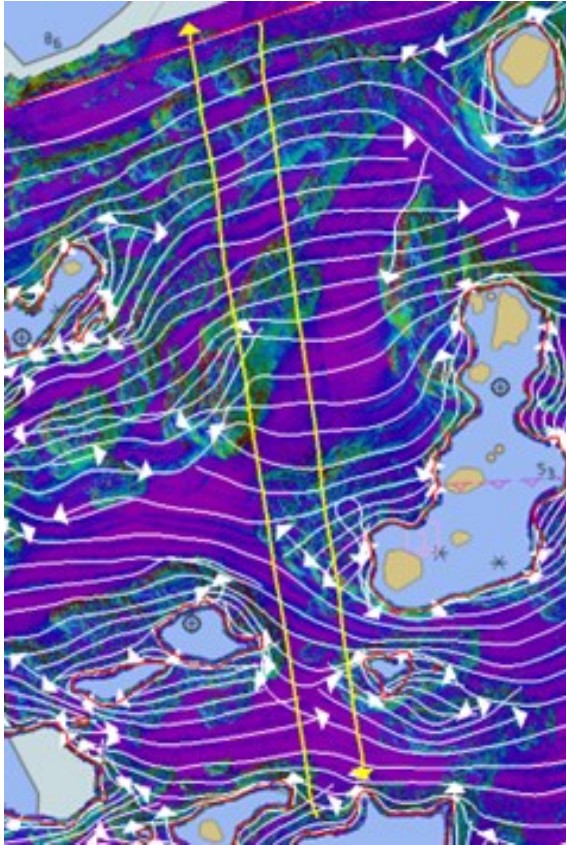
Mittaus suoritetaan ajamalla mittauslinjoja systemaattisesti rinnakkain mittausalueella, jotta saadaan täyspeitto merenpohjasta. Mittauslinjojen väli riippuu luotaimen avauskulmasta ja syvyydestä. Matalissa vesissä mittauslinjoja ajetaan isommalla avautumiskulmalla ja syvemmissä vesissä avauskulmaa voidaan kaventaa. Mittauksessa on kuitenkin tärkeä huomioida, että havaintojen tarkkuudet laskevat isoimmassa kulmassa. Mittauslinjoissa pitää olla päällekkäisyyttä, jotta voidaan todeta mittauksen olevan tarkkaa. [4.]

Mittauslinjojen päältä ajetaan kohtisuoraan poikittaislinjat, englanniksi "Crosslines", joiden tarkoitus on varmistaa, että mittauslinjoissa ei ole systemaattisia virheitä, jotka eivät näkyisi rinnakkaisessa päällekkäisyydessä [4].

Kuva 1 havainnollistaa monikeilaimen muodostaman viuhkamuotoisen peittävyyden merenpohjasta. Kuvassa 2 on esitelty monikeilaluotaimella mitattu alue, jossa erottuu mittauslinjat sekä poikittaislinjat.



Kuva 1. Monikeilauksen tuottama viuhkamainen peitto aluksen alla [5].

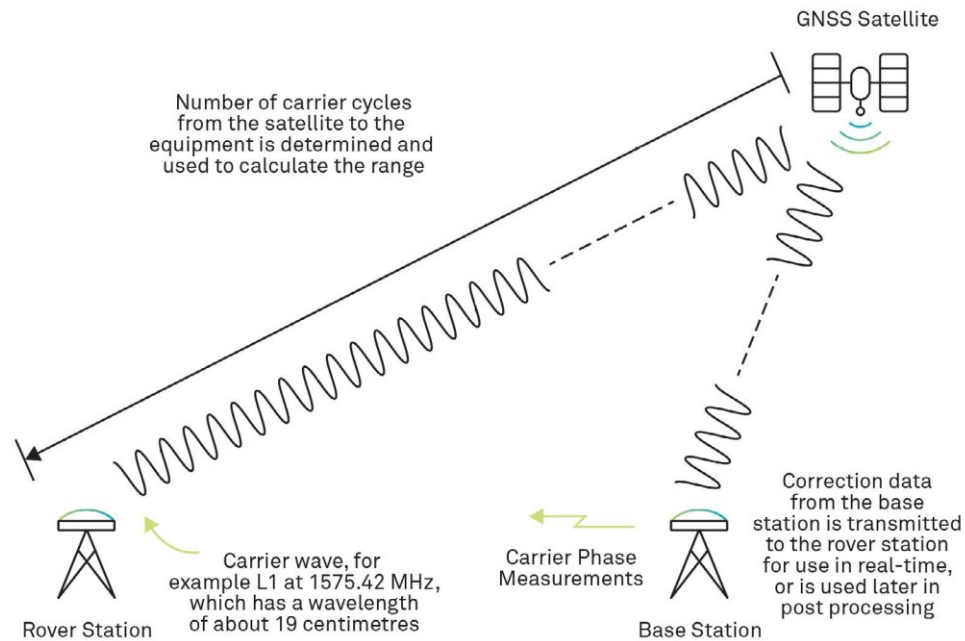


Kuva 2. Ote mitatusta alueesta. Mittauslinjat näkyvät valkoisina ja poikittaislinjat keltaisina. Pinta on luotu mitatusta syvyyspisteaineistosta. [6.]

2.3.1 Paikannusjärjestelmä

Tarkka monikeilaus vaatii tarkan paikannuksen alukselle. Tarkka sijainti ratkaistaan GNSS-tekniikan avulla yhdistettynä liikeseensoreilla. [7.]

Alusten GNSS-paikannus perustuu RTK-paikannus tekniikkaan (Real Time Kinematic), jossa vastaanottaja (Rover) ja jokin tunnettu tukiasema (Base Station) vastaanottaa signaaleja samoilta satelliiteilta. Vastaanottaja saa tällä metodilla reaaliaikaisia korjauksia tukiasemalta, mahdollistaen tarkan sijaintiratkaisun. Kuvassa 3 on esitetty RTK-paikannuksen periaate, jossa vastaanottaja on yhdistettynä satelliitteihin sekä tukiasemaan [8.]



Kuva 3. RTK-paikannuksen toimintaperiaate [9].

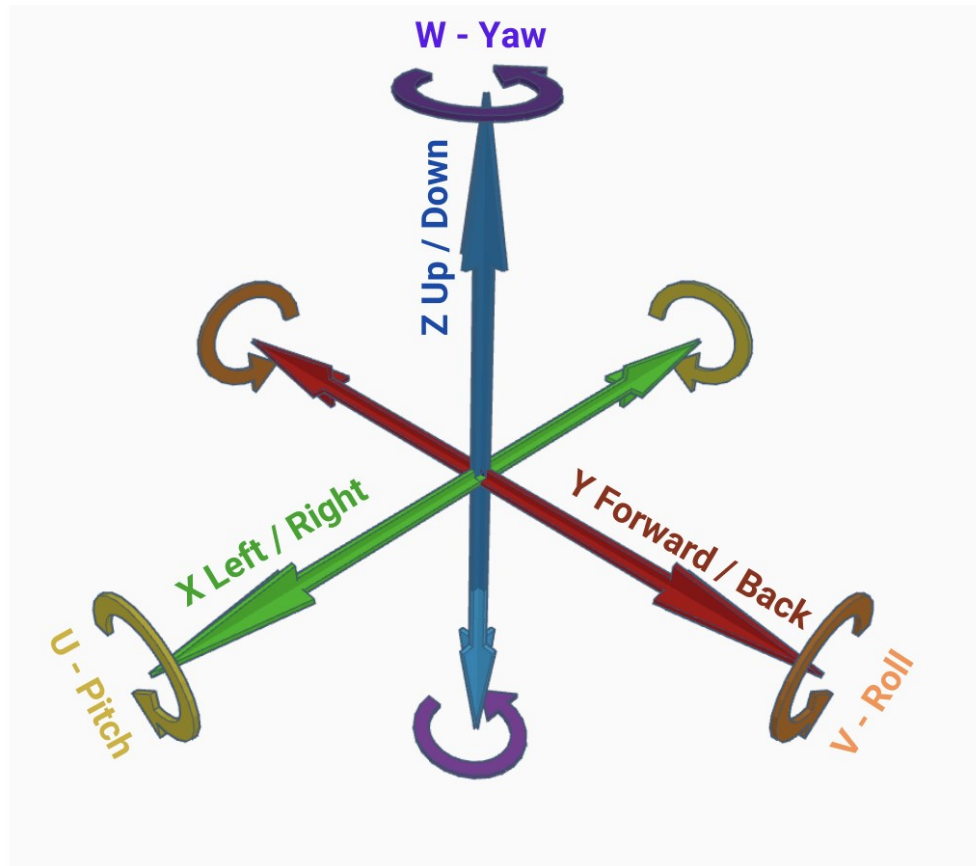
Liikennesensorina toimii IMU eli Inertial Measurement Unit. IMU pystyy havaitsemaan ja tallentamaan kiihtyvyyttä kiihtyvyyssmittarin avulla ja liikemuutoksia gyroskoopin avulla. [10.]

GNSS ja liikeseensorin yhdistelmällä saadaan tarkka sijaintitarkaisu kuudessa vapausasteessa [7]. Nämä liikkeet ovat merenkulkualuksilla

- surge, liike eteen/taakse suunnassa
- sway, liike sivuttaissuunnassa
- heave, liike korkeussuunnassa
- pitch, aluksen liikkeet pystysuunnassa eli keulan ja perän nousu ja lasku.
- roll, kallistuminen sivuttaissuunnassa eli aluksen kallistuminen tyyrpuurissa ja paapuurissa.
- yaw, aluksen suunta, eli mihin aluksen keula osoittaa. [11.]

Kuvassa 4 nämä liikesuunnat on kuvattu koordinaatistossa, jonka keskipiste on aluksen painopisteessä. Surge on liike Y-akselin suunnassa, sway on liike x-

akselin suunnassa ja heave on liike z-akselin suunnassa. Pitch kiertää x-akselin ympärillä, roll kiertää y-akselin ympärillä ja yaw kiertää z-akselin ympärillä. [11].



Kuva 4. Kuusi liikevapausastetta havainnollistettu akseleilla [12].

3 Tekniset spesifikaatiot

3.1 Yleistä

Merenmittausaineiston laatua varmistetaan kansainväliseltä tasolta asti erilaisilla standardeilla [13]. Arctia Meritaidossa sovelletaan Suomen vesillä S-44 standardia, jota on tarkennettu kansallisella FIS44-standardilla. Kansallista standardia sovelletaan projektikohtaisesti, kun valmistellaan operointikäsi kirjaa. [14.]

3.2 S-44

S-44 on IHO:n (International Hydrographic Organization) laatima standardi merenmittaukselle. S-44 asettaa standardin mittauksille, joilla varmistetaan merenkulun turvallisuutta, esimerkiksi merikarttojen tuotantoa varten tehtävät mittaukset. Dokumentissa on linjattu minimivaatimukset merenmittaustehtäville, joilla varmistetaan yleinen käytäntö ja standardi merenmittauksessa maailmanlaajuisesti. Viimeisin versio, kuudes painos versio 6.1.0, on julkaistu vuonna 2020. [13, s. 5–7.]

3.2.1 TVU, THU ja TPU

Merenmittauksessa halutaan tietää mittauksen tarkkuus ja luotettavuus eli se, miten tarkka mitattu merenpohja on verrattuna todelliseen merenpohjaan [15]. S-44-standardin mukaan tarkkuus ilmaistaan epävarmuutena vertikaali ja horisontaali suunnassa ja niiden yhteenlaskettuna epävarmuutena. S-44-standardissa nämä epävarmuudet ovat TVU (Total Vertical Uncertainty), THU (Total Horizontal Uncertainty) ja TPU (Total Propagated Uncertainty). S-44-standardi antaa linjauksen sallituista epävarmuuksista sekä miten ne on laskettava ja ilmaistava. [13, s. 4.]

TVU lasketaan yksiulotteisessa suunnassa, eli pystysuunnassa ja sisältää kaikki syvyyteen vaikuttavat epävarmuustekijät. THU lasketaan kahdessa

ulottuvuudessa ja sisältää kaikki sivusuuntaiseen paikannukseen liittyvät epävarmuustekijät. S-44-standardin mukaan THU oletetaan olevan yhtä suuri molemmissa ulottuvuuksissa, joten olettaen normaalin virhejakauman, THU ilmaistään yhtenä numerona. Kaikki nämä epävarmuustekijät lasketaan yhteen, jolloin saadaan TPU eli kertyvät epävarmuustekijät kolmiulotteisesti. [13, s. 4.]

S-44-standardin mukaan toimijan on luotava tilastollinen menetelmä, joka yhdistää kaikki epävarmuustekijät paikannuksessa vertikaali ja horisontaali suunnassa TVU:n ja THU:n määrittämiseen. Koko mittausjärjestelmän tarkkuus on demonstroitava ennakoivilla a priori (ennustavilla) laskennoilla, jotka sisältävät kaikki epävarmuustekijät mittauslaitteista, mittauksista sekä mittaushetken olosuhteista. Käytännössä a priori laskenta perustuu mittauslaitteiden laitevalmistajien epävarmuusarvoihin sekä ennakoituihin sääolosuhteisiin. Arviota on päivitettävä mittauksen aikana, jotta todelliset olosuhdetiedot, esimerkiksi tuuli ja aallot, voidaan ottaa huomioon. Lopulliset epävarmuusarvot voivat koostua a priori (ennen mittauksia) ja a posteriori (mittausten jälkeen) -laskennoista, empiirisistä arvoista, esimerkiksi syvyyshavaintojen keskijakaumaan perustuvia arvoja tai jokin yhdistelmä näitä. Epävarmuustekijät tallennetaan 95 %:n luotettavuustasolla. [13, s. 4.]

Epävarmuustekijöitä ovat esimerkiksi

- aluksen syväys
- aluksen painauma (Matalassa vedessä alus painuu syvemmälle, kun sen vauhti kiihtyy. Englanniksi ilmiötä kutsutaan nimellä squat.)
- äänennopeuden vaihtelu vedessä
- mittausjärjestelmän virheet
- roll, pitch ja heave
- vedenkorkeus. [16, s. 11.]

3.2.2 Kohteiden tunnistus

Kohteilla tarkoitetaan muusta merenpohjasta eroavia vedenalaisia esineitä, jotka voivat olla esimerkiksi kiviä tai erilaisia vedenalaisia rakenteita. Kohteiden

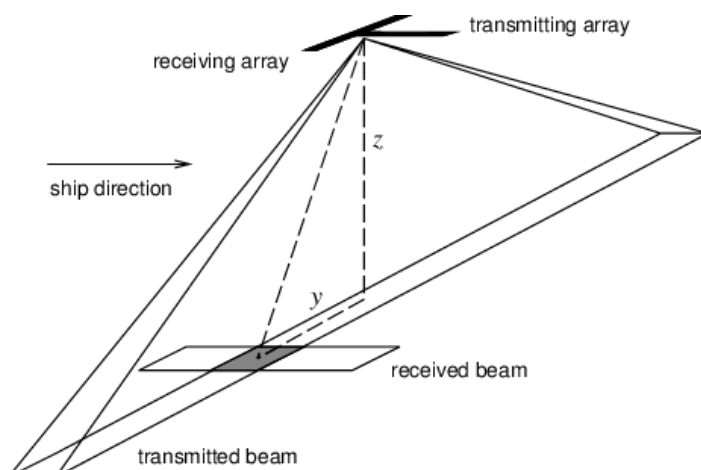
tunnistus, S-44-standardissa Feature Detection ja Feature Search, asettaa vaatimukset vedenalaisten kohteiden havaitsemiseen. Standardissa on asetettu minimikoot havaittaville kohteille luokittain. Koko perustuu symmetriseen kuutioon, eli jos minimivaatimus tunnistettavalle kohteelle on yksi metri, mittausjärjestelmän on pystyttävä havaitsemaan kuution kokoiset vedenalaiset kohteet. [13, s. 6.]

Feature Search eli kohteiden havaitsemisen kattavuus viittaa siihen, miten iso osa mitattavasta alueesta on mitattu systemaattisella tavalla kohteiden havaitsemista varten. 100 % tarkoittaa täyspeittoa, eli koko mittausalueella on sovellettava systemaattista mittaus tapaa, jolla havaitaan kaikki tietyn kokoiset kohteet alueella. [13. s. 6.]

3.2.3 Bathymetric Coverage eli syvyysmittauksen peitettävyyden

Syvyysmittauksen peitettävyyden on S-44-standardin uusimmissa versioissa esitetty käsite, jonka tarkoitus on paikata mittauslinjojen välisille etäisyyksille asetetut vaatimukset ja tehdä standardista vähemmän riippuvainen teknologiasta. Standardissa syvyysmittauksen peittävyys kuvataan laajuutena, jolla mitattava alue on mitattu systemaattisella tavalla mitata syvyyttä ja se perustuu yhdistelmään mittauskuvioista/mittauslinjasuunnitelmasta ja mittauslaitteiston kuva-alaan. Käytännössä tämän on tarkoitus ohjeistaa mittauslinjojen suunnittelua ja mittauslinjojen peittävyden määrää. Syvyysmittauksen peittävyys ilmaistaan prosenttina. Prosenttiluku on mittausalueen mitattu osuus mitattavasta alueesta. [13, s. 7.]

Prosenttiluku saadaan kertomalla mittaustyön kokonaislinjapituus luotaimen kuva-alan halkaisijalla ja jakamalla tulos mittausalueen pinta-alalla. Monikeilaimella saavutetaan aina vähintään 100 %:n peittävyys, jos linjojen välillä on päällekkäisyyttä. 5 %:n minimi on esitetty standardissa yksikeilaisille luotaimille, joilla saadaan ainoastaan yksi havaintorivi leveän viuhkan sijan. Kuvassa 5 on havainnollistettu luotaimen kuva-ala, jonka perusteella peittävyys lasketaan. [17, s. 7; 16.]



Kuva 5. Kuvassa näkyy harmaana neliönä yhden keilan kuva-ala monikeilaluotauksessa. Tämän perusteella lasketaan syvyysmittauksen peitettävyyttä. Monikeilaluotaimella on kuva-ala koko viuhkan leveydeltä, kun taas yksikeilaisella luotaimella saadaan vain yhden keilan kuva-ala. [18.]

3.2.4 Mittausluokat

S-44-standardissa merenkulun turvallisuuden mittaushankkeille on luotu erilaiset mittausluokat, jotka asettavat minimivaatimukset mittausten tarkkuuksille. Nämä luokat, englanniksi "Orders", ovat Order 2, Order 1b, Order 1a, Special Order ja Exclusive Order. Jokaiselle luokalle on suositeltu sovellettavuus, eli esimerkiksi syvimmillä alueilla, joilla yleispiirteinen kuva merenpohjasta riittää, sovelletaan Order 2 -luokkaa ja alueilla, joilla väylän kulkusyvyys on kriittinen, sovelletaan Special Order -luokkaa. [13, s. 1-2.]

Mittausluokkien kriteerit koostuvat viidestä eri tekijästä. Nämä ovat yleinen kuvaus sovellettavuudesta (millaisella alueella luokkaa sovelletaan), horisontaalinen epätarkkuus (THU), vertikaalinen epätarkkuus (TVU), kohteiden havaitseminen, kohteiden havaitsemisen kattavuus ja syvyysmittauksen peittävyys. Mittausluokat ja niiden kriteerit on esitetty matriisimuodossa, jotta eri kartoitusviranomaiset voi mukauttaa niitä omien tarpeiden ja mittausjärjestelmien teoreettisen tarkkuuden mukaan. Mittaustyö luokitellaan kuitenkin aina sen mukaan, minkä luokan minimivaatimukset se täyttää. Kuvassa 6 on S-44-standardin taulukko, jossa on listattuna mittausten vaatimukset mittausluokkien mukaan. [13, s. 1-2.]

7.3 TABLE 1 - Minimum Bathymetry Standards for Safety of Navigation Hydrographic Surveys

To be read in conjunction with the full text set out in this document, m = metres, all [uncertainties](#) at 95% confidence level, * = Matrix Reference.

TVU: *a* represents that portion of the [uncertainty](#) that does not vary with the depth
b is a coefficient which represents that portion of the [uncertainty](#) that varies with the depth
d is the depth

$$TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$$

Reference	Criteria	Order 2	Order 1b	Order 1a	Special Order	Exclusive Order
Chapter 1	Area description (Generally)	Areas where a general description of the sea floor is considered adequate.	Areas where underkeel clearance is not considered to be an issue for the type of surface shipping expected to transit the area.	Areas where underkeel clearance is considered not to be critical but features of concern to surface shipping may exist.	Areas where underkeel clearance is critical	Areas where there is strict minimum underkeel clearance and manoeuvrability criteria
Section 2.6	Depth THU [m] + [% of Depth]	20 m + 10% of depth *Ba5, Bb2	5 m + 5% of depth *Ba8, Bb3	5 m + 5% of depth *Ba8, Bb3	2 m *Ba9	1 m *Ba10
Section 2.6 Section 3.2 Section 3.2.3	Depth TVU (a) [m] and (b)	a = 1.0 m b = 0.023 *Bc7, Bd4	a = 0.5 m b = 0.013 *Bc8, Bd6	a = 0.5 m b = 0.013 *Bc8, Bd6	a = 0.25 m b = 0.0075 *Bc10, Bd8	a = 0.15 m b = 0.0075 *Bc12, Bd8
Section 3.3	Feature Detection [m] or [% of Depth]	Not Specified	Not Specified	Cubic features > 2 m, in depths down to 40 m; 10% of depth beyond 40 m *Be5, Bf3 beyond 40m	Cubic features > 1 m *Be6	Cubic features > 0.5 m *Be9
Section 3.4	Feature Search [%]	Recommended but Not Required	Recommended but Not Required	100% *Bg9	100% *Bg9	200% *Bg12
Section 3.5	Bathymetric Coverage [%]	5% *Bh3	5% *Bh3	≤ 100% *≤ Bh9	100% *Bh9	200% *Bh12

S-44

October 2022

Edition 6.1.0

Kuva 6. S-44-standardin mitta-alueet ja niiden kriteerit [13, s. 18].

Tutkitaan esimerkkinä Special Order -luokan kriteerejä. Yleisen kuvauksen mukaan tämä luokka on tarkoitettu sovellettavaksi sellaisille alueille, joilla kulku-syvyys aluksille on kriittinen, eli matalakulkuisille väylille. Se mitä tulkitaan matallana, riippuu siitä, minkälaisia aluksia alueella liikkuu. Maksimi sallittu THU, eli havaintojen epävarmuus horisontaalisuunnassa tässä luokassa on kaksi metriä, eli se on kiinteä syvyydestä huolimatta.

Maksimi sallittu TVU määritetään laskukaavan $TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$ mukaan, jossa *a* edustaa sitä osiota epävarmuudesta, joka ei vaihtelee syvyyden perusteella, *b* on se osio epävarmuudesta, joka vaihtelee syvyyden mukaan ja *d* on syvyys. Kertoimet Special Order -luokassa ovat *a*=0.25 ja *b*=0.0075. Esimerkiksi kymmenessä metrissä maksimi sallittu TVU tässä luokassa on 0.26 cm. Tämä tarkoittaa, että oudokit (pisteitä, jotka eroavat muusta syvyydestä eikä tulkita osaksi oikeaa pohjaa), jotka eroavat keskiarvoistusta syvyydspinnasta ±0.26 cm on korjattava tai poistettava aineistosta.

Feature Detection viittaa kohteiden havaitsemiseen, joka tässä luokassa tarkoittaa, että kaikki yli kuution kokoiset kohteet on havaittava. Feature Search eli

kohteiden havaitsemisen kattavuus tarkoittaa, että mittaus pitää suunnitella ja toteuttaa sellaisella tavalla, että kaikki yli metrin kokoiset kohteet havaitaan koko mittausalueella. Bathymetric Coverage eli syvyysmittauksen peittävyys viittaa siihen, että mittausalue on mitattu täyspeittoisesti systemaattisella tavalla. [13, s. 18.]

3.3 FIS44

3.3.1 Yleistä

FIS44 on Suomen kansallinen sovellus S-44-standardista, joka täydentää S-44-standardin vaatimuksia Suomen vesialueilla tehtävissä merenmittaushankkeissa merenkulun turvallisuuden varmistamiseksi [14, s. 5–6].

FIS44-ohjeessa on määritelty Suomen aluevesillä sovellettavat mittausluokat. Suomessa sovelletaan luokkia 1b, 1a, Special Order ja Exclusive Order tietyillä tarkennuksilla. Kuvassa 7 on esitetty FIS44-ohjeen S-44-standardista tarkennetut mittausluokat taulukkomuodossa. [14, s. 5–6.]

		Order 1b	Order 1a	Special order	Exclusive order
Turvallitteet ja merkittävä topografia.	Epävarmuus vaakatasossa (THU)	2.0 m	2.0m	1.0 m	0.5 m
Rantaviiva ja navigointiin vähemmän vaikuttava topografia.	Epävarmuus vaakatasossa (THU)	10 m	10 m	10 m	5.0 m
Syvyys	Epävarmuus vaakatasossa (THU)	5.0 m + 5% syvyydestä	5.0 m + 5% syvyydestä	2 m	1 m
	Epävarmuus pystysuorassa (TVU) $\pm\sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$	a = 0.5 b = 0.013 d = syvyys	a = 0.5 b = 0.013 d = syvyys	a = 0.25 b = 0.0075 d = syvyys	a = 0.15 b = 0.004 d = syvyys
Kohteiden havaitseminen	(m) tai (% of syvyys)	vähintään 2m tai 10% syvyydestä	vähintään 2m tai 10% syvyydestä	> 0.7, > 0.3 tankoharaus	> 0.5, > 0.2 (tankoharaus)
Kohteiden havaitsemisen kattavuus	(%)	Suositus 100%, ei vaadita	100 %	vähintään 100%	200%, tankoharaus vähintään 100 %
Syvyysmittauksen peittävyys	(%)	99 %	100 %	100 %	200%, tankoharaus vähintään 100 %
Sovellettava merialueilla	Väyläalueet Muut alueet	Ei sovelleta Mahdollista 0 - 10m	20 - 100m 0 - 100 m	0 - 20 m -	Harkinnan mukaan Harkinnan mukaan
Sovellettava sisävesillä	Väyläalueet Muut alueet	Ei sovelleta Mahdollista 0 - 10m	12 - 100m 0 - 100 m	0 - 12 m -	Harkinnan mukaan Harkinnan mukaan

Kuva 7. Suomen aluevesillä sovellettavat mittausluokat ja kriteerit [14, s. 7].

Suomessa sovelletaan merenmittauksessa ensisijaisesti Special Order ja Order 1a -luokkia. Order 1b on tarkoitettu merikartoituksen tarpeisiin tehtäville matalien vesialueiden merenmittauksille, esimerkiksi Lidar-mittaukset ja Exclusive

Order on tarkoitettu tankoharauksille alueille, joissa väylän varavesi on pieni.
[14, s. 7.]

3.3.2 Epävarmuustekijät

FIS44 tarkoittaa S-44-standardin suosituksia epävarmuuslaskennoista. FIS44-ohjeen mukaan THU pitää määrittää EUREF-FIN-koordinaattijärjestelmässä ja TVU N2000-korkeusjärjestelmässä. TPU tulee sisältää kaikki epävarmuustekijät syvyyshavaintojen mittauksessa sekä jälkikäsitteilyprosessista. TPU:n laskemiseen pitää käyttää tilastomatemattisia menetelmiä. A priori laskentoja ei hyväksytä TPU:n määrittämiseen. [14, s. 6.]

Käytännössä MBES-järjestelmän toimivuus todistetaan kalibrointituloksilla, testimittauksilla ja paikannustesteillä. Järjestelmän toimivuus voidaan esimerkiksi todistaa mittaamalla tunnettu referenssikohde, jolla on tunnetut koordinaatit vertaamalla mittaustuloksia niihin. [19.]

3.3.3 Kohteiden tunnistus

FIS44 tarkoittaa kohteentunnistuksen rajaa Special Order -luokassa. Yhden kuution kokoisten kohteiden sijaan vaaditaan 0,7 kuution kokoisten kohteiden tunnistamista. Ohjeessa on vaatimuksena, että kaikki vedenalaiset kohteet, mukaan lukien hylät on mitattava siten, että mittaustuokkien vaatimukset sijainnin ja matalimman syvyyden osalta täyttyvät. [14, s. 7.]

3.4 Operointikäsikirja

Operointikäsikirja on Meritaidon ja asiakkaan välinen sovittu dokumentti, joka sisältää toimintaperiaatteet, prosessit, mittausympäristön kuvauksen, vaatimukset ja kalustot sekä ohjelmistot projektikohtaisesti. Operointikäsikirjan tarkoitus on mahdollistaa projektin mittaamisen niin, että se täyttää S-44- ja FIS44-standardien ja asiakkaan muut vaatimukset. [19.]

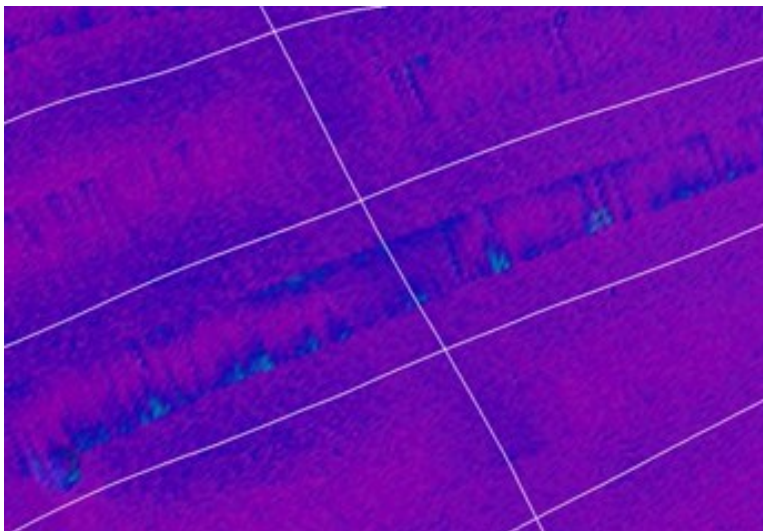
4 Aineistonkäsittely

4.1 Yleistä

Aineistonkäsittelyllä tarkoitetaan mitatun syvyyspisteaineiston käsittelyä erillisellä käsittelypisteellä mittauksen aikana tai mittauksen jälkeen. Aineistonkäsittelyssä tärkeää on laadunvalvonta, korjausten lisääminen dataan (esimerkiksi vedenkorkeuden korjaus) ja oudokkien poisto datasta, jotta se täyttää spesifikaation kriteerit. [19.]

4.2 Laadunvalvonta

Laadunvalvonnalla varmistetaan, että syvyyspisteaineisto ei ylitä teknisten spesifikaation asettamat virhebudjetit (THU ja TVU). Tämä tehdään tarkastamalla mittauslinjojen välisiä päällekkäisyyksiä. Tietyillä värikartoilla pystytään tarkistamaan mittauslinjojen välisiä tasoeroja 95 %:n luottamustasolla. Sallittu tasoero on mittausluokissa määrätyt TVU-maksimi arvot. Mikäli virhebudjetit ylittyvät, on tehtävä korjaavia toimenpiteitä. Nämä ovat esimerkiksi mittauslinjojen kaventaminen, mikäli päällekkäisyyttä on ylimääräistä, äänennopeusprofiilin vaihtaminen ja sovittaminen, paikannuksen laskeminen jälkikäteen ja viime kädessä alueen paikkaaminen paikkausmittauksilla. Mittauslinjojen päällekkäisyyksiä tutkitaan visuaalisesti värikartalla, joka värjää keskiarvoistetusta syvyyspinnasta eroavat havainnot. Kuvassa 8 on ote keskiarvoistetusta syvyyspinnasta, jonka avulla suoritetaan laadunvalvontaa. Kuvan esimerkissä on noin 20 metriä syvää. Vaaleansiniset kohdat eroavat keskiarvoisesta syvyydestä noin 20 cm, eli mittaus on virhebudjetin sisällä. Valkoiset viivat ovat mittauslinjojen nadiirissa. [19.]



Kuva 8. Syvyystietoaineistosta luotu pinta, joka on värjätty epävarmuuden mukaan [6].

Istuvuustarkastelun lisäksi on tarkistettava aineisto reikien ja puutteellisen pisteitiheyden varalta. Rei'iksi tulkitaan sellaiset kohdat, missä päällekkäisyys linjojen välillä katoaa. Reikiä syntyy usein alueilla, joilla syvyys on vaihtelevaa. Jos esimerkiksi ajetaan pienellä avautumiskulmalla luotaimessa syvässä vedessä ja vastaan tulee jyrkkä rinne tai muu nousu, päällekkäisyys kapenee, jos luotaimen avauskulmaa ei levennetä. Kaikki tällaiset reiät on paikattava paikkauslinjoilla. [19.]

Pisteitiheydellä tarkoitetaan, että tietyinkokoisessa ruudussa täytyy olla tietty määrä syvyyshavaintoja. Ruutukoko vaihtelee syvyyden mukaan, ja siihen tulee aina mahtua viisi syvyyshavaintoa. Pisteitiheys tarkastetaan Arctia Meritaidon omilla värikartoilla käsittelyohjelmistossa. Puutteellinen pisteitiheys edellyttää paikkaamista paikkauslinjoilla. Kuvassa 9 on ote pinnasta, joka on värjätty pisteitiheyden mukaan, jota käytetään päällekkäisyyden varmistamisessa. Linjojen välissä värjäytyy päällekkäisyys istuvuudesta riippumatta. Jos päällekkäisyys häviää jossain kohdassa, sitä tulkitaan reikänä syvyyspisteaineistossa. [19.]



Kuva 9. Mittauslinjojen päällekkäisyyttä voidaan tarkistaa pistetiheys värjäyksellä, jolla näkee missä on päällekkäisyyttä linjojen istuvuudesta riippumatta. [6].

4.3 Syvyyspisteaineistoon tehtävät korjaukset

4.3.1 Vedenkorkeus

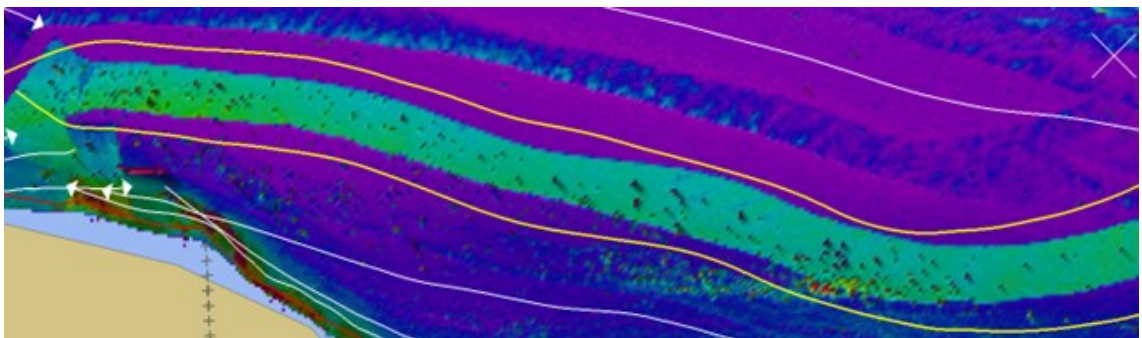
Tarkka vedenkorkeus joudutaan korjaamaan syvyyspisteaineiston jälkikäsitelyssä. Vedenkorkeus voidaan korjata dataan joko tarkalla paikannuksen jälkilaskennalla tai keräämällä havaintoja vedenkorkeudesta anturilla tunnetulla pisteellä. [20.]

Suomen aluevesillä navigointiturvallisuuden parantamista varten tehtävät merenmittaukset sidotaan FIS44-ohjeen mukaan N2000-korkeusvertausjärjestelmään. Tämä saavutetaan korjaamalla mitattujen syvyyshavaintojen korkeudet erikseen mitatuilla vedenkorkeushavainnoilla tunnetulla pistellä mahdollisimman lähellä mittausaluetta. Havainnot tuodaan jälkikäsitelyohjelmistoon taulukkomuodossa aikaleimalla, jolloin saadaan oikea vedenkorkeus oikeaan aikaan. [20.]

Ilmatieteen laitos seuraa vedenkorkeutta havaintoasemilla Suomen rannikolla. Vedenkorkeuden havaintoja voidaan ladata Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta taulukko muodossa aikaleimoilla, joita voidaan käyttää vedenkorkeuden korjaamiseen. Kuvassa 10 on Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta ladattu vedenkorkeustaulukko. Taulukosta ilmenee vedenkorkeus N2000-järjestelmässä minuutin välein. Kuvassa 11 on esimerkki linjasta, johon ei ole kohdistettu vedenkorkeutta. Linja erottuu selkeästi muusta aineistosta, kun pinta värjätään syvyyspisteaineiston epävarmuuden mukaan. [20.]

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Havainto Vuosi	Kuukausi	Päivä	Aika [UTC; N2000-järjestelmässä [mm]				
2	Helsinki K; 2023	12	07	00:00	66			
3	Helsinki K; 2023	12	07	00:01	66			
4	Helsinki K; 2023	12	07	00:02	67			
5	Helsinki K; 2023	12	07	00:03	67			
6	Helsinki K; 2023	12	07	00:04	67			
7	Helsinki K; 2023	12	07	00:05	67			
8	Helsinki K; 2023	12	07	00:06	67			
9	Helsinki K; 2023	12	07	00:07	67			
10	Helsinki K; 2023	12	07	00:08	67			
11	Helsinki K; 2023	12	07	00:09	67			
12	Helsinki K; 2023	12	07	00:10	66			
13	Helsinki K; 2023	12	07	00:11	66			
14	Helsinki K; 2023	12	07	00:12	66			
15	Helsinki K; 2023	12	07	00:13	66			
16	Helsinki K; 2023	12	07	00:14	67			
17	Helsinki K; 2023	12	07	00:15	68			
18	Helsinki K; 2023	12	07	00:16	68			
19	Helsinki K; 2023	12	07	00:17	69			
20	Helsinki K; 2023	12	07	00:18	69			
21	Helsinki K; 2023	12	07	00:19	68			
22	Helsinki K; 2023	12	07	00:20	68			
23	Helsinki K; 2023	12	07	00:21	68			
24	Helsinki K; 2023	12	07	00:22	68			
25	Helsinki K; 2023	12	07	00:23	68			
26	Helsinki K; 2023	12	07	00:24	67			
27	Helsinki K; 2023	12	07	00:25	67			

Kuva 10. Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta ladattu vedenkorkeustaulukko [20].



Kuva 11. Esimerkki vedenkorkeushäiriöstä syvyystietoaineistossa. Vihreässä päällekkäisyydessä ero mittauslinjoilla on noin 30 cm korkeussuunnassa. Linjat on mitattu eri päivinä, ja toiseen niistä on korjattu vedenkorkeus. Vedenkorkeus ilmenee aineistossa yleisesti tasaisena ja koko linjan pituudelta. [6.]

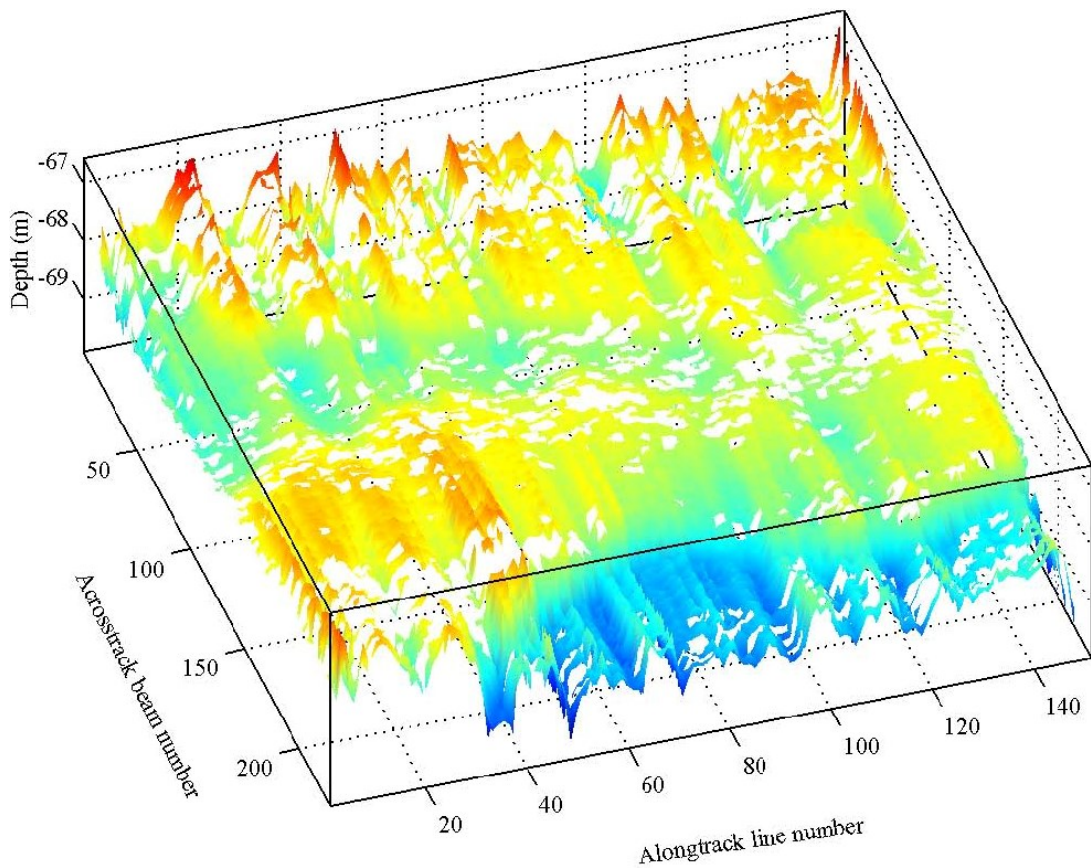
4.3.2 Aluksen liikkeiden korjaukset

Merenmittauksessa on otettava huomioon aluksen liikkeet vedessä. Kovassa aallokossa liikkeillä voi olla iso vaikutus syvyystietoaineiston laatuun. Tarkka paikannus yhdistettynä liikesensorien kanssa mahdollistavat mittauksen myös tuulisissa ja aaltoisissa olosuhteissa. [21, s. 17.]

Syvyystietoaineistoon vaikuttaa erityisesti roll-, pitch- ja heave-artefaktit. Roll viittaa aluksen liikkeisiin sivusuunnassa pituussuuntaisella akselilla, eli aluksen kallistuminen tyyrpuurissa sekä paapuurissa. Pitch on aluksen liikkeet pystysuunnassa, eli keulan ja perän nousu sekä lasku. Pitch-arvot ovat positiivisia, kun keula nousee ja perä laskee. Heave viittaa myös aluksen kohoiluun. Se eroaa pitchistä siten, että se on tasainen ero, eikä se ole sidottuna aluksen painopisteeseen. [21, s. 17.]

Vaihteleva merenkäynti lisää huomattavasti heave-häiriöitä syvyystietoaineistossa, ja voi aiheuttaa ongelmia liikesensoreille. Trimble Applanix on kehittänyt tätä varten TrueHeave-tekniikan heidän POS MV paikannusjärjestelmäänsä. TrueHeave-laskualgoritmi käyttää aiempia ja nykyisiä pystysuoria liiketietoja laskeakseen tarkemman heave-arvion. Tämä sallii mittauksen myös isomassa aallokossa. [22.]

Kuvassa 12 on esimerkki aineistosta, jossa on heave-liikkeistä johtuvia artefakteja. Aluksen liikkeet näkyvät toistuvina korkeuseroina tasaisella pohjalla. [23, s. 4.]



Kuva 12. Esimerkki heave-häiriöstä [23, s. 4].

4.3.3 Äänennopeus

Syvyystiedot saadaan laskemalla se aika, jossa kaikusignaali lähtee luotaimen anturista, osuu pohjaan ja palaa takaisin anturiin. Jotta saadaan tarkkoja tuloksia, on tärkeä tietää äänennopeus vesipatsaassa. [4.]

Äänennopeus vedessä on keskimäärin noin 1500 m/s, mutta tämä arvio vaihtelee paljon. Äänennopeuteen vaikuttavat veden lämpötila, suolapitoisuus ja paine. Kun jokin näistä kasvaa, äänennopeus kasvaa. Koska veden ominaisuudet ovat erilaiset eri syvyyksissä, on myös äänennopeus vaihteleva syvyyden mukaan. Normaaliolosuhteissa äänennopeus on nopein pintavedessä, jossa vesi on lämpimillään. [24.] Äänennopeus saavuttaa maksimin pintaveden ja pohjaveden välillä harppauskerroksessa, jota kutsutaan termokliiniksi. Harppauskerros on se kohta vesipatsaassa, jossa jokin ominaisuus muuttuu

huomattavasti. Termokliini on harppauskerros, jossa vedenlämpötila muuttuu huomattavasti. Lämmin ja kylmä vesi ei sekoitu, joten vesipatsaaseen syntyy huomattava raja. Kun syvyys kasvaa äänennopeus kiihtyy taas, kun suolapitoisuus ja paine kasvaa. Suolapitoisuus tuottaa termokliinin tapaisen harppauskerroksen, jota kutsutaan halokliiniksi, sillä suolapitoisempi vesi on tiheämpää kun makeampi vesi, eli vesipatsas kerrostuu lämpötilan ja suolapitoisuuden mukaan. Paine ei aiheuta harppauskerrosta, sillä paine kasvaa lineaarisesti syvyyden mukaan. [25; 26.]

Äänennopeutta mitataan vesipatsaassa anturilla, joka mittaa nopeuden tietyn välimatkoin vesipatsaassa. Tuloksena saadaan äänennopeusprofiili, englanniksi SVP tai Sound Velocity Profile, josta selviää äänennopeuden jokaisen havainnon kohdalta. Profiilia voidaan tulkita käyränä, josta ilmenee selkeästi harppauskerrokset. Profiililla korjataan monikeilalla tuotetut syvyystietoaineistot, jotta saadaan tarkka syvyys. Äänennopeusprofiilin toimivuutta valvotaan vertaamalla sitä reaaliaikaiseen pinta-anturiin, joka mittaa äänennopeutta aluksen pohjassa. Viimeistään kun profiilin ja pinta-anturin ero ylittää tietyn arvon, on otettava uusi äänennopeusprofiili. Kuvassa 13 on esimerkki Valeportin SVP-anturista. Anturi lasketaan veteen melkein pohjaan asti vinssin avulla. [19.]



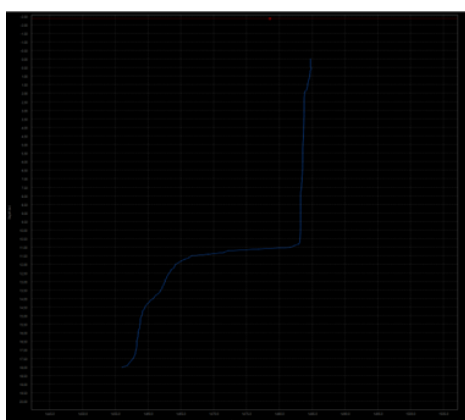
Kuva 13. Valeportin valmistama SVP-anturi [27].

Suomen vesialueilla veden lämpötilalla on suurin vaikutus merenmittaukseen. Parhaat olosuhteet ovat alkukeväällä, kun jää on sulanut tai syksyllä, kun vesi on viilentynyt ja sekoittunut, sillä lämpötila ja sen myötä myös äänennopeus on lähes sama koko vesipatsaassa.

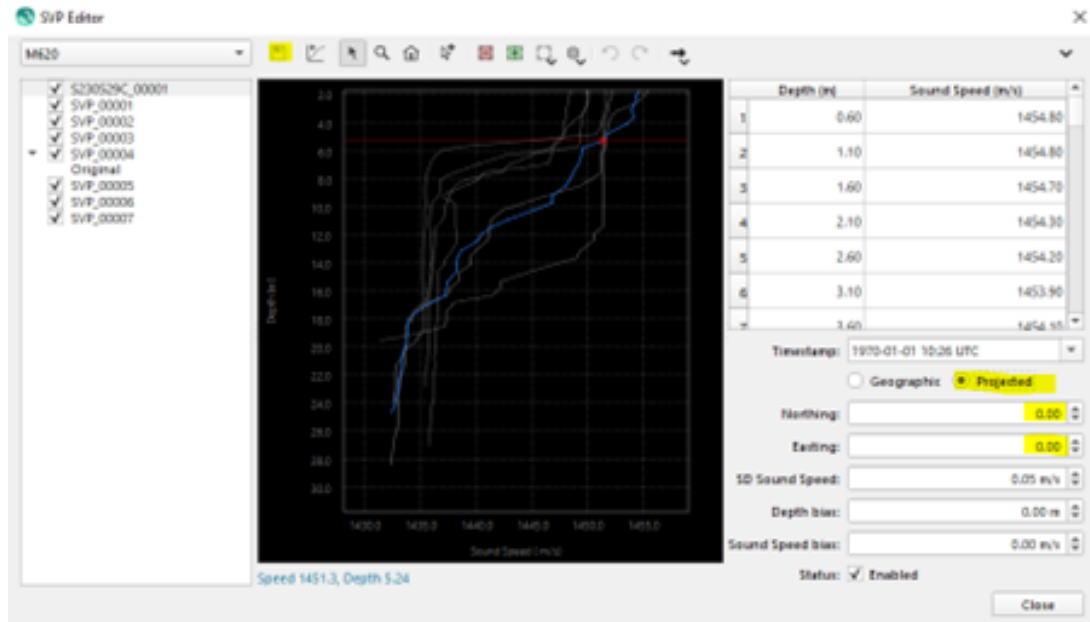
Termokliini voi olla hyvin vahva vuoden ajasta ja olosuhteista riippuen. Esimerkiksi myöhäisellä keväällä tai alkukesällä helteisillä ja tyyneillä päivillä pintaveden ylin kerros lämpenee paljon. Tämä luo alueita mittausalueella, joissa ylimmän vedenkerroksen lämpötila vaihtelee paljon. Tällaisilla olosuhteilla on tärkeä seurata profiilin toimivuutta aineistossa ja mitattava tarpeen mukaan useampia profiileja. Ajolinjavälejä voi olla myös hyödyllistä kaventaa, sillä huono äänennopeusprofiili lisää epävarmuutta mittausviuhkojen äärikulmissa, joissa kaikusignaali on kulkenut pidemmän matkan.

Aineiston jälkikäsitelyssä voidaan vaihtaa äänennopeusprofiileja ja kokeilla mikä toimii parhaiten missäkin kohtaa aluetta. Profiilien toimivuutta tarkkaillaan 95 %:n luottamustason värikartalla, jolla nähdään syvyyspisteaineiston epävarmuustaso.

Termokliini asettuu lopulta kesällä noin 10–20 metrin syvyyteen. Kuvassa 14 on esimerkki SVP-käyrästä, jossa erottuu termokliini noin yhdentoista metrin syvyydessä. Kuvassa 15 on esitetty useampi SVP, jotka ovat mitattu samalta mittausalueella ja havainnollistaa äänennopeuden eroja vedessä. [25; 26.]

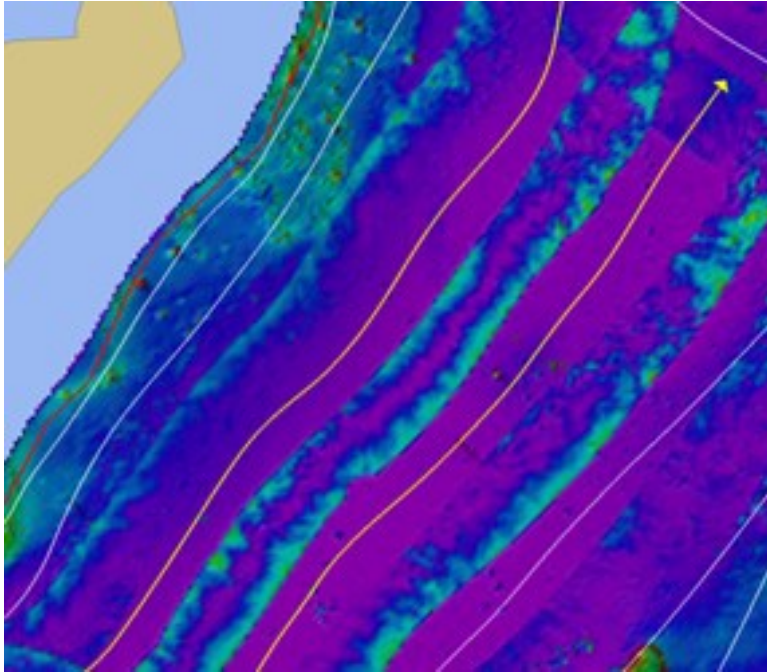


Kuva 14. SVP-käyrä matalassa vedessä. [6.]

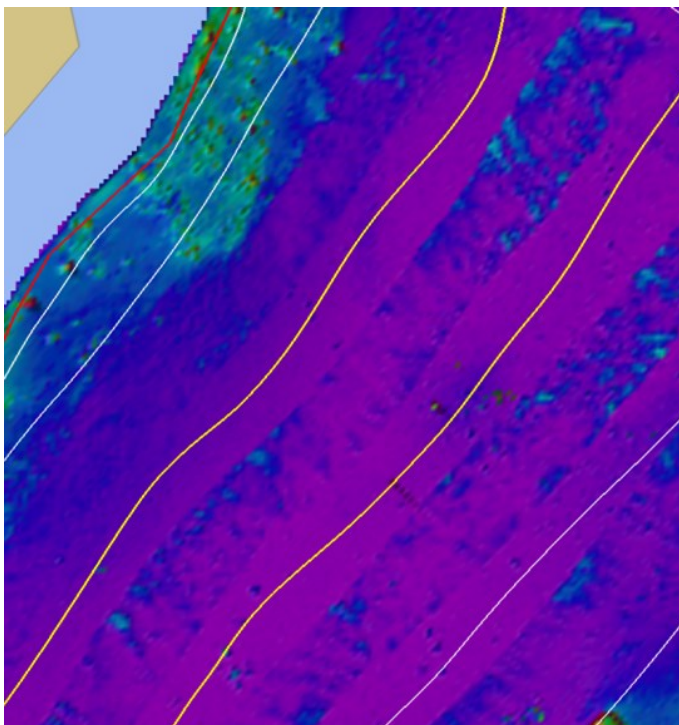


Kuva 15. SVP-näytteitä otetaan useampi joka mittauspäivä. Esimerkissä näkee selkeitä eroavuuksia äänennopeudessa mittausalueella eri profiileissa. [6.]

Kuvat 16 ja 17 ovat esimerkkejä tapauksesta, jossa SVP-profiilin vaihto mittauslinjoilla tuotti tarkemman lopputuloksen. Profiileja joudutaan joskus vaihtamaan, sillä profiili, joka on otettu paikasta, jossa on paikallisesti hyvin erilaiset äänennopeusolosuhteet voi olla epätarkka laajemmalla mittausalueella. Kuvassa 16 mittauslinjan reunat värjäytyvät turkoosiksi, mikä tarkoittaa, että viuhkojen äärikulmat eroavat muusta pohjasta noin 20–30 cm, eli sallittu virhebudjetti saattaa ylittyä. Kuvassa 17 SVP on vaihdettu ja epävarmuus on saatu hyväksyttävälle tasolle. [19.]

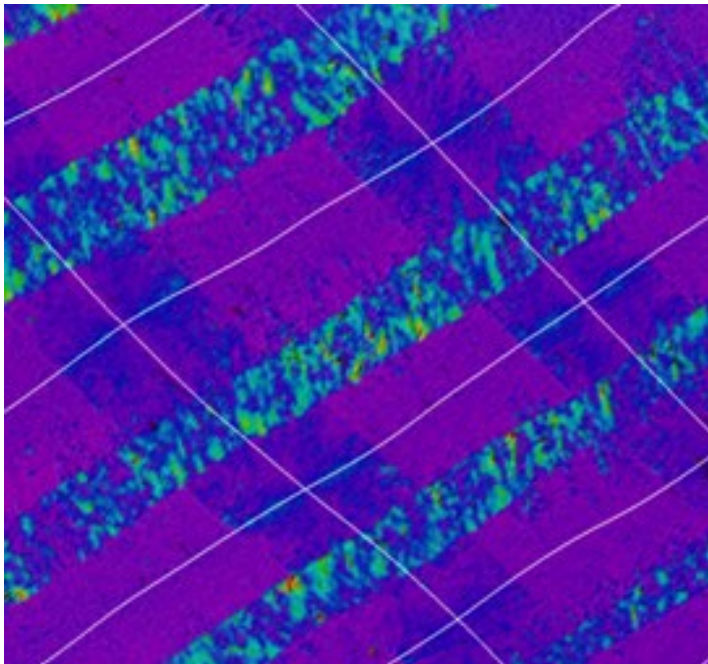


Kuva 16. SVP aiheuttaa tässä esimerkissä epätarkkuutta mittauslinjojen reunoissa. Reunat eroavat muusta pohjasta noin 20–30 cm. [6.]

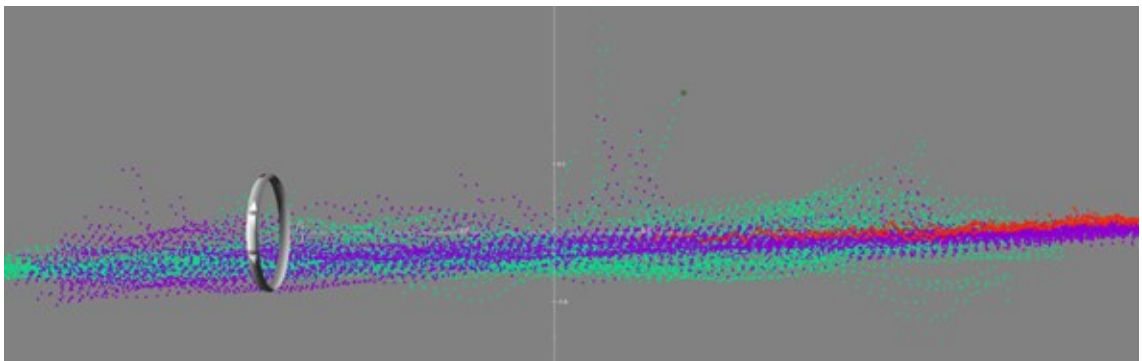


Kuva 17. Sama alue SVP-sovittelun jälkeen. Kuvassa 17 mittauslinjojen reunat ylittävät TVU-budjetin, mutta SVP-vaihdon jälkeen linjat ovat sallitussa virhebudjetissa. [6.]

Kuvat 18 ja 19 ovat esimerkkejä haastavasta SVP-olosuhteesta. Harppauskerrokset voivat aiheuttaa mittauslinjojen päällekkäisyydessä epätarkkaa tietoa, joka näkyy mittausviuhkojen päädyissä epäsäännöllisenä kohoiluna kuvassa 18. Kuvassa 19 on kuvan 18 keskimmäisten linjojen päällekkäisyys 3D-pistenäkymässä. Haastavissa SVP-olosuhteissa epätarkkuus mittauslinjojen reunoissa voi selkeästi ylittää virhebudjetin. SVP-häiriö eroaa selkeästi vedenkorkeushäiriöstä siten, että se ei ole tasainen tasoero koko linjan pituisesti. [19].



Kuva 18. Epätarkkuutta mittauslinjojen päällekkäisyydessä. Pinta on värjätty mittaushavaintojen epävarmuuden mukaan. [6.]



Kuva 19. Kuvan 18 mittauslinjojen päällekkäisyys tutkittuna 3D-pistenäkymässä. [6.]

4.3.4 Virrehavaintojen poistaminen syvyyspisteaineistosta

Mitattuun aineistoon jää usein virrehavaintoja tai harhakaikuja riippuen olosuhteista ja pohjan ominaisuuksista. Esimerkiksi kalliot, kasvillisuus, kalaparvet, verkot ja muut esineet aiheuttavat harhakaikuja aineistossa. Myös äärikulmissa, joissa epävarmuus kasvaa on mahdollista, että sallittu virhebudjetti on ylittynyt, jolloin on tehtävä korjauksia. Tämän lisäksi aineistosta poistetaan kaikki esineet, jotka eivät ole pysyvä osa merenpohjaa, esimerkiksi ponttoonilaitureiden rakenteet ja pojujen ketjut. [19.]

Tämä työvaihe tehdään suurimmaksi osaksi manuaalisesti poistamalla virhepisteitä aineistosta käsittelyohjelmassa. Tavoitteena on poistaa kaikki virrehavainnot, jotka ylittävät sallitun virhebudjetin. Aineistoa tutkitaan keskihajontaa kuvaavalla värikartalla ja minimi-maksimi-erotuspinnalla, joilla erottaa oudokit syvyyspisteaineistosta. [19.]

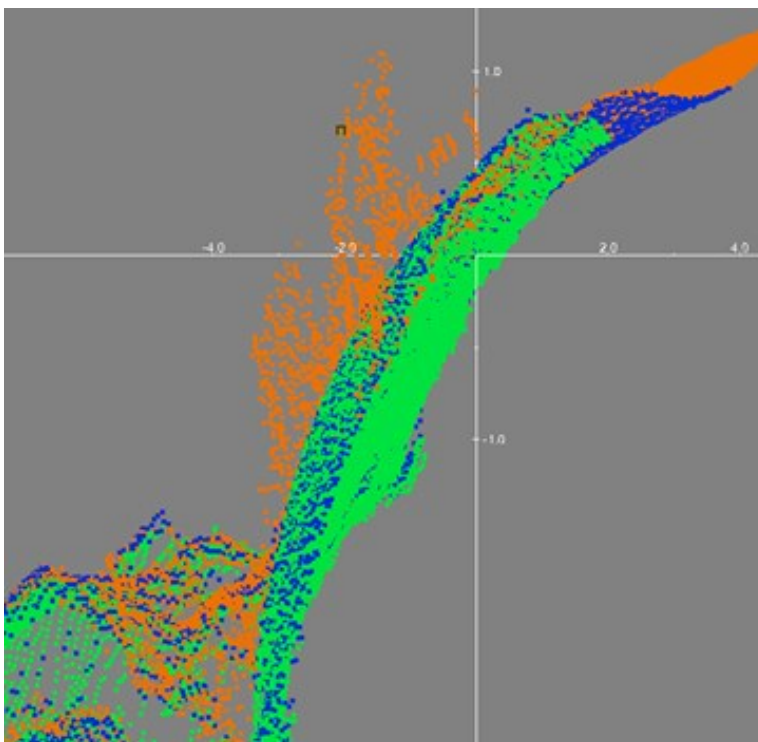
Systemaattiset virheet, jotka esiintyvät samoissa kohdissa, kuten esimerkiksi SVP:n aiheuttamat epävarmuudet mittausviuhkojen äärikulmissa voidaan poistaa käsittelyohjelman filtteritoiminnoilla. Filtereillä pystytään myös harventamaan aineistoa, jos sitä on kerätty liikaa ja on moninkertaista päällekkäisyyttä. Käytössä ovat esimerkiksi Sector- ja Range-filtterit. Sector-filtterillä pystytään leikkaamaan mittauslinjoja rajoittamalla luotaimen avauskulmaa. Rajaamalla kulmia pienemmäksi saadaan hylättyä virheelliset pisteet äärikulmissa. Jo kaivantamalla linjoja muutamallakin asteella voi olla iso vaikutus aineiston laatuun. Range-filtteri hylkää pisteitä etäisyyden perusteella luotaimesta. Tämä tarkoittaa, että filtteritoiminto säilyttää pisteitä kohtisuoraan luotaimen alla ja hylkää pisteitä äärikulmissa, joissa kaikusignaali on kulkenut pidemmän matkan. [19.]

Yhdistämällä sopivat Sector- ja Range-asetukset, äärikulmia leikataan ikään kuin kahdessa tasossa. Matalammassa vedessä Sector-filtteri leikkaa mittauslinjaa kulman perusteella ja syvemmissä vedessä Range-filtteri leikkaa mittauslinjaa havaintojen etäisyyden perusteella. Tämä metodi sopeutuu hyvin

matalikkoihin, joissa halutaan enemmän havaintoja matalaa puolta päin ja vähemmän havaintoja ja päällekkäisyyttä syvempää puolta päin. [19.]

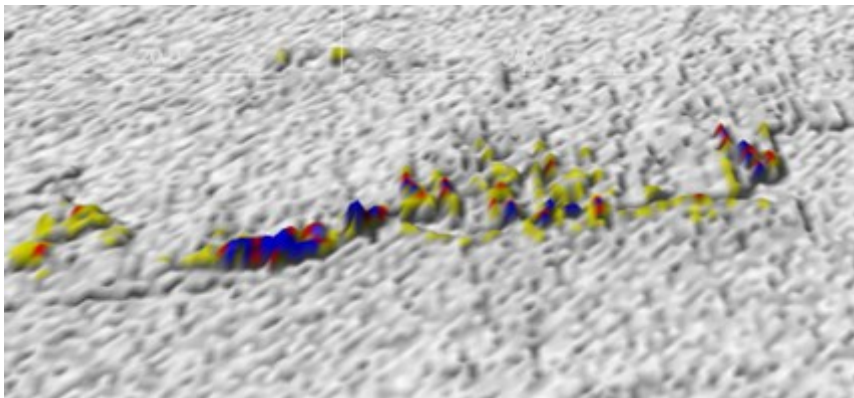
Kun virheellisiä havaintoja leikataan mittauslinjojen reunoista pitää olla tarkkana siitä, että tarpeellinen päällekkäisyys säilyy. Pisteaineisto saattaa näyttää hyvältä ja virheettömältä jos päällekkäisyys on leikattu hyvin kapeaksi, mutta jos sitä ei ole tarpeeksi paljon, linjojen istuvuutta keskenään ei pysty arvioimaan, jolloin aineisto itsessään on epäluotettavaa. Tämän takia on jo mittausvaiheessa tärkeä tehdä tarpeelliset SVP-muutokset ja varmistaa linjojen istuvuus keskenään riittävällä päällekkäisyydellä. [19.]

Kuvassa 20 on esimerkki kalliosta merenpohjassa, joka on aiheuttanut harhakaijuja. 3D-pistenäkymästä voi havaita, että oranssit pisteet eroavat selkeästi muusta pohjasta. Pisteet ovat värjätty mittauslinjojen mukaan. [19.]

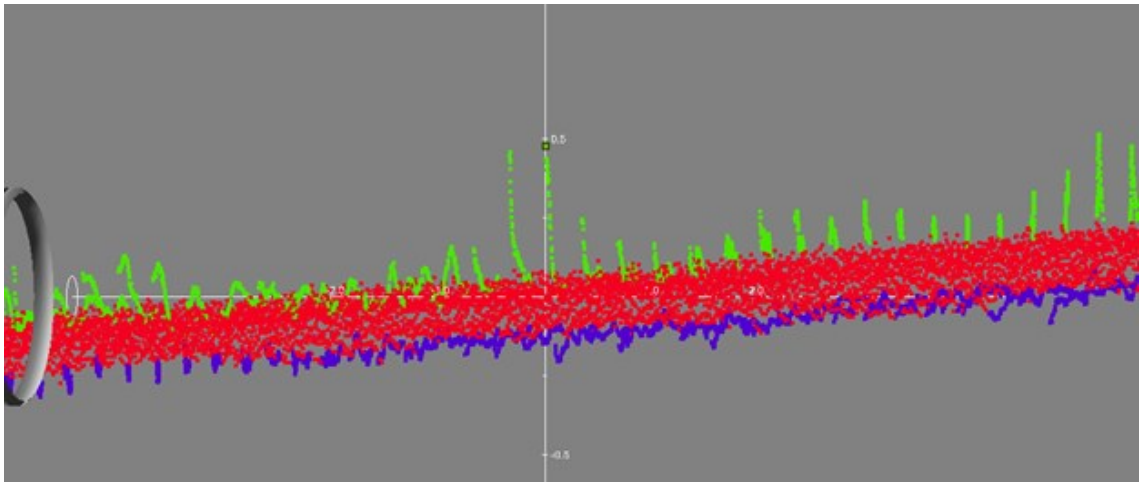


Kuva 20. Esimerkki harhakaijuista kalliosta. [6.]

Kuvat 21 ja 22 ovat esimerkkejä minimi-maksimi-pinta tarkastelusta. Minimimaksimi-pinnat värjäävät syvyyspisteaineiston matalimman ja syvimmän pistehavainnon korkeuseron mukaan. Tällä tavalla voidaan huomata oudokit, jotka eroavat tietyllä korkeudella muusta keskiarvoistetusta pinnasta. Kuvassa 21 on esimerkki minimi-maksimi-pinnasta, jossa keltaiset, punaiset ja siniset alueet ylittävät sallitun virhebudjetin. Kuvassa 22 on sama alue 3D-pistenäkymässä, josta voi mitata, että vihreät pisteet eroavat korkeimmillaan muusta pinnasta noin 50 cm [19].



Kuva 21. Minimimaksimi-pinta [6].



Kuva 22. Alue avattuna 3D-pistenäkymässä, kuvakulma pinnan keskileikkauksesta. [6.]

Kun syvyyspisteaineisto on tarkastettu ja täyttää kaikki standardien vaatimukset, voidaan se todeta valmiiksi käsittelyksi. Käsittelyn jälkeen aineistosta luodaan lopputuotteet tilaajalle sopimuksen mukaan. [19].

5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli selventää toimeksiantajan monikeilainaineiston aineistonkäsittelyprosessia. Työ alkoi arvioimalla vuoden 2023 mittaustulokset ja voimassa olevat ohjeistukset. Mittaustulosten ja ohjeistuksen perusteella todettiin tarpeelliseksi päivittää toimeksiantajan aineistonkäsittelyohjeita. Aineistonkäsittelyprosessin selventämiseksi luotiin uusi laadunvarmistuskäsikirja. Julkinen osuus työstä laadittiin tueksi ohjeistukselle, kuvailemalla aineistonkäsittelyprosessia yleisellä tasolla, ja antamalla lisäkontekstia selostamalla standardeja, jotka ohjeistavat merenmittaustoimintaa.

Laadunvarmistuskäsikirjasta tuli yli 200-sivuinen dokumentti, jonka tarkoitus on varmistaa, että työvaiheet ovat selkeitä ja että käsittelyprosessi saadaan standardoitua kaikille, jotka työskentelevät aineistonkäsittelyn parissa.

Laadunvarmistuskäsikirja on elävä dokumentti, jota on jatkuvasti päivitettävä, sillä vaatimukset ja toimintatavat muuttuvat jatkuvasti. Kun työtä tehdään, voidaan myös löytää uusia tehokkaampia toimintatapoja, jotka voi olla hyödyllisiä dokumentoita.

Laadunvarmistuskäsikirja ei yksin takaa hyvää aineistonlaatua, vaan se on osa isompaa kokonaisuutta, johon kuuluu muu dokumentaatio, kuten esimerkiksi operointikäsikirja, joka on hankekohtainen ja voi sisältää myös erityisiä huomioita aineistonkäsittelystä. Aineistonkäsittelijöiden riittävä perehdyttäminen on myös keskeisessä asemassa, ja laadunvarmistuskäsikirjan yhtenä keskeisenä tarkoituksena on helpottaa perehdytysprosessia.

Lähteet

- 1 Merenmittaus. Verkkoaineisto. Arctia Oy. <<https://www.arctia.fi/palvelut/merenmittaus-ja-tutkimus/merenmittaus.html>>. Luettu 24.2.2024.
- 2 Hydrographic Surveying – Methods, Applications and uses. 2021. Verkkoaineisto. The Constructor. <<https://theconstructor.org/surveying/hydrographic-surveying-methods-uses/13838/>>. Luettu 24.2.2024.
- 3 History of Hydrographic Surveying. Verkkoaineisto. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. <<https://nauticalcharts.noaa.gov/learn/history-of-hydrographic-surveying.html>>. Luettu 2.3.2024.
- 4 Multibeam Sonar. Verkkoaineisto. NOAA Ocean Exploration <<https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar/multibeam.html>>. Luettu 2.3.2024.
- 5 NOAA Photo Library. 2016. Verkkoaineisto. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. <<https://www.flickr.com/photos/noaaphotolib/27555144884/>>. 8.7.2016. Luettu 3.3.2024.
- 6 Kuvakaappaus merenmittausaineistosta. 2023. Yrityksen sisäinen aineisto. Arctia Meritaito Oy.
- 7 Applanix POS MV OceanMaster. 2023. Verkkoaineisto. Trimble Applanix. <<https://www.applanix.com/downloads/products/specs/posmv/POS-MV-OceanMaster.pdf>>. Luettu 21.3.2024.
- 8 RTK GPS: Understanding Real-Time Kinematic GPS Technology. 2024. Verkkoaineisto. Global GPS Systems. <<https://globalgpssystem.com/gnss/rtk-gps-understanding-real-time-kinematic-gps-technology/>>. Luettu 21.3.2024.
- 9 Thirsk, Robert. 2023. An Introduction to GNSS. E-kirja. Hexagon. <<https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/resolving-errors/rtk>>. Luettu 21.3.2024.
- 10 What is an Inertial Measurement Unit. 2024. Verkkoaineisto. Vectornav. <<https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-articles/what-is-an-inertial-measurement-unit-imu>>. Luettu 21.3.2024.

- 11 Beyond the Wow: The Six Types of Ship Motion. 2024. Verkkoaineisto. Nautilus Live Ocean Exploration Trust. <<https://nautiluslive.org/video/2020/12/09/beyond-wow-six-types-ship-motion>>. Luettu 21.3.2024.
- 12 What are the "6 Degrees of Freedom"? 2024. Verkkoaineisto. Industrial Inspection & Analysis. <<https://industrial-ia.com/what-are-the-6-degrees-of-freedom-6dof-explained/>>. Luettu 21.3.2024.
- 13 S-44 Edition 6.1.0. 2020. Standards for Hydrographic Surveying. International Hydrographic Organization. Luettu 3.3.2024.
- 14 FIS44/2021. Suomen kansallinen merenmittaussovellus FIS44/2021 ohje. Liikenne- ja viestintävirasto. Luettu 4.3.2024.
- 15 Kristensen, Ole. 2017. How NaviModel handles theoretical uncertainty of subsea sensor spreads. Verkkoaineisto. Eiva. <<https://www.eiva.com/about/eiva-log/how-navimodel-handles-theoretical-uncertainty-of-subsea-sensor-spreads>>. Luettu 15.3.2024.
- 16 Hydrographic Survey Management Guidelines. 2021. Verkkoaineisto. Canadian Hydrographic Survey. <<https://www.charts.gc.ca/data-gestion/guidelines-directrices/index-eng.html>>. 10.3.2021. Luettu 21.3.2024.
- 17 Iain Slade. 2021. South West region online talk: S-44 IHO Standards for Hydrographic Surveys 6th Edition by Iain Slade. Verkkoaineisto. The Hydrographic Society UK & Ireland <<https://www.youtube.com/watch?v=ct9GlustW2I&t=3326s>>. Katsottu 4.3.2024.
- 18 Holm, Sverre; Rønhovde, Are; Taxt, Torfinn; Yang, Luren. 1999. High-resolution beamforming for multibeam echosounders using EM3000 data. Tutkimusraportti. OCEANS '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century – Volume 2.
- 19 Aineistonkäsittelyohjeet. 2023. Yrityksen sisäinen aineisto. Arctia Meritaito Oy. Luettu 1.3.2024.
- 20 Havaintojen lataus. Verkkosivu. Ilmatieteenlaitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>>. Luettu 9.3.2024.
- 21 Wallinmaa, Ville. 2010. Matalataajuusluotausaineiston yhdistäminen monikeilainaineistoon Fledermaus-ohjelmalla. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 22 Fugro Pelagos. 2024. Verkkoaineisto. Trimble Applanix. <<https://www.applanix.com/news/posmv-hydrographic-survey-fugro/>>. Luettu 10.3.2024.
- 23 Crawford, Anna M. 2003. Removing Roll and Heave Artifacts from High-Resolution Multibeam Bathymetric Data. Technical Memorandum. Defence Research and Development Canada.
- 24 Understanding Ocean Acoustics. Verkkoaineisto. 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. <<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/sound01/background/acoustics/acoustics.html>>. 26.8.2022. Luettu 9.3.2024.
- 25 Itämeren lämpötilaan, suolaisuuteen ja kerrostuneisuuteen vaikuttavat monet tekijät. 2020. Verkkoaineisto. Itämeri.fi-sivusto. <https://itameri.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Ainutlaatuinen_Itameri/Suolaisuus_lampotila_ja_kerrostuneisuus>. Luettu 9.3.2024.
- 26 Pintaveden vaihteleva lämpötila. 2021. Verkkoaineisto. Vesi.fi. <<https://www.vesi.fi/vesitieto/pintaveden-vaihteleva-lampotila/>>. Luettu 9.3.2024.
- 27 rapidPro SVT. Verkkoaineisto. Valeport. <<https://www.valeport.co.uk/products/rapidpro-svt/>>. Luettu 9.3.2024.