

Henri Lahtinen

Leica Nova MS50:n laserkeilausominaisuuden hyödyntäminen telakkateollisuudessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

23.4.2014

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Henri Lahtinen Leica Nova MS50:n laserkeilausominaisuuden hyödyntäminen telakkateollisuudessa</p> <p>48 sivua + 4 liitettä 23.4.2014</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>insinööri (AMK)</p>
<p>Tutkinto-ohjelma</p>	<p>maanmittaustekniikka</p>
<p>Ohjaajat</p>	<p>mittausinsinööri Marko Reijonen lehtori Jussi Laari</p>
<p>Työssä perehdytään Leica Geosystems:n vuoden 2013 kesällä julkaisemaan Nova-sarjaan kuuluvaan MS50-mittalaitteeseen sekä erityisesti sen laserkeilausominaisuuteen. Turun telakan mittausosastolla oltiin kiinnostuneita uudesta laitteesta ja sen tarjoamasta keilausmahdollisuudesta, jota telakalla nykyisin käytössä olevissa perinteisissä takymetreissä ei ole, laitteen sopiessa tarkkuutensa puolesta muutoin telakkamittauksiin.</p> <p>Työssä käsitellään käytännön testausprosessin lisäksi telakkateollisuuden tämänhetkistä tilannetta, Turun telakan terästuotantoprosessin mittatarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ja sen hallintaa, laserkeilauksen periaatteita sekä MS50- ja P20-laitteita. Erityisesti terästuotantoprosessista ja sen mittatarkkuudesta kertomalla pyritään luomaan lukijalle parempi ymmärrys laivanrakennuksen haasteellisuudesta monien työvaiheiden ja kokonaisuuksien vaikuttaessa toisiinsa.</p> <p>MS50:n keilausominaisuuden käytännöntestaus suoritettiin Turun telakalla marraskuussa 2013 siellä rakenteilla olleen risteilijän peräpään akselikannattimiin Leican P20-laserkeilaimen toimiessa verrokkilaitteena. Saatujen tuloksien perusteella MS50:n pistepilvissä oli pisteiden kesken suurempi hajonta, mutta pistepilvistä muodostettujen kolmioverkkojen vertailussa ei esiintynyt merkittäviä säännöllisiä poikkeavuuksia. Tulosten ja kokemusten perusteella laitetta voidaan käyttää mielekkäällä tavalla pienien ja keskikokoisten alueiden luotettavaan keilaamiseen.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>Leica Nova MS50, laserkeilaus, telakkateollisuus</p>

Author Title	Henri Lahtinen Leica Nova MS50 as a laser scanning device in ship building industry
Number of Pages Date	48 pages + 4 appendices 23 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Marko Reijonen, Dimensional Control Engineer Jussi Laari, Senior Lecturer
<p>This final year project focused on a new product launched in the summer of 2013. The main focus was on the laser scanning capability of the device, since it aroused interest in the measuring group at a ship yard in Turku because the instrument itself seemed suitable for ship yard measurements due to its measurement accuracy. The group wanted to know if the laser scanning feature were suitable for ship building and if it could offer enough value to be a good alternative when buying new measuring instruments.</p> <p>The practical test was conducted at the shipyard in November 2013. The laser scanned objects were the shaft supports of a cruise ship. Laser scanning was done with the tested equipment with a pure laser scanner as a control instrument. The acquired point clouds were compared to each other to establish how well the two clouds agreed with each other. The meshes created from the point clouds did not deviate from each other significantly although the point cloud of the tested device had more dispersion between points. Based on the results it was established that MS50 can be used to scan small and medium sized areas reliably in a reasonable time.</p>	
Keywords	Leica Nova MS50, laser scanning, shipbuilding industry

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Telakkateollisuus	2
2.1	STX Finland	2
2.2	Laivanrakennus	5
2.2.1	Suunnittelu	6
2.2.2	Osavalmistus	6
2.2.3	Lohkon ja suurlohkon koonti	7
2.2.4	Rungon koonti	8
2.2.5	Ylimitat ja työvarat	9
2.3	Mittatarkkuuden hallinta	10
2.3.1	Osatuotannon ja koonnin mittatarkkuuden hallinta	10
2.3.2	Mittatarkkuudenhallinnassa käytettävät mittavälineet	11
2.4	Mittatarkkuuteen vaikuttavat tekijät	13
2.4.1	Leikkaus	14
2.4.2	Taivutus	14
2.4.3	Hitsaus	15
2.4.4	Kuljetus	16
2.5	Laatujärjestelmät	17
2.5.1	IMO:n yhteistyökumppanit	17
2.5.2	Luokituslaitokset	18
3	Laserkeilaus	19
3.1	Toimintaperiaate	19
3.2	Laatutekijät	20
3.3	Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät	21
3.4	Aineiston käsittely	22
3.5	Saavutettavat edut	23
3.6	Hyödyntäminen telakkateollisuudessa	23
4	Mittalaitteiden ominaisuudet	24
4.1	Leica MS50	28
4.1.1	Kamerat	29
4.1.2	Etäisyysmittaus	30
4.1.3	Laserkeilaus	31

4.1.4	GNSS-mittaus	32
4.2	Leica P20	32
5	Käytännön testaus	34
5.1	Keilauskohde	34
5.2	Keilauksen tarkoitus	34
5.3	Mittausympäristö ja virhelähteet	34
6	Tulosten tarkastelu	37
6.1	Käytetyt ohjelmat	37
6.2	Aineistojen käsittely	37
6.3	Aineistojen vertailu	39
7	Yhteenveto	44
	Lähteet	46

Liitteet

Liite 1. MS50:n laserkeilauksien georeferoinnin tulos

Liite 2. P20:n laserkeilauksien kummankin puolen yhteensopivuudet

Liite 3. P20:n laserkeilauksien kokonaisyhteensopivuus

Liite 4. P20:n laserkeilauksien georeferoinnin tulos

1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää Leica Geosystems'in vuoden 2013 kesällä julkaiseman Nova-sarjaan kuuluvan MultiStation 50 -laitteen käyttömahdollisuuksia telakkateollisuudessa sen keilausominaisuuksien osalta. Leica Nova MS50 sopii telakkamittauksiin jo pelkästään sen takymetriominaisuuksiensa puolesta, mutta laitteessa olevan keilausominaisuuden käyttömahdollisuuksia telakkaympäristössä ei ole aikaisemmin tiettävästi tutkittu laitteen ollessa vielä niin uusi markkinoilla. Tämän takia Turun telakan mittausosastolla oltiin kiinnostuneita testaamaan laitteen suorituskykyä ja sitä kautta arvioimaan, tuottaisiko keilainominaisuus niin paljon lisäarvoa, että laite kannattaisi hankkia tavallisen teollisuusmittauksien tarkkuuksiin kykenevän takymetrin sijaan seuraavia laitehankintoja tehtäessä.

Työssä esitellään myös telakkateollisuutta yleisesti, Turun telakan terästuotantoa, mittatarkkuuksiin vaikuttavia tekijöitä ja niiden hallintaa, laserkeilauksen periaatteita ja MS50- ja P20-laitteita. Erityisesti terästuotantoprosessista ja sen mittatarkkuudesta kertomalla pyritään luomaan lukijalle parempi ymmärrys laivanrakennuksen haasteellisuudesta monien työvaiheiden ja kokonaisuuksien vaikuttaessa toisiinsa sekä sitä kautta lopputulokseen.

Käytännön testaus suoritettiin telakalla rakenteilla olleen TUI-matkailukonsernin tilaaman Mein Schiff 3:n peräpään alueella keilaamalla akselien kannattimet, joiden sijainnit sekä kulmat telakan geometriaosasto oli halunnut selvittää jo aikaisemmin tilaamalla ulkopuolisen yrityksen suorittamaan alueen keilauksen. Työssä tarkasteltavan MS50:n verrokkilaitteena testissä toimi Leica P20 -laserkeilain, yksi uusimmista Leican julkaisemista laserkeilaimista, jolla suoritettiin päivän aikana samanaikaisia keilauksia MS50:n kanssa. Laitteista saatujen keilauksien tuloksia analysoidaan työn loppuosassa.

2 Telakkateollisuus

2.1 STX Finland

STX Finlandilla on pitkät perinteet, jotka ovat ajoittuvat aina vuoteen 1737, jolloin Turkuun perustettiin telakka E.Wechterin ja H.Remgean toimesta. Myöhemmin perustettiin Helsingin ja Rauman telakat, jotka erinäisten yritysten yhdistymisien ja konkurssien jälkeen päätyivät osaksi STX Finlandia, joka on osa STX Europe -laivanrakennusyhtymää, joka kuuluu korealaisomisteiseen STX-konserniin. Laivanrakennus on STX-konsernin yksi päätoimialoista koneistus-, merenkulku-, rakennus- ja energialiiketoimintojen lisäksi, jotka tukevat toisiaan luoden merkittävän synergiaedun yhtymälle. STX-konsernilla on 18 telakkaa 8 eri maassa ja näin se on yksi johtavista toimijoista laivanrakennusalalla. Näistä telakoista 15 kuuluu STX European alaisuuteen, ja ne sijaitsevat Suomessa, Ranskassa, Norjassa, Brasiliassa, Romaniassa ja Vietnamin. Muut konsernin telakoista sijaitsevat Kiinan Dalianissa ja Korean Jinhaessa ja Busanissa. STX Finlandilla on nykyisin kaksi telakkaa Suomessa Rauman telakan lakkauttamisen jälkeen, Helsingin ja Turun (kuva 1) telakat, joista Helsingin telakan omistus on puoliksi Venäjän valtion omistaman meriteollisuuskonserni USC:n kanssa. [24]



Kuva 1. STX Finland Oy:n Turun telakka sekä Oasis-luokan matkustaja-alukset [32].

STX Finland on erikoistunut valmistamaan arktisia ja offshore-aluksia, autolauttoja sekä risteilijöitä, joista tunnetuimpia ovat Royal Caribbean International -varustamolle rakennetut huippuluokan risteilijät Oasis of the Seas ja Allure of the Seas. Nämä alukset ovat suurimmat maailmassa koskaan rakennetut risteilyalukset niiden pituuden ollessa 360 m ja leveyden maksimissaan 66 m. Lisäksi STX Europen tuotevalikoimaan kuuluvat vaativat huolto- ja erikoisalukset. Edellä mainitut risteilijät ovat rakennettu Turun telakalla, joka on yksi suurimmista ja moderneimmista Euroopassa sekä luotettu vaativien tilauksien toimittaja korkean osaamistason takia. Telakkayhtiön tavoitteena on kehittää tilauksien suunnitteluprosessissa innovatiivisia sekä ympäristöystävällisiä ratkaisuja, jotka takaavat merkittävän kilpailuedun muihin nähden. Telakkayhtiön tavoitteista luoda ympäristöystävällisempiä ratkaisuja toimii hyvänä esimerkkinä Viking Line -varustamolle rakennettu risteilyalus Viking Grace, joka on ympäristöystävällisin tähän mennessä rakennettu risteilyalus. Aluksen pääpolttoaineena toimii nesteytetty maa-kaasu, jonka avulla risteilyalus alittaa vuonna 2015 voimaan tulevan rikkidirektiivin päästörajat. Aluksessa on myös hyödynnetty energiatehokkaita valaistus-, hissi- ja ilmastointilaitteita, joiden lisäksi se tuottaa muotoilunsa ansiosta vähemmän ja pienempiä aaltoja, mikä on eduksi kuljettaessa herkün ja helposti eroosioituvan Saaristomeren läpi. [24]

Maailman telakkayhtiöitä on koetellut maailmantalouden hiipuminen vuodesta 2009 lähtien, joka on johtanut laivatilauksien vähentymiseen, kovaan tarjouskilpailuun ja telakoiden merkittävään ylikapasiteettiin, jota on lähdetty purkamaan yhtiöiden toimesta kulujen pienentämiseksi. Pelkästään Euroopan alueella risteilijämarkkinoista kilpailee kolme merkittävää telakkayritystä, jotka ovat saksalainen Meyer Werft, italialainen Fincantier ja STX Europe, joiden lisäksi aasialaiset telakat pyrkivät pääsemään mukaan kilpailuun risteilijätilauksista. Merkittävä tarjouskilpailu nähtiin STX Europen omistamien Suomen ja Ranskan telakoiden välillä kahdesta, monen vuoden työllisyyden takaavasta Oasis-luokan risteilijästä, jotka päätyivät lopulta rakennettaviksi Ranskan Saint-Nazairen telakalle ranskalaisen telakan paremman taloudellisen tilan vuoksi, Ranskan valtion ollessa osakkaana yrityksessä. Laivatilauksien vähäisyyden vuoksi telakoiden on täytynyt löytää korvaavia tilauksia, joilla paikata tilauskirjojen tyhjiä kohtia, joskaan niiden arvo ei ole niin merkittävä, että telakka pystyisi toimimaan tällaisten tilauksien turvin kovin pitkään. STX Finlandin Turun telakalla on rakennettu esimerkiksi Turun uuden Myllysilän teräsrakenteet sekä merituulivoimaloissa ja väylämerkeissä käytettäviä tukijalkoja (kuva 2). [18; 22; 24; 25.]



Kuva 2. M/S Aura kuljettamassa STX Finland Oy:n valmistamia merituulivoimaloiden tukijalkoja [33].

STX Finland teki syyskuussa 2013 päätöksen, jonka seurauksena Rauman telakan toiminta loppui silloisessa muodossaan emoyhtiön talousvaikeuksien takia ja Rauman telakalle suunnitellut työt siirrettiin Turun telakalle. Saman vuoden lokakuussa kerrottiin myös STX Finlandin suunnitelleen osuutensa myymistä Arctech Helsinki Shipyard yhteisyrityksestä merikonserni USC:lle STX Finlandin emoyhtiön jatkuneiden rahoitusvaikeuksien vuoksi. Tämä nähtiin positiivisena merkinä telakkateollisuudessa Helsingin telakan rahallisen tilanteen vakautuessa suunniteltujen kauppojen toteutuessa. Helsingin telakan on tarkoitus jatkaa arktiseen merenkulkuun soveltuvien erikoisalusten valmistamista, joiden kysynnän ennustetaan kasvavan Koillisväylän kasvattaessa merkitystään maailman meriliikenteessä Aasian ja Euroopan välillä uusien kilpailtujen, merkittävien ja hyödyntämättömien luonnonvarojen paljastuessa arktisten alueiden jääpeitteiden sulaessa. [4; 10; 20.]

STX Finlandille jää Suomeen ainoastaan Turun telakka, jossa on kirjoitushetkellä rakenteilla Mein Schiff 3 (kuva 3) ja 4. Risteilijöiden tilaaja on TUI-matkailukonsernin risteily-yksikkö, ja risteilijät työllistävät telakan henkilöstöä kevääseen 2015 asti. Telakalla oli myös aiesopimus kahdesta autolautasta Scandlines-varustamon kanssa, mutta tilaus menetettiin rahoitusongelmien takia saksalaiselle P+S Werftenin telakalle. Turun telakalle on tärkeää, että se pystyy tuottamaan innovatiivisia, ympäristöystävällisiä, erityislaatuisia sekä suurta ammattitaitoa vaativia laivaprojekteja, koska se on ainoa

tapa kilpailla muita, erityisesti aasialaisia, valmistajia vastaan, joilla on huomattavasti alhaisemmat hinnat sekä paremmat mahdollisuudet tehdä laivoja sarjatuotantona. [24; 28.]



Kuva 3. STX Finland Oy:n Turun telakalla vuonna 2013 rakenteilla oleva Mein Schiff 3 [34].

2.2 Laivanrakennus

Nykyaikaisen risteilijäaluksen rakentamiseen käytetään aluksen koosta riippuen noin 250 000—500 000 teräsosaa, jotka yhdistetään eri työvaiheissa suuremmiksi kokonaisuuksiksi. Kaikki alkaa suunnitteluprosessista, jota seuraa osavalmistus, jossa valmistetaan ja yksilöidään laivaan tarvittavat osat. Osavalmistusta seuraa lohko- sekä suurlohkokoonti, joiden jälkeen suurlohko siirretään odottamaan runkoon asentamista. Lohkorakentamisen käyttöönotolla laivanrakentamisessa on pystytty lyhentämään läpimenoaikaa, parantamaan laatua ja vähentämään tarvittavan työvoiman määrää automatisoitumisen määrän kasvaessa tuotannossa. Lohkorakentaminen edellyttää parempaa mittatarkkuutta kuin aiemmat rakennusmenetelmät, minkä lisäksi yhä pienemmät materiaalipaksuudet, kasvaneet varustelukokonaisuudet ja laajeneva CAD-

suunnitelmien käyttö asettavat vieläkin tarkemmat vaatimukset mittatarkkuudelle. [3; 12.]

2.2.1 Suunnittelu

Suunnitteluprosessiin jakautuu perussuunnitteluun ja valmistussuunnitteluun, joita edeltää projektisuunnittelu, jossa on tarkoituksena koota tekninen aineisto tilaajaneuvotte- lua ja sopimusta varten. Suunnittelu on perinteisesti organisoitu ammattiryhmäkohtai- sesti, ja se toteutetaan joko omana työnä tai alihankkijoina toimivien suunnittelutoimis- tojen avulla. Suunnittelussa syntyvien piirustusten määrä on huomattavissa määrin laivatyyppistä riippuvaista, tankkilaivan piirustusten yhteismäärän ollessa noin 2000 kpl. Merkittävä osa suunnittelua on suunnitelmien hyväksyttäminen tilaajalla, luokituslaitok- sessa ja viranomaisilla, joista kaksi viimeisintä osoittavat suunnitelmista tekniset koh- dat, joissa täytyy tehdä uudelleensuunnittelua tai lisäselvityksiä. [23]

Perussuunnittelun alussa hyväksytetään edellä mainituille tahoille laivan yleisjärjeste- lyn, järjestelmien, tilojen ja rungon suunnitelmat sekä tärkeimmät materiaalit ja laitteet. Suunnitteluvaiheen aikana päätetään myös rakennustapa, alue- ja lohkojako sekä aika- taulu, joiden lisäksi tehdään työpiirustusluettelot, hankintasuunnitelmat ja resurssivara- ukset. Perussuunnittelu kestää pari kuukautta ja tuloksena saadaan hyväksytyt piirus- tukset, kaaviot, laskelmat sekä tekniset määritykset, minkä jälkeen pidetään suunnitte- lukatselmus, jossa käydään läpi aikataulun, hyväksytyksen ja hankintojen tilanne. Heti perussuunnittelun jälkeen alkaa valmistussuunnittelu, jossa tehdään työpiirustukset, koontiohjeet, vaiheluettelot, työohjeet ja valmiusraportit sekä hankintaimpulssit vielä hankkimattomista materiaaleista. [3; 23.]

2.2.2 Osavalmistus

Levyosien valmistuksessa käytetään erityyppisiä leikkureja, joilla osat leikataan CAD- mallien mukaan metallilevystä sekä merkitään tunnistamista varten. Koneiden tarkkuus on konetyyppikohtaista tarkkuuden ollessa käytännössä $\pm 0,1$ — $1,5$ mm, jota seurataan koneen käyttäjän toimesta työn aikana sekä säännöllisten mittausten ja testiajojen kautta, jossa leikataan määritelty testikappale ja tehdään tarvittavat säätökorjaukset leikkuriin havaintojen perusteella. Tarvittaessa levyosia valssataan halutun muodon saamiseksi esimerkiksi laidoituslevyihin. Palkkituotanto suoritetaan käyttäen joko kuljet-

timin varustettua kuljetushihnaa tai kiinteää työasemaa riippuen tuotantomääristä. Valmistettaessa T-palkkeja voidaan materiaalina käyttää levystä poltettua tai valssattua laattatankoa. [23]

2.2.3 Lohkon ja suurlohkon koonti

Lohkonkonnissa tarvittava teräsmateriaali tulee telakalle yleensä joko maantietä tai junarataa pitkin, ja se varastoidaan tuotantohallin läheisyyteen tasaiselle kentälle koon, laadun tai lohkokohtaisuuden mukaan. Kun teräsmateriaalia tarvitaan lohkotuotannossa, nostetaan se pukkinosturin avulla puhdistus- ja suojausrullalinjalle, jossa materiaali puhdistetaan, raepuhalletaan ja maalataan konepajapohjamaalilla. Lisäksi osana linjastoja voi olla oikaisuvalssi, jolla poistetaan levyn muodonmuutoksia, joita on syntynyt levyn jäähtyessä epätasaisesti terästehtaalla suoritettun kuumavalssauksen jälkeen. [23]

Lohkotuotannossa kootaan ohjeiden mukaisia lohkoja osavalmistuosaston valmistamista osista, raakalevyistä, jäykkääjistä, kehyskaarista ja laipioista, jotka on leikattu muotoonsa CAD-mallien avulla sekä koottu hitsaamalla tuotantolinjoilla. Lohkon pohjana toimii kansipaneeli, johon on asennettu palkitukset ja poltetut tarvittavat aukot. Lohkon konnissa suoritetaan myös varustelutoimenpiteitä, kuten putkien ja eristeiden asentamista, jos niiden asentaminen on ajoitettu lohkonkoontivaiheeseen. Merkittävä osa lohkotuotannon toimista voidaan suorittaa koneistuksen avulla, mutta erityisesti alusten muotolohkot ovat sellaisia, jossa tarvitaan enemmän käsityönä tehtävää työtä niiden monimutkaisuuden takia. [3; 23.]

Rakennetuista lohkoista kootaan myöhemmässä vaiheessa suurlohkoja, jotka koostuvat suurlohkon koosta riippuen kahdesta viiteen lohkoksi. Suurlohkot kootaan joko tasolla tai vaaittujen pukkien päällä riippuen mm. niiden painosta, pienimpien painaessa 200 ja suurimpien 400—500 tonnia. Suurlohkojen kokoon ja painoon vaikuttava tekijä on nostokapasiteetti, jonka takia suurlohkot pyritään kokoamaan tehokkaiden nostureiden ulottuma-alueella. Suurlohkokonnissa väärinpäin työtävän takia kootut lohkot käännetään ympäri, kasataan päällekkäin ja hitsataan toisiinsa kiinni. Kokoamisen lisäksi suurlohkoja varustellaan sekä liekkioikaistaan, eli rihtaataan. Rihtaamisen tarkoituksena on tasoittaa pintojen epätasaisuudet lämmittämällä materiaalia ja antamalla sen jäähtyä tämän jälkeen, jolloin tapahtuu kutistumisesta johtuvaa pintojen tasoittamista. Varustelu pyritään tekemään mahdollisimman pitkälle suurlohkovaiheessa en-

nen runkoon nostamista helpomman työskentely-ympäristön takia, koska tällöin varustelussa tarvittavia tavaroita ei tarvitse kuljettaa pitkiä matkoja laivan läpi. Ennen runkoon nostamista suurlohkot siirretään vielä maalaushalliin pintakäsiteltäviksi. [3; 23.]

2.2.4 Rungon koonti

Rungon koonnissa kootaan aluksen runko, joka voidaan koota monella tavalla riippuen laivan tyyppistä, koosta, koontipaikasta ja nostokapasiteetista. Suurlohkokoontia käytetään yleensä koottaessa risteilyaluksia, jonka lisäksi muita kokoamistapoja ovat avaruuslohkoilla ja rengaslohkoilla suoritettu kokoaminen. Rungon koonti alkaa suurlohkokoontitavassa laivan konealueen käsittävistä lohkoista ja etenee tästä pyramidimaisesti ylös, keulaa ja perää kohti. Pohjalohkot lasketaan altaan pohjalla olevien betonista valettujen noin 2 metrin korkuisten pukkien päälle (kuva 4), joissa on säätökiilamenetelmä, jonka avulla pukit säädetään oikealle korkeudelle vaaituskojetta käyttäen. Kohdistettaessa suurlohkoja toisiinsa käytetään apuna tunkki- ja vetolaatikoita sekä ohjureita, joiden avulla suurlohko siirretään takymetrimittauksen perusteella oikeaan kohtaan. Kun suurlohko on saatu oikeaan kohtaan, sidotaan se saumaraudoilla ja liitetään toisiin suurlohkoihin hitsaamalla alkaen keskeltä pituusjäykistäjistä ja palkeista edeten kohti reunoja. Tarvittaessa suurlohkolle suoritetaan asennusvaiheessa ensin sovitepoltto, minkä jälkeen se kohdistetaan toisiin lohkoihin. [23]



Kuva 4. Suurlohkon asentaminen STX Finland Oy:n Turun telakalla rakenteilla olevan Mein Schiff 3:een pukkinosturin avulla.

Optimaalinen rungonkoontipaikka on nykyään kuiva-allas, joka on katettu, väljä ja nostokalustokapasiteetiltaan riittävä suurlohkoihin perustuvaan koontitapaan. Kuiva-altaissa voi olla lisäksi yksi tai useampi sulkuportti, jolloin samassa altaassa voidaan rakentaa useampaa alusta kerralla sekä suorittaa eriaikaiset vesillelaskut. STX Finland Oy:n Turun telakan rakennusallas on kattamaton, ja sen mitat ovat 365 x 80 metriä sisältäen vain yhden sulkuportin. Nostolaitteista rakennusaltaalla on käytettävissä 600 tonnin nostokyvyn omaava pukkinosturi sekä monia pienempiä nostureita. [3; 23.]

2.2.5 Ylimitat ja työvarat

Vaikka laivanrakennusteollisuudessa pyritään tarkkoihin mittatarkkuuksiin ja ylimääräisen työn minimointiin, voidaan rakentamisessa hyödyntää ylimittoja ja työvaroja, joiden tarkoituksena on varmentaa rakenteiden riittävät mitat rakenteiden haastavissa kohdissa. Kohteita, joissa käytäntöä hyödynnetään, ovat esimerkiksi paksuja materiaaleja sisältävät lohkot ja muotoalueiden suurlohkot. Ongelmana ylimitoissa ja työvaroissa on se, että ne eivät kasvata mittaa tasaisesti rakenteessa, vaan ne ovat vain yhdessä koh-

taa rakennetta, kuten keulan, perän tai keskilaivan puolella. Ylimiöilla kompensoidaan pieniä rakenteellisia poikkeamia, ja ne ovat tavallisesti 5—10 mm:n suuruisia, joiden kokoon sisältyvät levyn hitsauksessa tarvittavat viisteet. Ylimittaa ei tarvitse polttaa pois ennen hitsausta tehtävän hankaluuden takia, koska vaarana on rakenteen liiallinen lyhentyminen. Työvarat ovat suuruudeltaan 15—20 mm, eikä työvarallisten levyjen reunoja ole viistetty, koska tarkoituksena on tarjota riittävä lisämitta, joka työstetään polttoleikkaamalla ja hiomalla sopivaan mittaan viisteen kera. [22]

2.3 Mittatarkkuuden hallinta

Mittatarkkuuden hallinnassa seurataan oman tuotannon toimintaa, analysoidaan kerättyjä tuloksia sekä kehitetään ratkaisuja havaittuihin ongelmiin, jolloin päästään parempaan mittatarkkuuteen, joka on edellytyksenä nykyaikaiselle telakkateollisuudelle. Mittatarkkuuden hallinta ulottuu osavalmistuksesta aina rungonkoontiin asti, johon mittatarkkuus lopulta kulminoituu. Rakentamisen aikana suoritetaan seuranta ja kerätään tietoa niin osien kuin suurempien kokonaisuuksien mittatarkkuuksien toteutumien osalta, joiden perusteella tehdään tarpeellisia muutoksia suunnitteluun ja tuotantoon. Suuri vaihtelu mitoissa indikoi tuotantolaitteiden tai välineiden epätarkkuutta ja systemaattinen alamittaisuus sekä hitsauskutistumien kompensointiongelmat prosessin huonoa ennustettavuutta. Mittatarkkuuden hallinnan kannalta ongelmallisimpia ovat erityisesti risteilijäalukset, joissa käytetään monia eri teräsvahvuuksia sekä metallilajeja ja joissa on paljon aukollisia levyjä. [3]

2.3.1 Osatuotannon ja koonnin mittatarkkuuden hallinta

Mittatarkkuutta voidaan seurata osavalmistuksessa tekemällä määrätysti ajoitettuja tarkistusmittausajoja tietynlaisella CAD-mallilla metallilevyille, jossa tutkitaan erityyppisten leikkureiden liikeratoja. Laitteenkäyttäjä tarkistaa kuvion silmämääräisesti, suorittaa tarkistusmittaukset teräsmittanauhan avulla sekä vertaa tuloksia teoriamittoihin, kirjaten lopuksi tulokset talteen tarkastusmittapöytäkirjaan. Tarkastusmittapöytäkirjasta voidaan seurata prosessin tilaa ja sitä, kuinka se on kehittynyt seuranta-aikajaksona. Tarkistusmittausajojen lisäksi on suotavaa tarkistaa valmistettavien osien mitat, kerätä tätä tietoa talteen ja analysoida tuloksia, jotta prosessista saataisiin parempi kokonaiskuva. Säännöllinen koneiden tarkistus on myös tärkeää, jotta kuluneet ja väljyyttä aiheuttavat

osat pystytään paikantamaan sekä vaihtamaan uusiin mittatarkkuuden säilyttämiseksi. [3]

Lohko- ja suurlohkokoonnissa pääasiallinen dokumentteja tuottava mittatarkkuuden hallinta suoritetaan loppumittauksella, jossa mitataan valmistuneen kappaleen kummastakin päädyistä riittävä määrä pisteitä sellaisista kohdista, jotka voidaan tunnistaa tarkasti suunnitteluaineistosta. Mitattuja pisteitä verrataan suunnitteluaineiston vastaaviin pisteisiin, joiden perusteella tehdään mittapöytäkirja, jossa näkyvät mitattujen pisteiden erot suunnitteluaineiston vastaaviin sekä niiden koordinaatit. Saadun tiedon perusteella kappaleeseen suoritetaan tarvittavia korjauksia vielä rakennusvaiheessa aikataulun sen salliessa tai tuotantotekijöistä johtuen seuraavassa työvaiheessa. Suurlohkon koonnin aikana suoritetaan myös mittauksia, joilla valvotaan lohkojen kansiväliä ja tasomaisuutta sekä avustetaan kokoonpanoa tarvittavilta osin. [3]

Rungonkoonnissa mittatarkkuutta seurataan pääasiassa asennusmittauksien avulla, mutta kriittisimmissä kohteissa saatetaan suorittaa monia tarkistus- ja seurantamittauksia, jollaisia ovat esimerkiksi akseliston kannatinvalut. Näiden lisäksi mitattavia kohteita ovat esimerkiksi laivan pohja sekä monet muut rakennusalueet, joille on olemassa yleisiä tarkkuusvaatimuksia. Kuten lohkon ja suurlohkon mittauksessa, tehdään myös rungon koonnin mittauksista mittapöytäkirjat, joiden avulla pystytään selkeästi esittämään suurlohkon sijainti eromittojen avulla, antamaan työohjeita tämän perusteella sekä seuraamaan aluksen rungon kokonaisehittymistä. [3]

2.3.2 Mittatarkkuudenhallinnassa käytettävät mittavälineet

Laivanrakennus on haasteellista siihen liittyvien monien muuttujien takia, joita pyritään hallitsemaan mitta- ja muototarkkuuden varmistamiseksi. Kappaleen ominaisuuksien, halutun tarkkuuden ja suureen mukaan valitaan parhaiten sopivat mittausvälineet, joiden kanssa hankittujen tulosten avulla pystytään seuraamaan toteuman suhdetta suunnitelmiin sekä kehittämään valmistusprosessia. Laivanrakennuksessa käytettävät mittavälineet voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: mekaanisiin ja optisiin mittavälineisiin. [3]

Mekaanisiin mittavälineisiin voidaan lukea teräsmittanauhut sekä muut vastaavantyyppiset mitat, mittakepit sekä suorakulmat, luotilangat ja vesiväät. Niitä voidaan hyödyntää laajasti tuotannon eri vaiheissa niiden helppokäyttöisyyden, riittävän tarkkuuden ja

kohtuullisten kustannusten takia, joka luo paremmat mahdollisuudet haluttuun mittatarkkuuteen pääsemiselle. Mekaanisilla mittavälineillä on kuitenkin rajoituksia, jonka puitteissa niillä ei voida suorittaa kaikkia tarvittavia mittauksia. Esimerkiksi teräsmittanauhalla voidaan mitata lohkojen kansilakanoita vain tuotannon alkuvaiheessa, koska kootuissa lohkoissa on harvoja kohtia, jos ollenkaan, joista voidaan mitata kansien pituuksia siihen asennettujen rakenteiden takia. [3]

Optisiin mittalaitteisiin luetaan vaaituskojeet, takymetrit, laserkeilaimet, etäisyysmittarit ja laserseuraimet. Nämä mittalaitteet ovat tarkempia kuin edellä mainitut mekaaniset mittalaitteet, ja niitä käyttävät pääasiassa telakalla olevat mittaukseen erikoistuneet työntekijät, poikkeuksena vaaituskojeet sekä etäisyysmittarit, joita käyttävät myös muut tuotannon työntekijät. Vaaituskojeita käytetään mm. lohkojen vaakatasoon asettamisessa niin koonnin, varastoinnin kuin runkoon nostamisen kohdalla, laivan pukituksen korkeuden säädössä ja kannen tasomaisuutta tutkittaessa. Vaaituskojeen tarkkuus on laitteesta riippuen 0,5—2 mm vaaitettaessa kilometrin matka edestakaisin ja tarkkuusvirheet johtuvat vaaitustasaimen tarkkuudesta, kaukoputken suurennoksesta, latasta, tähysmatkasta sekä itse mittaajasta. Etäisyysmittarin tyypillinen mittaustarkkuus on noin ± 1 mm, ja mittaria käytetään laipioiden sekä muiden osien paikalle mittaamiseen sekä kansiväliä määrittäessä. [3; 14.]

Optisista mittavälineistä erityisesti takymetri on erityisen hyvä mitattaessa telakkateollisuuden suuria kappaleita, vastaten paremmin tuotannon tarpeisiin sen ollessa tarkka, nopea sekä joustava. Nykyaikaisilla takymetreillä saadaan tulokset 3D-koordinaatistoon parhaimmillaan alle millimetrin tarkkuudella, ja pisteet sekä niiden koordinaatit tallentuvat suoraan laitteen omaan muistiin tai ulkoiselle muistille, josta ne pystytään myöhemmin lukemaan käsittelyohjelmaan. Käsittelyohjelman avulla pystytään tarkastelemaan paremmin kohteesta mitattuja pisteitä ja niiden eroa suunnitteluaineistoon sekä tekemään mittapöytäkirjoja.

Rungonkoonnissa käytetään tarraprismoja, joita kiinnitetään asennettavaan lohkoon vähintään viisi tai kuusi tarraa siten, että lohkon sivu- ja pituusmittoja pystytään tarkastelemaan hyvin. Tarraprismoja hyödynnetään rungonkoonnissa, koska ne ovat halpoja ja voidaan tällöin jättää vartioimatta, sekä siitä syystä, että mittauksia voidaan joutua tekemään monia kertoja ennen kuin suurlohko saadaan sopivaan asentoon, mikä muutoin edellyttäisi laivassa olevan mittamiehen tarpeetonta liikkumista laivan hankalissa paikoissa, mikä hidastaisi merkittävästi asennusprojektia. Lohko- ja suurlohkomittauk-

sessä sen sijaan hyödynnetään piikkiprismaa, jossa metallipiikin päässä on prisma. Tarraprismoja ei ole hyödyllistä käyttää tässä työvaiheessa, koska pisteet mitataan vain kerran. Hyödyllinen ominaisuus, joka löytyy yhä useammasta nykyaikaisesta takymetristä, on prismaton mittaus, jonka avulla voidaan mitata kohteita, joiden luokse olisi muutoin vaikea tai mahdoton päästä. Edellytyksenä prismattomalla mittauksella on kuitenkin riittävän suuri kohteen pinta-ala sekä mitattavan kohteen sopiva asento.

Lohkot ja suurlohkot mitataan erilliskoordinaatistossa, minkä jälkeen pisteille tehdään koordinaattimuunnos käsittelyohjelmassa, jotta ne saadaan samaan koordinaatistoon suunnitteluaineiston kanssa. Rungonkoonnissa käytetään kuiva-altaan ympärille rakennettua kiinteää pisteverkkoa, jonka pisteet ovat samassa laivakoordinaatistossa rakennettavan laivan kanssa, jolloin mitattuja pisteitä voidaan verrata suoraan suunnitteluaineistosta otettuihin mittoihin ilman muunnoksia nopeuttaen asennustoimintaa.

Laserkeilaimia ja laserseuraimia käytetään telakkateollisuudessa vielä kohtalaisen vähän, mutta laserkeilaimien käyttö esimerkiksi korjaustoiminnassa sekä lohkojen mitaamisessa lisääntyy koko ajan laitteiden muuttuessa helppokäyttöisemmiksi sekä halvemmiksi. Laserseuraimia on harvoin telakoilla itsellään niiden vähäisen jatkuvan tarpeen ja korkean hinnan takia, koska niitä tarvitaan lähinnä tuotantokoneiden kuluratojen sekä niihin liittyvien muiden kohteiden tarkkaan seurantaan. Laserseuraimella päästään jopa millimetrin sadasosien tarkkuuksiin asti, ja sillä voidaan mitata jopa 160 metrin päähän. [3]

Haluttu tarkkuus tulisi ottaa huomioon mittavälinettä valitessa siten, että mittalaitteella on mahdollista päästä $\frac{2}{3}$ parempaan tarkkuuteen, kuin annetut toleranssit antavat myöden. Kumpaankin mittavälinekategoriaan kuuluvissa välineissä voi kuitenkin ilmetä tarkkuusongelmia, jos mittavälineet ovat vahingoittuneita, säännöllisiä kalibrointeja ei ole suoritettu, niitä luetaan väärin tai ei osata käyttää oikein.

2.4 Mittatarkkuuteen vaikuttavat tekijät

Muodonmuutoksia aiheuttavat työ- ja käsittelyvaiheet sekä suoranaiset mittavirheet ovat mittatarkkuuteen vaikuttavat tekijät telakkateollisuudessa. Muodonmuutoksia aiheuttavia työ- ja käsittelyvaihteita ovat leikkaus-, taivutus-, hitsaus-, oikaisu- ja kuljetustyöt ja mittavirheitä aiheuttavat itse mittalaitteet, asemointi ja mittaustapahtuma. Eniten

mittatarkkuuteen vaikuttavat työvaiheet ovat suurlohkokoontivaiheen rihtaus, lohkokoonnin hitsaus ja levykentän hitsaus, joista rihtauksen tarve syntyy hitsausmuodonmuutoksista aiheutuneista virheistä eikä se ole siis pääasiallinen mittatarkkuutta heikentävä työvaihe. [12]

2.4.1 Leikkaus

Leikkaustyössä käytetään erilaisia leikkureita, kuten poltto-, plasma-, laser- ja vesisuihkuleikkureita, jotka aiheuttavat pääasiassa muodonmuutosta, mutta myös mittavirheitä voi esiintyä. Muodonmuutosta tapahtuu eniten polttoleikkauksessa ja plasmaleikkauksessa, kun taas laser- ja vesisuihkuleikkauksessa muodonmuutos on pientä leikattavan materiaalin lämmitessä vähemmän. Laser- ja vesileikkureiden tarkkuudet ovat $\pm 0,1$ — $0,2$ mm, kun taas poltto- ja plasmaleikkureiden tarkkuudet ovat $\pm 0,5$ — $1,5$ mm. [12]

2.4.2 Taivutus

Taivutustyöstä ei ole tarkkoja ja kattavia tutkimustietoja, mutta mekaanisen taivutuksen osalta koneenkäyttäjän ammattitaidolla on merkittävä osa mittatarkkuudessa. Mekaanisessa taivutusprosessissa käytetään taivutusvalssia, hydraulista puristinta, pyöristyskonetta, särmäyspuristinta ja kaarien taivutuskonetta. Laitteilla, jotka voivat olla joko erillisiä työpisteitä tai osa tuotantolinjaa, puristetaan, valssataan ja taivutetaan levyjä sekä palkkeja haluttuihin muotoihin. Mittatarkkuutta seurattaessa hyödynnetään vanerimalleja, joita sovitetaan taivutettuihin osiin, joiden taivutusta jatketaan niin kauan, että vanerimalli sopii niihin. [12]

Mekaanisen taivutuksen lisäksi voidaan käyttää termistä taivutusta, jossa taivutettavaa kohdetta lämmitetään ensin liekin kanssa, jonka jälkeen lämmitetty alue viilennetään ja aiheutetaan muodonmuutos. Terminen taivutus on tarkkuutta vaativaa, ja siksi se tulee suunnitella tarkoin. Työn suunnittelussa tulee päättää minkälaisia, kuinka paljon ja mihin kohtaan muutoksia tarvitaan sekä minkälaisia lämpötiloja lämmityksessä ja jäähdytyksessä käytetään. Termisellä taivutuksella voidaan päästä hyviin mittatarkkuuksiin toiminnon automatisoimisella, mutta se edellyttää hyvää ja luotettavaa ennustettavuutta, joka voidaan saavuttaa vain tietokonesimulaation avulla. [12]

2.4.3 Hitsaus

Hitsausmenetelmiä ovat puikko-, MIG-, TIG-, jauhekaari-, elektronisäde-, laser- ja ase-tyleeniliekkihitsaus, joita käytettäessä tapahtuu muodonmuutosta prosessissa kehittyvän ja siirtyvän lämmön takia. Muodonmuutoslajeja ovat poikittais- ja pitkittäiskutistuma, kulmavetäymä, kiertymä, kaareutuminen ja lommoutuminen, joita syntyy, kun hitsattava aine venyy lämmitessä, mutta jäähtyessä siihen jää palautumattomia venymiä, eli jännityksiä. Jotta muodonmuutosten synty pystyttäisiin estämään, tulisi kappaleiden jännityksen jäädä matalaksi hitsauksessa ja kappaleiden tulisi päästä liikkumaan vapaasti. Jälkimmäinen on kuitenkin käytännössä mahdotonta saavuttaa, koska hitsattavia kappaleita liitetään osittain tai kokonaan suurempiin metallirakenteisiin. [12]

Hitsausmuodonmuutokseen ja mittatarkkuuteen voidaan vaikuttaa monin tavoin, kuten käyttämällä sopivia materiaaleja ja alhaisen lämmöntuonnin hitsausmenetelmiä, joita ovat laser- ja elektronisädehitsaus. Näissä hitsausmenetelmissä hitsausenergiatehokkuus on niin suuri, että siinä syntyy höyrystyneen metallin muodostama metallikapillari, jonka avulla pystytään hitsaamaan nopeasti ja kapealla alueella aiheuttaen vain minimaalista muodonmuutosta. [12]

Materiaalivalintojen vaikutus muodonmuutoksen suuruuteen riippuu materiaalin lämmönjohtavuudesta, kimmokertoimesta, myötörajasta ja materiaalin suoruudesta toimitustilassa. Erittäin hyvin materiaalin muotovirhealttiudesta kertoo lämpölaajenemiskerroin, joka on alumiinin kohdalla kaksinkertainen teräkseen verrattuna tehden siitä herkän muotovirheille. Sulamislämpötilan suhteen alumiinin voisi kuitenkin kuvitella olevan parempi materiaali hitsauksessa, koska sen sulamislämpötila on vain 600 °C verrattuna teräksen 1 520 °C:seen, jolloin tarvitaan vähemmän lämpöä, joka on merkittävältä osin hitsausmuodonmuutoksen takana. Suuren kimmokertoimen omaavat materiaalit, kuten teräs, jonka kimmokerroin on kolme kertaa alumiinia suurempi, ovat jäykempiä ja täten vastustavat paremmin muodonmuutoksia. Myötörajoja materiaaleissa kasvattamalla vähennetään muodonmuutoksia ja lisätään jäännösjännityksiä, mikä on eduksi veto-kuormituksessa, mutta aiheuttaa ongelmia puristustilanteissa, joissa levy antaa periksi eli lommahtaa. [12]

Hyvällä rakennesuunnittelulla voidaan myös pyrkiä vähentää hitsausmuodonmuutoksia. Rakenteita voidaan suunnitella tehtäväksi muotoilemalla tai puristamalla, jolloin vältetään rakenteiden hitsaamista, mutta näitä keinoja ei ole aina mahdollista hyödyn-

tää. Liitoksia voidaan pyrkiä vähentämään ja suurlohkorajoja suunnittelemaan lähelle kehyskaaria, jotta kansien vapaiden päiden pituudet olisivat mahdollisimman lyhyet. Lisäksi laivan kaariväliä voidaan lyhentää, materiaalipaksuuksia kasvattaa ja käyttää enemmän poimutettuja levyjä, jolloin haittavaikutuksina ovat kasvanut osien määrä ja paino sekä suuremmat sovituskulut. [12]

Hitsauksessa muodonmuutoksiin pystytään vaikuttamaan erilaisten katkohitsitapojen, hitsien kokojen sekä tarkkojen hitsaus- ja koontijärjestyksien avulla. Katkohitsaus on hyvä tapa vähentää muodonmuutosta, mutta samalla se hidastaa hitsausprosessia, jolloin menetetään osa tehtävässä mahdollisesti käytettävästä automaation tuottavuudesta. Automaation etuja ovat vähemmät hitsausvirheet, pienemmät ja tasaisemmat hitsien koot sekä nopeampi ja tasaisempi hitsausnopeus. [12]

Hitsausmuodonmuutoksille voidaan tehdä korjaustoimenpiteitä, joihin kuuluvat mekaaniset ja termiset pakotustoimet. Mekaanisiin toimiin kuuluvat puristaminen, vetäminen ja hakkaaminen, joihin käytetään tunkkeja, taljoja, prässejä ja lekoja. Lekoilla hakkaamalla tapahtuvaa suoristaminen on yleisimmin tehtävä mekaaninen pakotustoimi, jota voidaan käyttää lämmittämättömille tai lämmitetyille levyille, korjausalueen vaikeuden määrittellessä lämmityksen tarpeen. Terminen oikaisu käsittää piste-, viiva- ja kiilakuumennusmenetelmät, joista käytetään yleisnimeä rihtaaminen. [12]

2.4.4 Kuljetus

Kuljetus- ja siirtoprosessin tarkastelussa tulee ottaa huomioon kaikki kuljetustapahtumat, jotka telakalla tai jossain muualla kootut rakennelmat tai niiden materiaalit ovat läpikäyneet. Materiaaleja ja osia siirretään koonnin eri vaiheiden aikana erityyppisten kuljettimien avulla ja suurempia kokonaisuuksia siirtoalustoilla ja lohkoavaruuksilla koonnin, maalaamon ja varustelun välillä. Kattavaa tutkimustietoa muodonmuutoksista ja niiden suuruuksista ei ole, mutta viitteitä niistä on havaittu. Kuljetuksessa syntyy muotovirheitä varsinkin pitkiä ja ohuita levyjä nostettaessa niin valmistajan kuin telakan päässä, jos nosto ei ole samanaikaista tai nostokohtia on liian vähän. Samoin lohkojen kuljetukset niin telakka-alueella kuin meriteitse alihankkijoilta telakalle aiheuttavat muodonmuutoksia lohkon riippuen siitä, kuinka hyvin niiden nostot ja siirrot ovat suunniteltu ja onko esimerkiksi merenkäynti niin kovaa, että se aiheuttaa kuljetettaviin lohkoihin muodonmuutosta. Parhaiten muodonmuutoksia vältetään suunnittelemalla nostot, siir-

rot ja kuljetukset mahdollisimman hyvin sekä yksinkertaisesti välttämällä kappaleiden liikuttelua. [12]

2.5 Laatu järjestelmät

Telakkateollisuudessa on käytössä tarkat laatu järjestelmät, joiden sisältöä ohjaavat kansainväliset organisaatiot, tärkeimpänä IMO eli International Maritime Organization, joka on toiminut vuodesta 1948 YK:n alaisuudessa. IMO:hon kuuluu tällä hetkellä 170 jäsenvaltiota, jotka ovat sitoutuneet lisäämään omaan lainsäädäntöönsä organisaatiossa tehdyt päätökset, ja sen tavoitteena on turvallinen, taloudellinen ja puhdas merenkulku. Organisaation päätäntävalta kattaa 98 % maailman kauppalaivastojen tonnisuudesta, millä on merkittävä vaikutus maailmanlaajuiseen meriliikenteeseen, koska ilman laajasti hyväksyttyä organisaatiota maailmalle voisi syntyä kilpailevia organisaatioita, joiden turvallisuusmääräykset olisivat huomattavasti heikommalla johtaen turvattomampaan merenkulkuun. IMO:lla on myös ohjelmia, joiden tarkoituksena on muun muassa parantaa kehittyvien maiden merenkulkuosaamista sekä auditoida jäsenvaltioita. [5]

IMO:n tärkein tehtävä on kuitenkin turvallisen meriliikenteen edistäminen, jonka tärkein osa-alue on turvalliset alukset. Tämän takia organisaatiolla on kerättyä paljon teknistä tietoa sekä jatkuvaa tutkimustoimintaa, joiden perusteella tehdään määrittelyjä alusten teknisiin osa-alueisiin. Määrittelyjä tarkastellaan tarpeen tullen tarkemmin, jos uutta tietoa saadaan esimerkiksi perinteisen tutkimuksen tai onnettomuustutkimuksen kautta. [5]

2.5.1 IMO:n yhteistyökumppanit

Merkittäviä IMO:n yhteistyökumppaneita ovat luokituslaitokset, ISO-standardit luova International Organization for Standardization, öljyalan järjestö Oil Companies International Maritime Forum, kaasualan järjestö Society of International Gas Tanker and Terminal Operators Ltd, sähköalan kansainvälinen standardisointijärjestö IEC sekä varustamoiden kansainväliset yhteistyöelimet. IMO ja sen yhteistyökumppanit jakavat samat tavoitteet turvallisesta merenkulusta ja teknisten ratkaisujen yhtenäistämistä, joita koskevien päätöksien tukena yhteistyöjärjestöjen vankka alakohtainen tietämys on erittäin tärkeässä osassa. Viime vuosien aikana merenkulussa on keskitytty myös entistä tarkemmin laivaliikenteen ympäristövaikutuksiin, joiden pohjalta ISO-järjestö on

laatinut monia ympäristöstandardeja koskien muun muassa laivojen romuttamista. Standardit ja IMO:n antama ohjaus kannustavat entistä puhtaampaan laivaliikenteeseen, joka on jo yksi ympäristöystävällisimmistä kuljetusmuodoista tarkasteltaessa tarvittavan energian ja kuljetuskapasiteetin suhdetta. [2; 5; 23.]

2.5.2 Luokituslaitokset

Ennen IMO:n perustamista monet luokituslaitokset ohjasivat merkittävässä määrin merenkulun teknistä kehitystä niiden myöntäessä alukselle luokkamerkin sen täyttäessä rakenteelliset kriteerit, jotka luokituslaitos asetti. IMO:n toiminnan kehittyessä viranomaisten merkitys merenkulun kehittämisessä kasvoi ja luokituslaitoksen väheni, muuttaen luokituslaitoksen toimintaa ohjaavasta tulkitsevaan ja soveltavaan suuntaan. Luokituslaitokset ovat kuitenkin säilyttäneet merkittävyytensä, ja ne hoitavat itsenäisinä kansainvälisinä toimijoina tällä hetkellä monien valtioiden laivantarkastustoimintaa, jota IMO:hon kuulumisen edellyttää tekemään. Suomen liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on vuonna 2012 solmitun sopimuksen perusteella antanut seuraaville luokituslaitoksille luvan tehdä katsastuksia suomalaisille aluksille: American Bureau of Shipping, Bureau Veritas, Det Norske Veritas As, Germanischer Lloyd Se, Lloyd's Register, Rina Services S.p.A ja Russian Maritime Register of Shipping. [2; 23.]

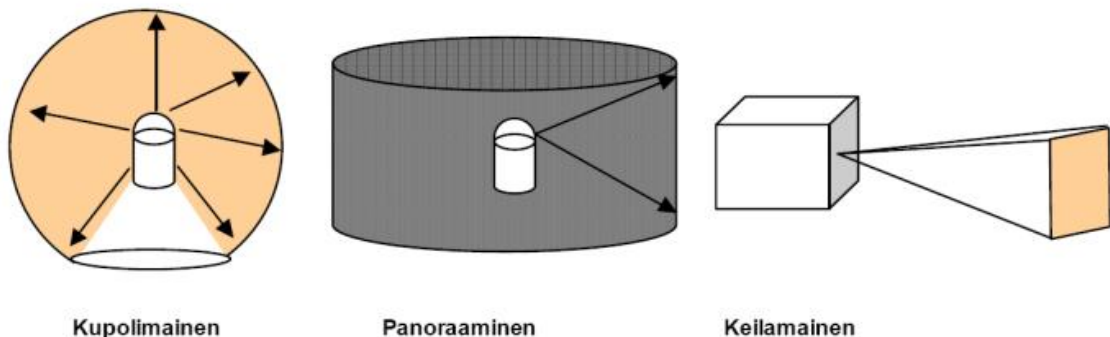
Luokituslaitoksilla on myös oma edustajansa nimeltä International Association of Classification Societies eli IACS, joka on yhdenmukaistanut eri luokituslaitosten säännöt sekä toimii luokituslaitosten edustajana IMO:n kokouksissa. IACS voi antaa myös pyydettyä apua IMO:lle erinäisten teknisten kysymyksien selvittämiseen ja ratkaisemiseen. Luokituslaitosten luokitussääntöjen yhdenmukaistamisesta huolimatta luokituslaitoksilla on kirjoitettujen sääntöjen ja käytännönohjeiden lisäksi kumuloitunutta kirjoittamatonta tietoa ja käytännön kokemusta, jota hyödynnetään tarkastustilanteissa. Vaikka luokituslaitoksilla on tarkat ja maailmanlaajuisesti hyväksi todetut säännöt ja ohjeet, voivat telakat asettaa itselleen vielä tarkempia laatutavoitteita, joilla voidaan korostaa omaa osaamista asiakkaille. [2; 23.]

3 Laserkeilaus

3.1 Toimintaperiaate

Laserkeilaimia on monta eri tyyppiä, kuten maa-, teollisuus-, mobiili- ja ilmalaserkeilaimet, joista tässä työssä käsitellään maalaserkeilaimia. Laserkeilainjärjestelmän pääosiin kuuluvat vähintään itse keilain, pakkokeskistysalusta, jalusta ja tähykset, joiden lisäksi saatetaan tarvita erilaisia kaapeleita, ulkoista virtalähdettä ja tietokonetta. Laite toimii siten, että keilaimessa tuotettu lasersäde poikkeutetaan pyörivän peilimekanismin avulla kohti keilattavaa kohdetta, josta palannut signaali havaitaan ilmaisinosalla ja saadulle pisteelle määritetään koordinaatit lähtökulmien ja kulkumatkatietojen avulla. Laserkeilaimen avulla pystytään keräämään lyhyessä ajassa kohteesta kattava ja tarkka, mahdollisesti useita satoja miljoonia pisteitä sisältävä 3D-pistepilvi, jossa pisteiden tietoihin kuuluvat koordinaattien lisäksi intensiteettiarvot sekä mahdollisesti väriarvot, jos keilausalue on valokuvattu keilaimen kameralla tai vastaavalla lisävarusteella. [6; 7.]

Keilaustavat (kuva 5), jotka vaihtelevat laitemallien mukaan, ovat kupolimainen, panoraaminen ja keilamainen tapa, joista valitaan keilauskohteeseen sopivin keilaustapa, joka voi olla yksittäinen tai useamman tavan yhdistelmä. Keilaimella voidaan esimerkiksi keilata harvalla pistetiheydellä kupolimaisesti koko alue, minkä jälkeen tarkemmin halutut kohdat voidaan keilata tiheimmin keilamaisella tavalla. [6]



Kuva 5. Yleisimmät laserkeilaustavat, joista kupolimainen keilaustavan keilaimet ovat monikäyttöisyytensä takia yleensä parhaita vaihtoehtoja [6].

Pisteiden koordinaatit määritellään pysty- ja vaakakulmatietojen sekä lasersäteen kulkumatkan avulla, jotka havaitaan ja tallennetaan jokaiselle pisteelle laitteen sisällä sijaitsevista kulmakehistä sekä etäisyysmittarista. Poikkeuksena on optiseen kolmiomittaukseen perustuva tapa, jossa etäisyys pystytään johtamaan keilaimen lasersädelähteen ja vastaanotinsensoriin lasersäteen paluukohdan etäisyydestä sekä säteen paluukulmasta, jota käytetään lähinnä teollisuuden tarkkuutta vaativissa keilauksissa. Lasersäteen kulkema matka voidaan johtaa kulkuajasta, jossa havaitaan lasersäteeltä kohteeseen ja sieltä takaisin kulunut aika valonnopeuden ollessa tiedossa tai mittaamalla lähetetyn ja vastaanotetun lasersäteiden vaihe-ero. Vaihe-eromittauksessa lähetetään intensiteetiltään siniaallolla moduloitua lasersädettä tai useita samanaikaisia aallonpituuksia, joiden lähtö- ja paluusignaalien vaihe-erojen pohjalta pystytään määrittämään matka. [1; 6; 7.]

Matkanmäärityksessä saatetaan käyttää myös mittaustapojen sekoituksia, esimerkiksi kulkuajan ja täyden aallonmuodon analysoinnin tai kulkuajan ja vaihe-eron yhteismenetelmiä. Etäisyysmittaustavat ovat osaltaan samanlaisia kuin takymetreissä, mutta mitausnopeus on laserkeilaimilla merkittävästi suurempi niiden pystyessä mittaamaan jopa miljoona pistettä yhdessä sekunnissa takymetriensä pystyessä vain yhteen pisteeseen parissa sekunnissa ja takymetrikeilaimien (esim. Leica MS50) tuhanteen pisteeseen sekunnissa. [7]

3.2 Laatu tekijät

Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat yksittäisen mitatun pisteen laatu, pistepilven tiheys ja erillisten pistepilvien yhdistämisen onnistuminen. Yksittäisten pisteiden kohdalla tulee tarkkailla hajontoja suurten hajontojen synnyttäessä mallinnuksen yhteydessä merkittäviä jäännösvirheitä, mikä tarkoittaa sitä, että mallinnuksessakin on virheitä mallin-nusohjelmistojen pyrkiessä tasoittamaan hajonnoista aiheutuneita eroja pisteiden välillä. Pistepilven tiheys vaikuttaa mallintamisen laatuun, koska tiheästä pistepilvestä pystytään mallintamaan paremmin esimerkiksi kohteiden reunoja ja putkia. Laajoja tarkkaa mallintamista vaativia alueita tulisikin keilata monelta keilausasemalta, jotta etäisyyskohina olisi mahdollisimman pientä ja pistepilvet mahdollisimman tiheitä, eikä alueelle jäisi kohteita piiloon. [6]

Jos keilauksessa tarvitaan monia keilausasemia, tulee niiden pistepilvet pystyä yhdistämään toisiinsa työn onnistumisen ja hyvän lopputuloksen aikaansaamiseksi. Yhdistäminen voidaan tehdä keilaamalla tähyksiä, joista vähintään kahden tulisi olla yhteisiä toisille keilauksille käytettäessä laserkeilaimen kompensattoria, muussa tapauksessa kolme. Tähyksinä keilauksessa voivat toimia esimerkiksi paperille tulostetut tähykuviot tai pallotähykset, joita tulisi olla sijoiteltuna mahdollisimman monessa suunnassa ja korkeudella, jotka keilain mittaa ja määrittelee niiden keskipisteet. Pistepilvien yhdistämisen ja siihen liittyvän tähyksien mittaamisen tulisi olla mahdollisimman tarkkaa, jotta virheet eivät kumuloituisi keilausasemien määrän kasvaessa ja pisteiden keskinäinen tarkkuus säilyisi. [6]

Pistepilvet voidaan yhdistää myös käyttämällä kahdesta tai useammasta pistepilvestä mallinnettuja yhteisiä kohteita tai pisteparimenetelmällä, jossa pistepilvistä osoitetaan vähintään kolme pisteparia, joiden avulla pistepilvet sovitetaan jäännösvirheet minimoiden parhaimmalla tavalla yhteen. Tehtäessä sovitusta pisteparien avulla, tulee pistepilvien olla peitoltaan päällekkäisiä noin kolmasosan alueelta ja pisteen osoitustarkkuus alle 10 cm kahden pistepilven välillä. Yhdistämismenetelmiä voidaan käyttää myös yhdessä, kuten isoissa projekteissa on tavallista. Yhteisten mallinnettujen kohteiden tai pisteparimenetelmän avulla tehty yhdistäminen on tarkkuudeltaan heikompi verrattuna tähyksien kanssa tehtyyn, tähyksien kanssa päästäessä 1—3 mm:n ja toisilla menetelmillä 5—10 mm:n sovitustarkkuuteen. [6]

Keilaukset voidaan sitoa, eli georeferoida, johonkin tunnettuun koordinaatistoon siten, että tähykset mitataan tunnettuun koordinaatistoon orientoidulla takymetrillä, josta saatua pistetiedostoa käytetään pistepilvien käsittelyvaiheessa kotipilvenä, jolloin pistepilvien pisteet muuntuvat oikeaan koordinaatistoon kotitiedostoon liitettäessä yhteisten tähyksien avulla. [6]

3.3 Tarkkuuteen vaikuttavat tekijät

Pisteiden tarkkuudet ovat keilainriippuvaisia, mistä on esimerkkinä Leica P20 -laserkeilain ja sen pistetarkkuusarvot 3 mm @ 50 m ja 6 mm @ 100 m. Valmistajien arvot on kuitenkin yleensä johdettu suotuisissa mittausolosuhteissa suotuisiin kohteisiin tehdystä keilauksista, minkä takia tarkkuusarvoihin voi olla vaikea päästä todellisissa mittaustilanteissa. Intensiteettiarvoon, eli palautuneen signaalin voimakkuuteen, vaikut-

tavat tekijät, kuten keilauskohteen väri, materiaali, pinnan tasaisuus ja muoto sekä säteen osumiskulma vaikuttavat myös keilauksen onnistumiseen ja pistetarkkuuteen. Keilaustuloksiin vaikuttavat haitallisella tavalla myös vesi- ja lumisade, höyry ja pöly, jotka voivat absorptoida, poikkeuttaa tai heijastaa säteen sekä pahimmillaan estää mittauksen kokonaan. Keilauksen onnistumiseen ja sitä kautta tarkkuuteen vaikuttaa myös laserkeilausta suorittavan henkilön osaamistaso, esimerkkinä georeferointiin liittyvien mittauksien epätarkkuus tai epäonnistuminen. [7; 11.]

3.4 Aineiston käsittely

Keilausaineiston käsittely suoritetaan tietokoneohjelmilla, ja se voi sisältää pistepilvien värjäämisen, yhdistämisen ja georeferoinnin lisäksi esimerkiksi suodatuksen, vertailun, kolmioinnin, luokittelun ja mallintamisen. Tietokoneohjelmat voivat olla laitevalmistajan omia tai jonkin muun yrityksen tekemiä, jotka ovat keskittyneitä johonkin tiettyyn sovellukseen. Suodatustoimenpiteellä poistetaan käsittelyssä tarpeettomat tai virheelliset pisteet, jolloin aineisto on tarkempi sekä nopeampi käsitellä. Aineiston luokittelulla voidaan pyrkiä esimerkiksi rajaamaan maanpinnan pisteet tai jokin muu luokka tarkempaa tarkastelua varten. Vertailussa tutkitaan ajan tai jonkun muun muuttujan vaikutusta keilauskohteeseen, kuten silta-, tunneli- ja patorakenteisiin, tai keilauskohteen toteutusta verrattuna suunnitelmiin esimerkiksi laivan lohkonkoonnin yhteydessä. Tarve kolmioida pistepilviä syntyy, jos halutaan selvittää esimerkiksi tilavuuksia, tehdä massalaskentaa tai vertailla tasomaisia kappaleita keskenään. [1; 8.]

Mallintaminen on pistepilvien yleisen käsittelyn lisäksi eniten aikaa vievä laserkeilauksen vaihe, jonka hoitaa osaamistason mukaan laserkeilaaja itse tai tehtävään erikoistunut henkilö. Pistepilviä hyödynnetään tänä päivänä monenlaisten asioiden, kuten tuotantolaitosten, siltojen, laivojen, offshore-rakenteiden, rakennusten ja jopa pelimaailmojen osien mallintamiseen. Varsinkin vanhempien rakennusten mallintamista laserkeilauksien pohjalta tehdään kokoajan enemmän BIM:iin, eli rakennusten tietomallien, yleistyessä. Tietomalliin on tallennettu rakennuksen rakenteiden elinkaaren aikainen tieto, jonka esittämisen keskeisessä osassa on rakennuksen kolmiulotteinen malli sen havainnollisuuden takia. [8; 21.]

3.5 Saavutettavat edut

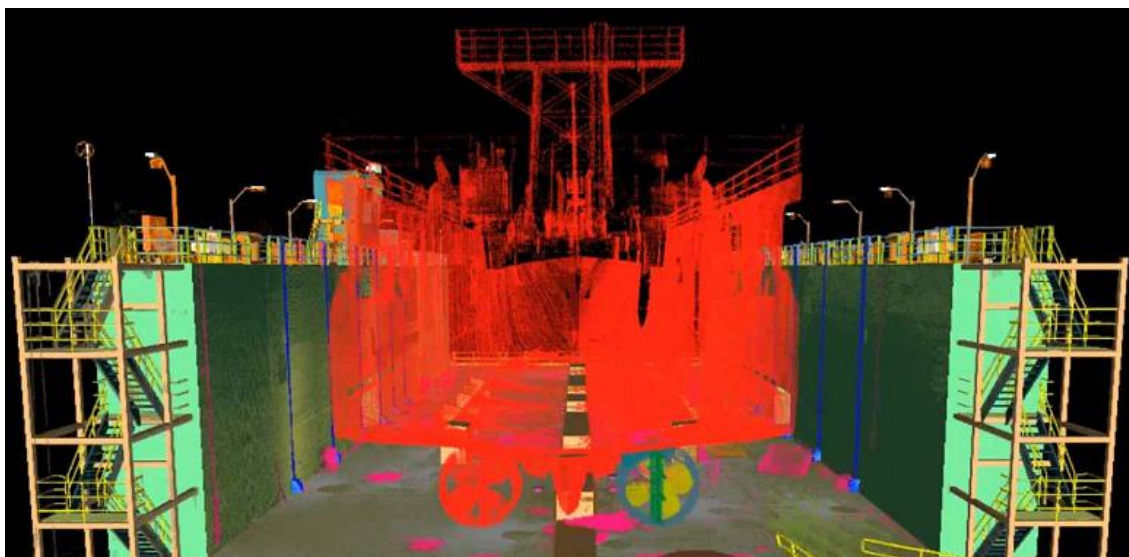
Laserkeilauksen avulla pystytään keräämään nopeasti kattava ja tarkka pisteaineisto kohteesta, joka olisi muutoin erittäin aikaa vievää tai kokonaan mahdotonta kohteen vaikean tavoitettavuuden, suuren koon tai vaarallisuuden takia. Pistepilvien pohjalta voidaan tehdä vertailuja toteutuneiden rakenteiden ja suunnitelmien välillä sekä mallinnuksia esimerkiksi tavallisista tai historiallisesti arvokkaista rakennuksista ja teollisuuslaitoksista, joista ei ole tarkkoja piirustuksia tai tietoja. Keilauksen avulla kohteet saadaan dokumentoitua kattavasti ja kunnostamis-, remontointi- ja muutostoimenpiteet pystytään suunnittelemaan entistä paremmin, tarkemmin ja taloudellisemmin. Kokonaan toinen hyödyntämisaikala on onnettomuustutkinta esimerkiksi kolarialueilla, joista halutaan saada mahdollisimman paljon ja nopeasti tarkkaa tietoa, jotta muulle liikenteelle kolarista aiheutuva haitta liikennejärjestelyiden muodossa olisi mahdollisimman lyhytkestoinen. [7]

3.6 Hyödyntäminen telakkateollisuudessa

Laserkeilaimia voidaan hyödyntää telakkateollisuuden monissa eri tehtävissä, joihin lukeutuvat osien ja kokonaisuuksien yhteensopivuuden tarkistaminen, laaduntarkkailu, rakennesuunnittelu, vakaus- ja hydrodynaamiset analyysit, rakentamisen dokumentointi sekä erityisesti korjaus- ja muutostyöt. Korjaus- ja muutostöitä tehtäessä ongelmaksi voivat muodostua vanhempien laivojen puutteelliset rakennetiedot, jolloin työsuunnitelmia saatetaan joutua muuttamaan kesken työn esimerkiksi uusien putkilinjojen törmätessä vanhoihin, mikä johtaa kalliisiin lisätyötä vaativiin muutostöihin. Lisätöiden kalleuden lisäksi kustannuksia lisäävät mahdolliset korvaukset, joita telakkayhtiön täytyy maksaa työn tilaajalle projektin myöhästymisestä. [19; 30.]

Korjaus- ja muutostöiden ongelmia voidaan kuitenkin pyrkiä ratkaisemaan ainakin osittain laserkeilauksella, jolloin työkohteet pystytään mallintamaan tarkasti pistepilvistä, mikä johtaa parempaan työsuunnitelmaan sekä todennäköisesti pienempiin suunnitelmamuutoksiin korjaus- tai muutostöiden alkaessa. Keilaus on hyvä suorittaa myös muutostoimenpiteiden jälkeen, jotta voidaan olla varmoja siitä, että työkohteesta on dokumentoituna oikeat tiedot, eikä kohteessa ole tehty töitä, joista ei olisi ilmoitettu suunnittelusta vastaaville. Keilaustietoa voidaan hyödyntää myös telakan työalueiden mallintamisessa (kuva 6), jotta laivan telakointia suunniteltaessa voidaan määrittää

optimaalisiin laivan paikka kuiva-altaassa esimerkiksi nostureiden ulottuvuuksien sekä muiden tärkeiksi katsottujen tekijöiden suhteen. [19; 30.]



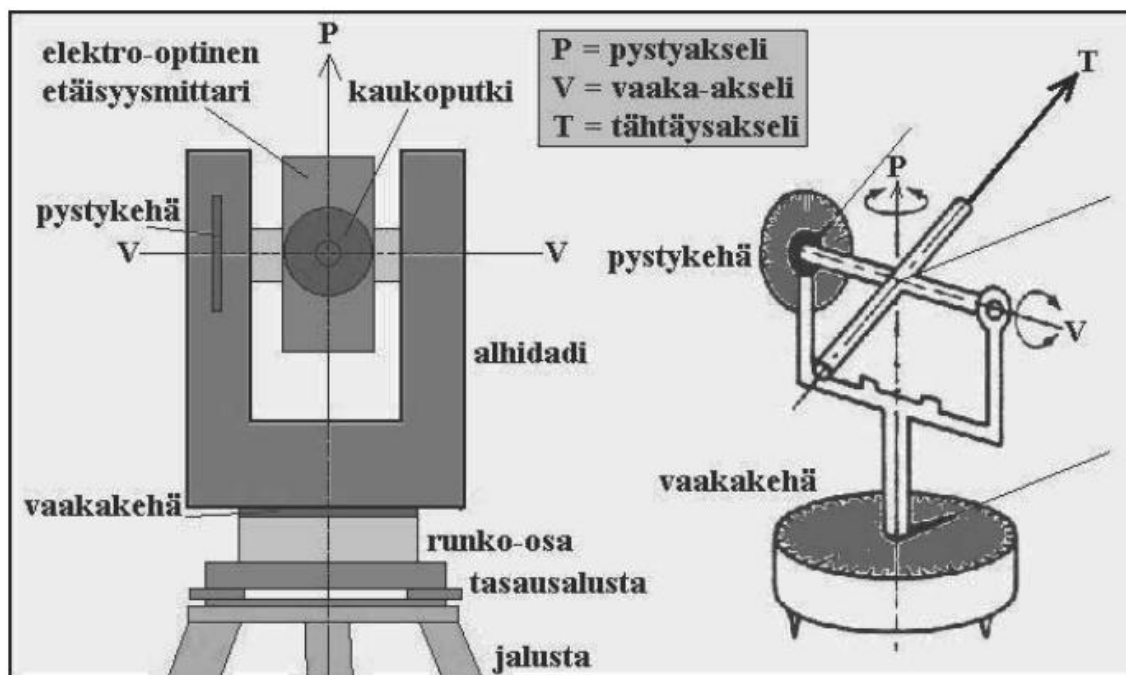
Kuva 6. Laserkeilattu laiva sovitettuna mallinnettuun telakan kuiva-altaaseen [30].

Telakointia suunniteltaessa olisi myös hyvä, jos itse telakoitava alus olisi laserkeilattu aikaisemmin oikeanlaisen pukitus suunnitelman varmistamiseksi, koska aluksesta saat-
taa olla olemassa CAD-mallit, jotka eivät kuitenkaan vastaa välttämättä todellisuutta
valmiiden alusten rakenteiden ollessa harvoin täysin yhtenevät CAD-mallien tai muun
suunnitteluaineiston kanssa. [30]

4 Mittalaitteiden ominaisuudet

Jäljempänä esiteltävä mittalaite MS50 pohjautuu merkittävästi takymetriin, jossa yhdis-
tyvät elektroniset kulma- ja etäisyysmittauskojeet. Takymetri on mittausalan ammatti-
laisten yleinen mittaväline monine laitevalmistajineen, jotka valmistavat monenlaisia
malleja mittausalan eri tehtäviin lähinnä tarkkuusvaatimusten mukaan. Takymetrin ra-
kenteelliset pääosat ovat jalusta, tasausalusta, runko-osa, alhidadi, joka pyörii pystyak-
selin ympäri, mittauskaukoputki, joka pyörii vaaka-akselin ympäri, ja elektro-optinen
etäisyysmittari (kuva 7). Muita takymetrin tärkeitä osia ovat erityyppiset tasaimet, pis-
teen päälle keskitettäessä tarvittava optinen luoti tai laserluoti ja liikeruuvit laitteen tark-
kaa suuntaamista varten. [14]

Laitteella havaitaan pysty- ja vaakakulmat laitteen sisäisen sähköisen kulmalukupään avulla, joka lukee kulman suuruuden uusimmissa laitteissa jopa neljästä kohdasta laitteen sisällä sijaitsevista kulmakehistä. Kulmakehät perustuvat yleisesti viivarasteriin, jossa jakoviivat ovat saman paksuisia vuorotellen valoa läpäiseviä, magneettisia tai galvaanisia, joiden ohittamista lukupää seuraa ja muuntaa kulmalukemaksi. Kulmalukeman tarkkuus riippuu käytettävästä kojeesta, mutta kojeilla päästään noin 0,3 mgon:n tarkkuuteen laitteen kulmamittauksen erotuskyvyn ollessa 0,1 mgon. [14]



Kuva 7. Takymetrin pääosien karkea esittely [14].

Etäisyysmittaus perustuu vaihe-eroon tai kulku-aikaan (taulukko 1) mittaustavasta riippuen, vaihe-eroa käytettäessä pääsääntöisesti mitattaessa prismaan ja kulku-aikaa mitattaessa prismattomalla mittauksella. Edellä mainittujen tapojen lisäksi käytetään täyden aallonpituuden analysointimenetelmää, jota käsitellään enemmän osiossa, jossa käsitellään MS50:tä. Kantoaaltona mittauksissa käytetään infrapunavaloa, näkyvän aallonpituuden alueella toimivaa punaista laseria tai näkymätöntä laseria mittaustavasta riippuen. [27]

Vaihe-eromittauksessa laite aloittaa mittauksen suurista amplitudimoduloiduista aallonpituuksista, koska matka tulee määrittää yksikäsitteisesti, mihin ei pienillä aallonpituuksilla pystytä kokonaisten aallonpituuksien määrittämisen ongelmallisuuden takia. Kun matka on määritetty yksiselitteisesti suurella aallonpituudella, jatkaa laite matkan mää-

rittämistä pienemmillä aallonpituuksilla, jotka ovat tavallisesti kymmenesosa edellisestä mittauksessa käytetystä aallonpituudesta. Kokonaisuallonpituuksien lisäksi laitteen tulee havainnoida osa-aallonpituudet, jotka mitataan pulssilaskimen avulla matkojen ollessa käytännössä aina osa-aallonpituuksia sisältäviä. Matkan mittaaminen kestää kokonaisuudessaan joitakin sekunteja, jonka tuloksena saadaan sadoista mittauksista johdettu keskiarvo matkan pituudelle. Kulkuajan mittaaminen on huomattavasti matemaattisesti yksinkertaisempi sekä nopeampi, koska siinä etäisyys määritetään ainoastaan signaalin kulkuajan perusteella signaalin nopeuden ollessa tiedossa. [14]

Etäisyysmittauksen tarkkuus vaihtelee laitekohtaisesti aina millimetrin kymmenyksistä noin 5 mm:iin asti. Laitevalmistajat ilmoittavat tarkkuuden muodossa $a \text{ mm} + b \text{ ppm}$ ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$), jossa a ilmoittaa etäisyysmittauksesta riippumattoman virheen, kuten nol-lapiste- ja vaihe-eromittauksen virheen ja b etäisyysmittaukseen liittyvät virheet, kuten refraktiokertoimen eli sääkorjauksen ja mittaustajuu-den virheet. Mittauksissa voidaan päästä laitevalmistajan ilmoittamia arvoja parempiin tarkkuuksiin, mutta se edellyttää hyviä mittausolosuhteita ja mittavälineitä sekä osaavaa mittaajaa. [14]

Taulukko 1. Etäisyysmittaustapojen vertailu [15].

Mittaustapa	Kuvaus
Kulku-aika	<ul style="list-style-type: none"> - Lyhyt mittausaika - Suuri laserpiste - Epätarkka - Ei mittaustulosta, jos kohina liian suuri
Vaihe-ero	<ul style="list-style-type: none"> - Pitkä mittausaika - Pieni laserpiste - Tarkin tapa
Täyden aallonmuo-don analysointi	<ul style="list-style-type: none"> - Säädettävä: tarkka ja hidas tai nopea ja epätarkempi - Pieni laserpiste - Pitkät matkat

Mittauksissa voidaan hyödyntää langatonta maastotallenninta, jos mittalaite on robottitakymetri, kuten nykyiset takymetrit usein ovat. Maastotallennin, jolla hallitaan takymetria esimerkiksi bluetoothin tai radioyhteyden kautta, voidaan kiinnittää prismasauvaan, jolloin mittauksia voi suorittaa yksin ilman toisen mittahenkilön tarvetta, mikä johtaa työn tuottavuuden parantumiseen takymetrin seurattessa itse liikkuvaa prismasauvaa mittausalueella. [14]



Kuva 8. Erilaisia prismoja. Ylh.vas. 360° prisma, ylh.kesk. pyöröprisma kehyksellä, ylh.oik. tarkkuusprisma, alh.vas. miniprismasarja ja alh.oik. prismatarra [31].

Jotta takymetrimittaus olisi sujuvaa maastotallenninta käytettäessä prisma-auvan kanssa, tarvitaan automaattista prismantunnistusta (hienotähtäysmenetelmä) ja karkeatähtäysmenetelmää, jotka voidaan toteuttaa joko aktiivisella tai passiivisellä tavalla. Prismantunnistuksen passiivisessä tavassa takymetri etsii prismaa lähettämällä ympäristöön näkymättömän aallonpituusalueen lasersädettä, joka osuessaan prismaan palaa takaisin takymetriin, josta laite laskee prismaa oikeaan suuntaan ja kohdistuu prismaa oikeaan kohtaan. Aktiivisessa tavassa itse prismassa on integroituna lähetin, tai se on erillinen lisälaitte, jonka lähettämän signaalin pohjalta takymetri suorittaa prismaa kohdistuksen. [27]

Karkeatähtäysmenetelmää tarvitaan, jos takymetri menettää yhteyden prismaan kadottaen sen, jolloin kojeelle lähetetään prismantunnistuskomento maastotallentimen kautta. Passiivisessa menetelmässä takymetri lähettää yleensä pystymuotoista laserviuhkaa ja haravoi näkökenttää, kunnes se osuu prismaan, josta lähetetty signaali heijastuu takaisin laitteelle. Tämän jälkeen takymetri lukittuu kohteeseen ja vaihtaa hienotähtäystekniikkaan prismaa tarkentamista varten. Aktiivisessa menetelmässä käytetään esimer-

kiksi prisma-auvaan kiinnitettyä GNSS-vastaanotinta tai muuta lähetintä, jonka signaalin perusteella takymetri pystyy paikantamaan prisman sijainnin karkeasti. [27]

4.1 Leica MS50

MS50 (kuva 9) on Leica Geosystems'in vuonna 2013 kesällä julkaisema uudentyyppinen mittalaite, jossa yhdistyvät mergeTEC-tekniikan avulla takymetri, GNSS-yhteydet, digitaalinen valokuvaus ja laserkeilain. Tämän takia laitteesta käytetään nimeä MultiStation takymetrin sijaan, vaikka laite on takymetrin näköinen. Eri ominaisuuksien yhdistämisen lisäksi MultiStation yhdistää eri havainnointitavoilla kerätyn datan samaan koordinaatistoon, joka voi olla erilliskoordinaatisto tai jokin yleinen koordinaattijärjestelmä. Merkittävin ulkonäöllinen seikka, joka erottaa laitteen tavanomaisesta takymetristä, on okulaarin sijoittuminen laitteen kaukoputkiosan vasempaan laitaan, mikä johtuu laitteen uudesta kameraominaisuudesta, joka on koaksiaalinen tähtäinputken suhteen.

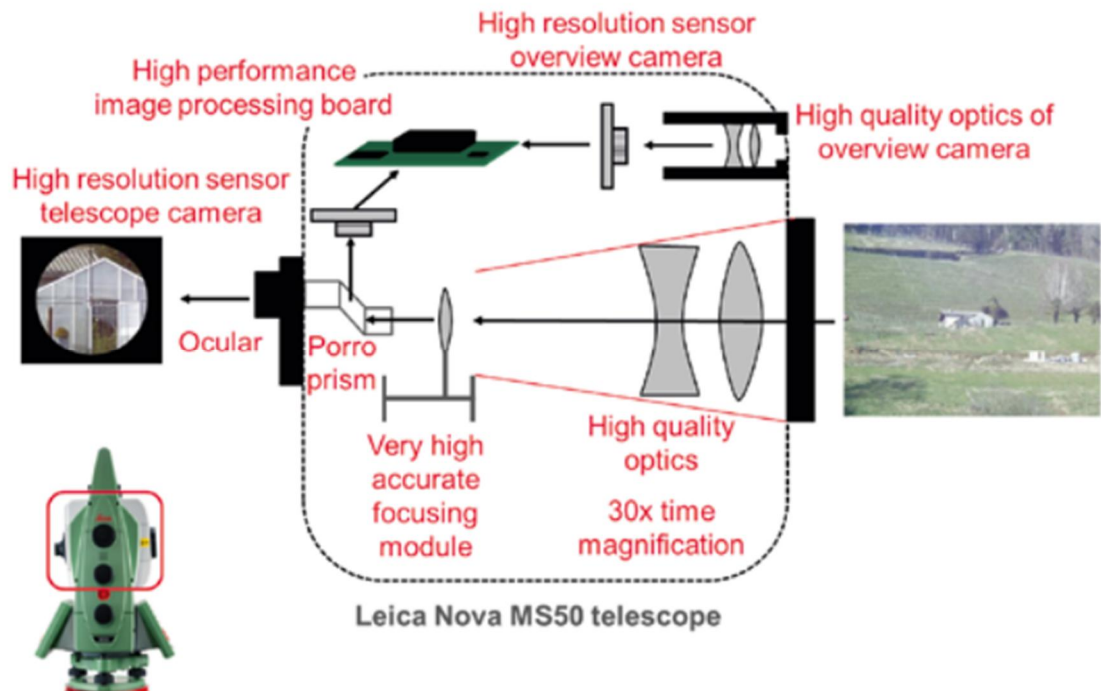


MS50:n tekniset tiedot	
Paino	7,8 kg
Kulmanlukutarkkuus	1" Hz ja V
Etäisyysmittaustarkkuus prismalla	1 mm+1.5 ppm
Etäisyysmittaustarkkuus prismaton	2 mm+2 ppm
Etäisyysmittausmatka prismalla*	1.5 m—10 000 m
Etäisyysmittausmatka prismaton*	1.5 m—2 000 m
Etäisyyskohina keilauksessa	±0,5 mm @ 50 m
Suojaus ja käyttölämpötila	IP65, -20 °C...+50 °C
Tiedonsiirtomenetelmät ja tallennus	WLAN, USB, RS232, Bluetooth, Radio, SD-kortti, Sisäinen muisti
* Olosuhteiden ollessa optimit	

Kuva 9. Leican MS50 ja sen tekniset tiedot. [9; 15.]

4.1.1 Kamerat

Koaksiaalista kameraa (kuva 10) ja siitä laitteen kosketusnäyttöön välitettyä kuvaa voidaan käyttää mittauksessa kaukoputken sijaan, ja se on yhtä tarkka kuin tähdittäessä läpi perinteisestä kaukoputkesta. Käytettäessä kameraa ja kosketusnäyttöä havainnoimiseen ei laitteen pysty- ja vaakasuunnan ruuveja tarvitse käyttää, vaan laite kohdistaa kosketusnäytöllä esitettävän videokuvan osoitettuun pisteeseen. Koaksiaalinen kamera on resoluutioltaan 5 megapikseliä, se lähettää kuvaa 20 Hz:n taajuudella laitteen tai maastotallentimen näytölle ja pystyy 30-kertaiseen suurenokseen fokuusintialueen ollessa 1,7 metristä äärettömään laitteessa olevan kaukoputken tapaan. [15]



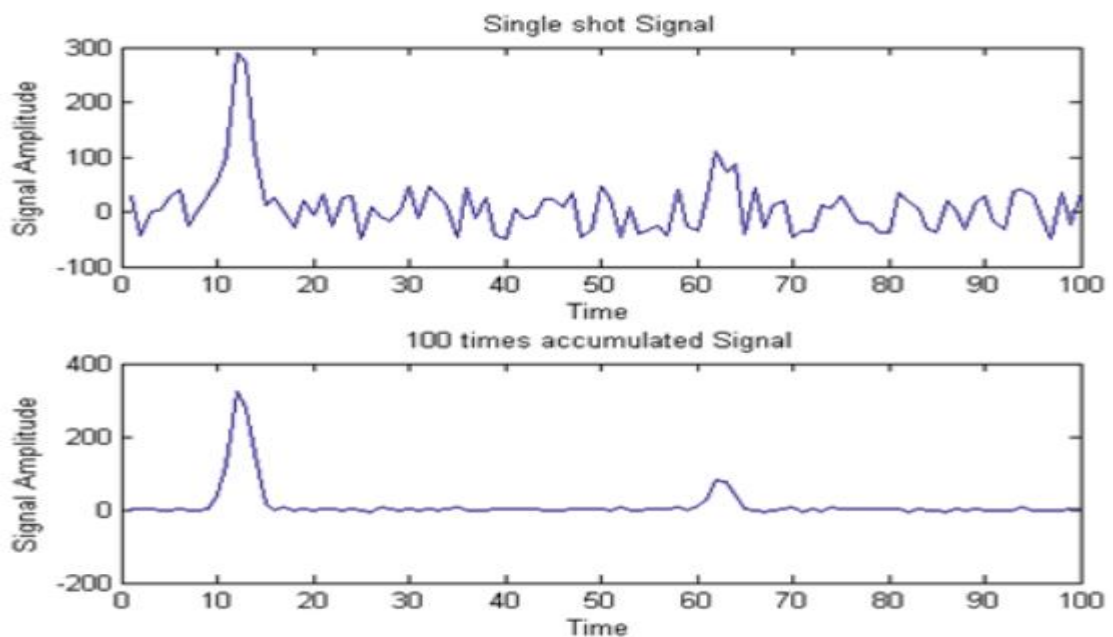
Kuva 10. Koaksiaalisen kamerasisällävä kaukoputken rakenne [15].

Laitteessa on myös toinen kamera, joka toimii yleisnäkymäkamerana, jota ei tule käyttää mittaamiseen, mutta sen avulla voidaan tarkastella laajemalla kuvakulmalla mittausaluetta tai määrittellä laitteen näytöltä laserkeilattava alue. Määritettäessä keilausalueetta yleisnäkymäkameran kanssa tulee muistaa tehdä etäisyysmittaus ennen rajauspisteen syöttämistä parallaksivirheen poistamiseksi. Käytettävää kameraa voidaan vaihdella vaivattomasti, eikä sitä varten tarvitse keskeyttää mittaustoimintaa. Kameroita voidaan hyödyntää myös mittaustoiminnan dokumentoinnissa ottamalla

mittauskohteista kuvia, jotka voidaan linkittää mittauksiin mittaustilanteiden muistamisen tueksi. Kuviin voidaan lisäksi piirtää taikka kirjoittaa yksinkertaisella piirto-ominaisuudella huomioitavia seikkoja, joita mittausten aikana havaitaan. Kameralla parannetaan myös työskentelymukavuutta silmien väsyessä vähemmän käytettäessä näyttöruutua kuin kaukoputkea, samalla poistuu lisäksi tarve käyttää diagonaalista okulaaria mitattaessa lähellä zeniittiä olevia kohteita. [15]

4.1.2 Etäisyysmittaus

Laitteen etäisyysmittauksessa hyödynnetään kulku-aikaan perustuvaa täyden aallonmuodon analysointia, jonka etuja ovat nopeus, tarkkuus, pieni laserpiste ja pitkät mittauskantamat. Täyden aallonmuodon analysoinnissa jokaisesta lähetetystä mittauspulsista havaitaan lähtöpulssi ja pulssin palattua kohteesta havaitaan paluupulssi, joiden ajan erotuksesta laite laskee etäisyyden. Pulseja lähetetään yhden mittauksen aikana satoja, joiden paluupulssien kasaantumisen perusteella etäisyys määritellään, koska varsinkin pitkiä matkoja mitatessa kohinan määrä on merkittävä ja paluupulssia on hankala erottaa yhdestä mittauksesta (kuva 11). [15]



Kuva 11. Vertailu lähtö- ja paluupulssin erottumisesta yhden ja sadan lähetetyn pulssin perusteella [15].

Oikean mittaustuloksen varmistamiseksi laite mittaa lähtöpulssin muodon, jota verrataan paluupulssin muotoon, jonka tulee olla samanlainen tai muutoin kyseistä mittausta

ei oteta huomioon etäisyyttä määritettäessä. Mittauksen huomiotta jättäminen saattaa tapahtua tilanteessa, jossa osa lasersäteestä osuu kulkumatalla mittaukseen kuulumattomaan objektiin tai säteen tulokulma kohteeseen on liian pieni. [15]

4.1.3 Laserkeilaus

Laitteessa käytettävä etäisyysmittaustekniikka ja suuri prosessointiteho ovat eduksi käytettäessä laitteen laserkeilausominaisuutta. Laite pystyy keilaamaan 1 000 pistettä sekunnissa, ja etäisyydenmittaustekniikka mahdollistaa tietynlaisten kohteiden keilaamisen hitaalla keilausnopeudella jopa 1 000 metrin etäisyydeltä siedettävällä kohinan määrällä. Neljästä esiasetetusta keilausnopeudesta suurimpien keilausnopeuksien maksimietäisyydet jäävät kuitenkin vain 300–400 metriin. Suuren prosessointitehon avulla laitteella voi tehdä useita keilauksia eripuolilta kohdetta, joiden perusteella voidaan laskea esimerkiksi keilauskohteen tilavuus heti työmaalla ilman tietokonetta. Tehdyt keilaukset ovat samoin automaattisesti oikeassa koordinaatistossa, jos laite on orientoitu ennen keilausten aloitusta. Kohderajauksen voi tehdä joko suorakulmaisesti tai monikulmion avulla, jolloin vältetään turhien alueiden aikaa vievä keilaaminen ja nopeutetaan pistepilvien jatkokäsittelyä. [15]

Keilausten tulosta voi parantaa käyttämällä laitteesta löytyviä toimintoja, joita ovat sekoittunut pikseli -toiminto, jossa piste poistetaan, jos se saa useita arvoja lasersäteen osuessa useampaan kuin yhteen pintaan, ja vieraan havainnon poisto -toiminto, jossa pistepilvestä poistetaan ne pisteet, joiden havaintoetäisyys ei ole asetettujen etäisyysraja-arvojen sisällä. Vieraan havainnon poisto -toiminto poistaa esimerkiksi pisteet, jotka ovat syntyneet vieraan kappaleen liikkeessä keilattavan alueen edessä keilausten aikana. Keilausten lopputuloksena saadun pistepilven väritys voidaan määrittää vastaamaan pisteiden intensiteetti-arvoja, keilauskohteesta otetun valokuvan värejä tai jotain yksittäistä väriä. Intensiteetti-arvot kertovat kohteesta heijastuneen paluusignaalin voimakkuuden pistekohtaisesti, valokuvasta johdettujen värien kanssa saadaan todennukainen väritys pistepilven ja yksittäistä väriä käytettäessä erotetaan helposti erillisten keilausten alueet. [15]

4.1.4 GNSS-mittaus

Laitteen kantokahvan voi irroittaa, ja tilalle voidaan liittää GNSS-vastaanotin, jonka avulla multistationin paikka voidaan määrittää satelliittien kanssa. GNSS-yhteyksien avulla laitteella voi mitata sellaisissa paikoissa, joissa ei ole tunnettuja pisteitä lähettyvillä tai niitä ei pystytä käyttämään ja joissa GNSS-mittauksella saadut pisteet täyttävät tarkkuusvaatimukset. Esimerkiksi maanmittauksessa käytettävien rajamerkkien sijainnin määrittäminen voidaan suorittaa siten, että laite pystytetään paikkaan, josta ainakin yksi määritettävistä rajamerkeistä näkyy. Laitteen ensimmäisen asemapisteen tarkat koordinaatit mitataan laitteen GNSS-vastaanottimella, minkä jälkeen havaitaan seuraavan kojeaseman sijainti, jolla ei ole vielä tarkkoja koordinaatteja. Tämän jälkeen havaitaan kulma- ja etäisyysmitat näkyvillä oleviin rajamerkkeihin, jonka jälkeen laite siirretään toiselle kojeasemalle. Toisella kojeasemalla pisteelle havaitaan tarkat koordinaatit GNSS-vastaanottimella ja orientointi suoritetaan ensimmäiselle asemapisteele, jolloin aikaisemmin mitattujen pisteiden satunnaiset koordinaatit muuntuvat laitteessa olevan mittausohjelman avulla oikeiksi. [15; 17.]

4.2 Leica P20

Leica P20 -laserkeilaimella (kuva 12) pystytään keilaamaan jopa miljoona pistettä sekunnissa, ja sen maksimikantama on 120 metriä. Etäisyysmittauksessa hyödynnetään kulkuajan sekä täyden aallonmuodon analysointimenetelmiä, jolloin päästään parempiin etäisyysmittaustarkkuuksiin. Tarkkuutta parantavat myös laitteesta löytyvät kompensattorit sekä kalibroittoiminto, jonka avulla laitteen käyttäjä voi kenttäolosuhteissa korjata laitteen kollimaatio- ja indeksivirheen, etäisyysmittauksen nollapistevirheen ja tasaimen virheen, jolloin laitetta ei tarvitse lähettää laitevalmistajan huoltoon toimenpiteitä varten. [9; 13; 16.]



P20:n tekniset tiedot	
Mitat (SxLxK)	238 mm x 358 mm x 395 mm
Paino ilman akkuja	11,9 kg
Kulmalukutarkkuus	8'' Hz ja V
3D mittaustarkkuus	3 mm @ 50 m; 6 mm @ 100 m
Etäisyyskohina	±0,4 mm @ 10 m ±1,5 mm @ 100 m
Keilausalue	360 ° Hz ja 270 ° V
Suojaus ja käyttölämpötila	IP54, -20 °C...+50 °C
Muisti	Sisäinen 256 GB SSD-kiintolevy, ulkoinen USB
Tiedonsiirtomenetelmät	Ethernet, WLAN ja USB

Kuva 12. Leica P20 ja sen tekniset tiedot. [9;16.]

Keilaamiseen käytettävä aika vaihtelee alle minuutista yli puoleentoista tuntiin sen mukaan, kuinka tiheä ja laadukas pistepilvi tarvitaan keilaimen sisältäessä seitsemän esiasetettua pistetiheysluokkaa sekä neljä laatuluokkaa. Keilaimessa on myös 5 megapikselin koaksiaalinen kamera, jonka avulla keilattuihin pisteisiin voidaan liittää väriarvot valokuvasta automaattisesti kerätyn intensiteettiarvon lisäksi. Laitteen virtalähteenä toimivat sisäiset akut, joita laitteeseen mahtuu kaksi kerrallaan, muita vaihtoehtoja ovat isompi ulkoinen akku ja ulkoinen virtalähde. Käyttöaika kahden sisäisen akun kanssa on 7 tuntia ja ulkoisen kanssa 8,5 tuntia, minkä lisäksi akkuja voidaan vaihtaa yksitellen laitteen ollessa päällä. Hallinta suoritetaan laitteessa olevalta VGA-tason kosketusnäytöltä, jonka lisäksi voidaan käyttää tiettyjä mobiililaitteita ja maastotallentimia sekä tietokonetta, jotka muodostavat yhteyden laitteeseen langattoman verkon tai verkkokaapelin avulla. [9; 16.]

5 Käytännön testaus

5.1 Keilauskohde

Työn keilauskohdeena toimi STX Finland Oy:n Turun telakalla rakenteilla olleen risteilyaluksen peräpään potkuriakselikannattimien ja peräsimien alue. Potkureiden akseleita kannattelevat laivan kummallakin puolella kaksi laivan pohjaan kiinnitettyä valuosaa sekä akseleiden pohjan läpivientien valuosat. Kohteen varsinainen laserkeilaus oli tilattu ulkopuoliselta alihankkijalta, jonka tekemä laserkeilaus sekä testimielessä tehdyt laserkeilaukset tapahtuivat vain päiviä ennen vesillelaskua, osaltaan pakon sanelemana, toisaalta ajatuksena saada mahdollisimman totuudenmukainen kuva valujen sijainnista ennen vesillelaskua.

5.2 Keilauksen tarkoitus

Työssä tehtyjen testikeilauksien tarkoituksena oli selvittää MS50:n laserkeilauskykyä haastavissa olosuhteissa P20-keilaimen toimiessa verrokkilaitteena sekä hankkia alihankkijalta tilatun keilauksen tapaan geometriatietoa potkureita kannattavista valuosista ja aluksen peräsimistä rungonkoonnin päättyessä. Potkureita kannattavissa valuosissa ja aluksen peräsimissä olevat sijainti- ja kulmavirheet voivat johtaa muutoksiin virtauksissa aiheuttaen muun muassa kavitaatiota. Kavitaatiossa vesi höyrystyy paineen alenemisen seurauksena muodostaen kavitaatiokuplan, joka paineen kohotessa muuttuu takaisin vedeksi ja aiheuttaa paineiskun. Tämä ilmiö lisää tärinän ja melun määrää sekä aiheuttaa potkurien kulumista. Kaikki kavitaatiotyypit eivät kuitenkaan ole aina vaarallisia, mutta jos potkurin lavassa oleva levykavitaatio on epästabili tai potkurin lavan levykavitaatioon vaikuttavat virtauksien voimakkaat turbulenssit, saattaa siitä seurata kuplakavitaatiota. [23; 29.]

5.3 Mittausympäristö ja virhelähteet

Mittausympäristö (kuva 13) oli haastava, koska mittauksia jouduttiin suorittamaan laivan peräpään alla suojapeitteillä suojatussa tilassa, jossa oli vielä pystyssä olevia rakennustelineitä sekä muita esteitä. Työympäristö oli myös hankala altaan pohjalla olleen rakennus- ja pakkausmateriaalin sekä veden takia, mistä syntyi vaara, että mitta-

laite olisi voinut liikkua, jos se olisi vahingossa pystytetty epästabiliin paikkaan johtaen heikentyneeseen keilaustarkkuuteen. Tilan valaistus oli heikko, mikä vaikeutti erityisesti MS50:n orientointia, koska orientoinnissa käytettävät tarraprismat eivät näkyneet kunnolla hämärässä ja niiden mittauksessa tarvittiin avuksi taskulampun valoa, jotta ne erottuisivat paremmin taustasta.

Suojapeitteet aiheuttivat ongelmia myös laivakoordinaatistoon pääsemisessä, koska peitteet estivät suoran näkyvyyden kuiva-altaan reunoilla sijaitseville pilareille, jotka ovat laivakoordinaatiston tarkkoja kiinteitä pisteitä. Jotta keilaukset saatiin laivakoordinaatistoon, tuli laivakoordinaatisto tuoda takymetrimittauksella keilausalueelle, jossa kartoitettiin kolme prismatarraa. Nämä kolme prismatarraa toimivat MS50:n keilauksia edeltäneissä orientoinneissa liitospisteinä, jolloin MS50:llä pystyttiin kartoittamaan myös P20:n keilauksissa käytetyt paperitähykset. Prismatarrojen koordinaattien tuontiin ja niiden avulla tehtyyn orientointiin ja paperitähysten kartoitukseen liittyy virhemahdollisuuksia, koska prismatarrojen koordinaatit jouduttiin tuomaan teltan sisälle piikkimäisesti. Piikkimäisessä tuonnissa prismatarrojen mittaamiseen tarkoitettun kojeaseman koordinaatit voivat olla virheelliset tuontitavan takia, koska kojeaseman pistettä ei ole pystytty sitomaan tunnettuihin laivakoordinaatistopisteisiin, jolloin siihen on kasautunut tuonnista aiheutuneita virheitä.



Kuva 13. Keilaus oli haastava pimeyden, kosteuden, keilauskohteen pinnan ja hyvien kojeasemien vähyyden takia.

Lämpötilaerot aiheuttivat oman virhemahdollisuuden laivakoordinaatiston tuonnissa peitteen sisäpuolelle, koska lämpötilat eivät olleet samanlaiset peitteen kummallakin puolella lämmittimien puhaltaessa peitteen sisäpuolella. Lämpötilaerot voivat vaikuttaa mittauksien lopputulokseen, jos mittauksia suoritetaan kahden selkeästi erilämpöisen alueen välillä. Voidaan kuitenkin olettaa, että lämpötilaero ei ollut niin merkittävä, että siitä olisi aiheutunut virhettä koordinaatiston tuonnissa. Ilman kosteusprosentti oli myös keilausten aikana suuri keilauspäivälle sattuneen sateen ja alkutalven kostean ilmanalan takia, mikä loi oman virhemahdollisuuden keilaukseen.

Laivan pohjassa oleva erikoismaali, jonka tarkoituksena on estää erilaisten merenelävien tarttuminen laivan pohjaan sekä helpottaa puhdistamista, aiheutti ongelmia keila-

uksessa MS50:lle, joka ei saanut aina riittävän vahvaa paluusignaalia laserin heijastuksessa heikosti pienessä kulmassa olevista rakenteista. Paras tulos saatiin, kun keilattava kohde oli kohtisuoraan tai lähes kohtisuoraan mittalaitetta vasten. Akselinkannattimet olivat ongelmallisia keilata lisäksi sen takia, koska ne olivat niin korkealla, että niiden yläosia ei pystytty keilaamaan altaan pohjan tasolta.

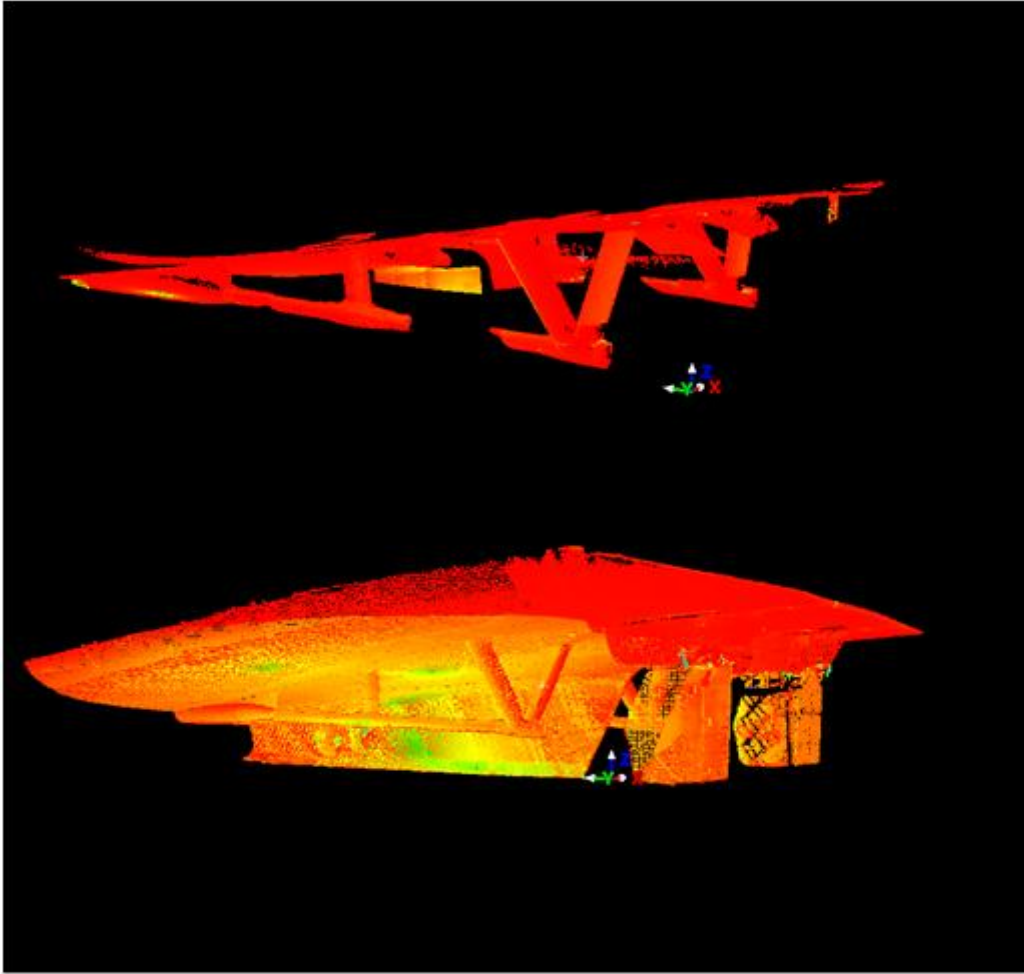
6 Tulosten tarkastelu

6.1 Käytetyt ohjelmat

Aineistokäsittelyssä käytettiin Leica Cyclone -ohjelmaa sekä 3DReshaperia, jotka ovat kumpikin ruotsalaisen mittausalan yrityksen Hexagon AB:n tuotteita, jonka omistukseen muun muassa Leica Geosystems kuuluu. Cyclone on suurien pistepilvien sujuvaan käsittelyyn suunniteltu ohjelma, jolla pystytään tekemään suurin osa pistepilvien käsittelyyn liittyvistä tehtävistä. 3DReshaper on samoin pistepilvien käsittelyyn suunniteltu ohjelma, jonka pääkäyttökohteita ovat pistepilvien käsittely, 3D-kolmioverkon luonti, kolmiulotteinen vertailu ja CAD-mallien luonti.

6.2 Aineistojen käsittely

Pistepilvien käsittely suoritettiin Leican Cyclone-ohjelmalla, jonka avulla Leica Nova MS50:n keilauksien pistepilvet (kuva 14) yhdistettiin keskenään ja georeferoitiin takymetrimittauksella alueelle tuotujen laivakoordinaatiston pisteiden kanssa. P20:n keilaukset (kuva 14) yhdistettiin samoin keskenään ja georeferoitiin laivakoordinaatistoon MS50:n kanssa tehtyjen kartoitusten avulla, joissa P20:n tarvitsemat paperiset tähykset kartoitettiin samalla, kun MS50 orientoitiin laserkeilauksia varten.



Kuva 14. MS50 (ylh.) ja P20 (alh.) muokkaamattomat pistepilvet, joista on poistettu ylimääräiset pisteet Leica Cyclonessa.

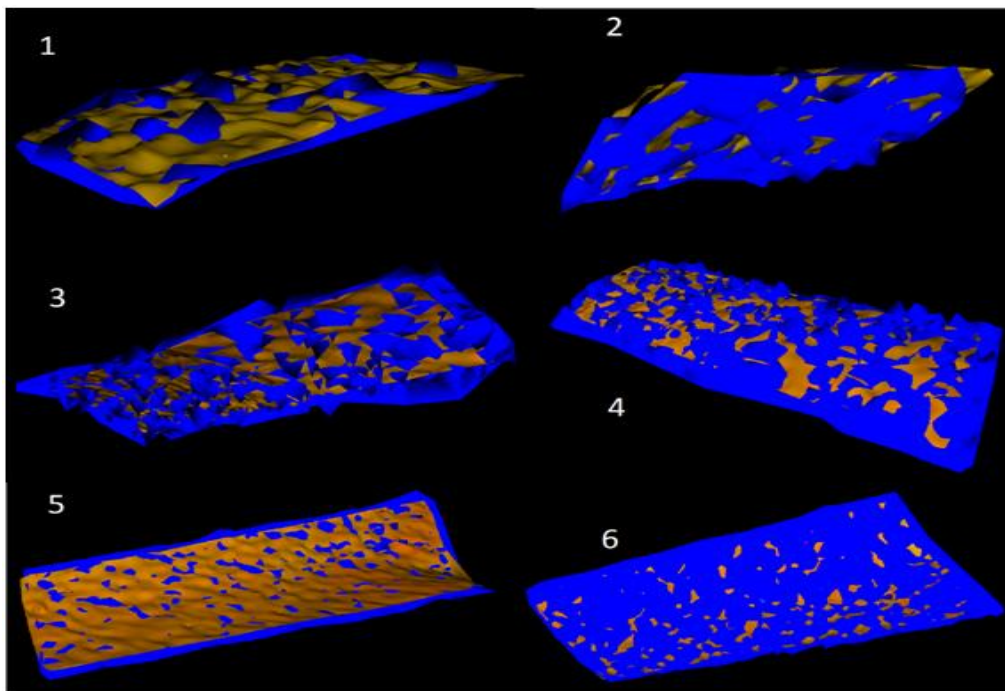
MS50:n pistepilvet sopivat hyvin keilausalueelle tuotuun koordinaatistoon georeferointivirheen ollessa tähyksestä riippuen 2—4 mm (liite 1). P20:n aineisto oli sisäisesti tarkka (liite 2), tähyksien rekisteröintivirheiden oltua 2 mm keilausalueen kummallakin puolella ja puolia yhdessä tarkasteltaessa 1 mm (liite 3). Keilaukset eivät kuitenkaan sovi tuotuun koordinaatistoon yhtä hyvin georeferoinnissa tähyksille laskettujen virheiden ollessa 3—8 mm (liite 4). Syynä heikkoon georeferoinnin tulokseen ovat oletettavasti tähyksien kartoituksessa tapahtuneet virheet ja olosuhteista osittain johtunut huono mittausgeometria.

Yhdistämisen jälkeen pistepilvistä poistettiin manuaalisesti tarpeettomat pisteet, jotka edustivat rakennustelineitä, kaapeleita ja letkuja, suojapeitteitä sekä muita tarkastelussa tarpeettomien alueiden pisteitä. Tarpeettomien pisteiden poistamisen jälkeen P20:n aineistolle suoritettiin harvennus pistepilviaineiston keventämiseksi, sen sisällettyä alun

perin noin 600 miljoonaa pistettä, kuitenkin geometrisiä ominaisuuksia heikentämättä. Harvennuksen lopputuloksena saatiin pistepilvi, jossa oli 25 % alkuperäisestä pistemäärästä, eli noin 150 miljoonaa pistettä. MS50:n aineistolle ei tarvinnut tehdä samanlaista harvennusta sen ollessa alun perin vähemmän pisteitä sisältävä aineisto pienemmän keilauspinta-alan ja pistetiheyden vuoksi. Lopuksi aineistoista luotiin PTS-formaatissa olevat tiedostot 3DReshaperissa tapahtuvaa jatkokäsittelyä varten.

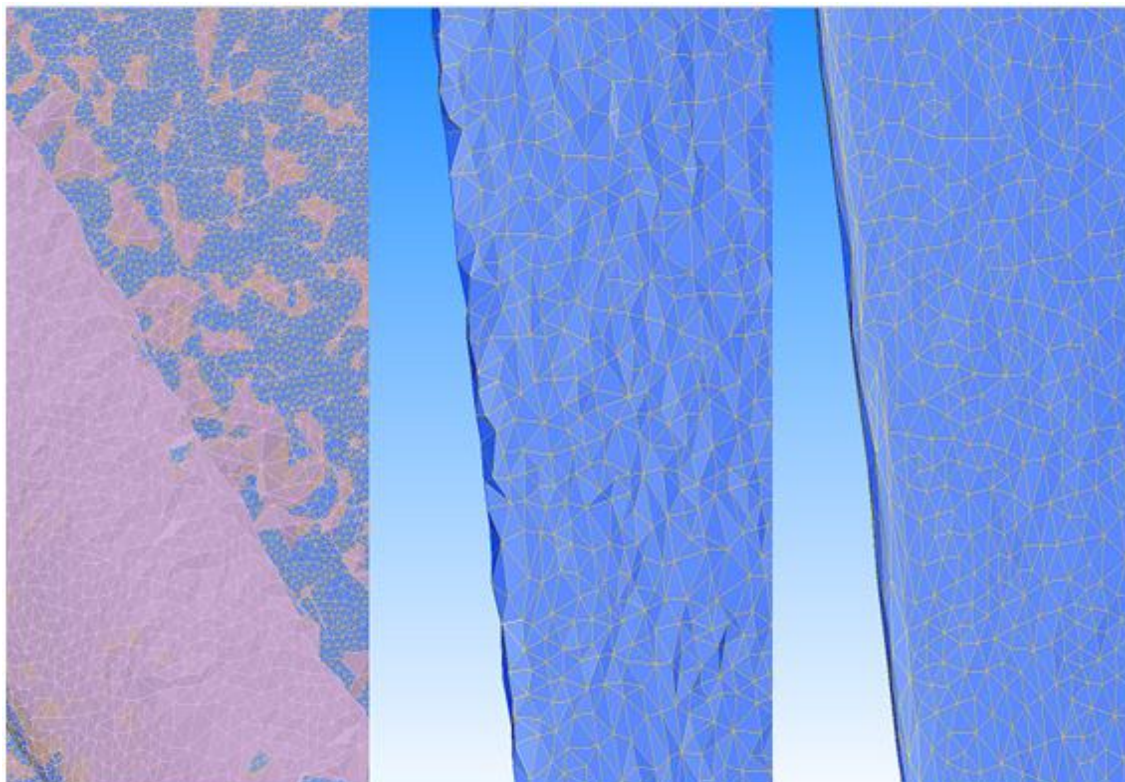
6.3 Aineistojen vertailu

Cyclone-ohjelmalla pystyttiin tarkastelemaan alueellisesti pienien pistepilven eroja leikkaamalla sama kohta kummastakin aineistosta ja kääntämällä kyseiset leikkaukset koordinaatiston pysty akselin suuntaiseksi, jonka jälkeen pinnat kolmioitiin sekä suoritettiin vertailu. Kolmen eri alueen tarkastelussa huomattiin, että MS50:n pisteissä oli suurempi hajonta (kuva 15), joka johtui todennäköisesti keilauskohteen pinnassa olleesta erikoispohjamaalista, josta MS50 ei saanut yhtä hyvää paluusignaalia kuin P20. Myös laivojen laserkeilauksia suorittavassa yrityksessä on huomattu kasvanutta pisteiden hajontaa erikoispohjamaaleilla käsitellyillä pinnoilla, mitä on saatu vähennettyä keilausasemien määrää lisäämällä. [30]



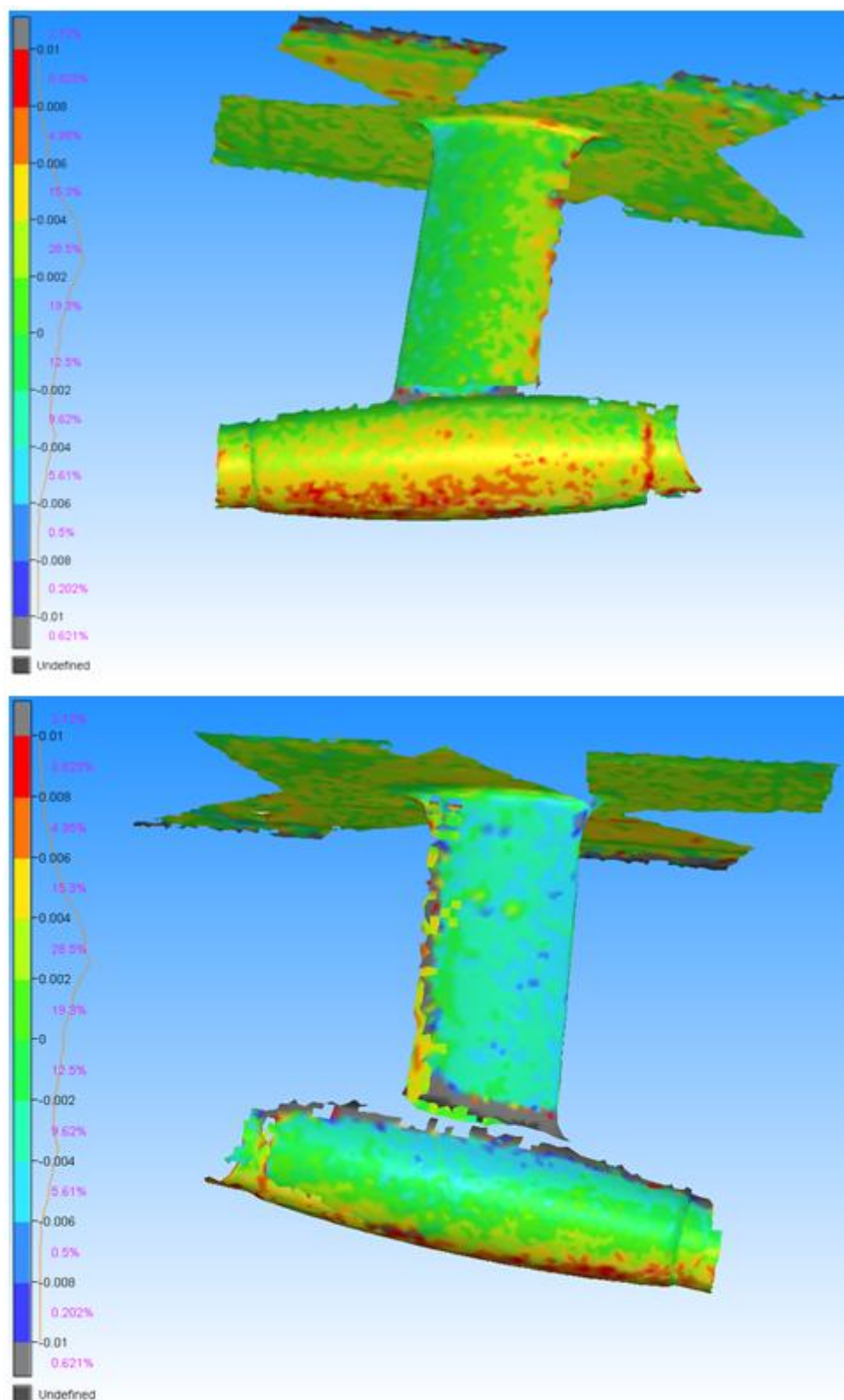
Kuva 15. MS50- (sininen) ja P20 (keltainen) -laitteiden pistepilvien analysointituloksia Cyclo-nessa.

Varsinainen pistepilviaineistojen vertailu suoritettiin 3DReshaper-ohjelmalla, jonne sekä MS50:n ja P20:n aineistot tuotiin. Ohjelmalla suoritettiin pistepilvien 3D-kolmioverkon luonti, jota ei pystytty tekemään Cyclonen puolella sujuvasti ohjelman kolmioverkkoluonnin sopiessa huonosti 3D-kappaleiden tarkasteluun. 3DReshaperissa kolmioverkkojen luonnin jälkeen suoritettiin kolmioverkon tasoitus (kuva 16), jolla pyrittiin vähentämään pisteiden hajontojen vaikutusta kolmioverkoissa todellisuutta paremmin vastaavan lopputuloksen aikaansaamiseksi.

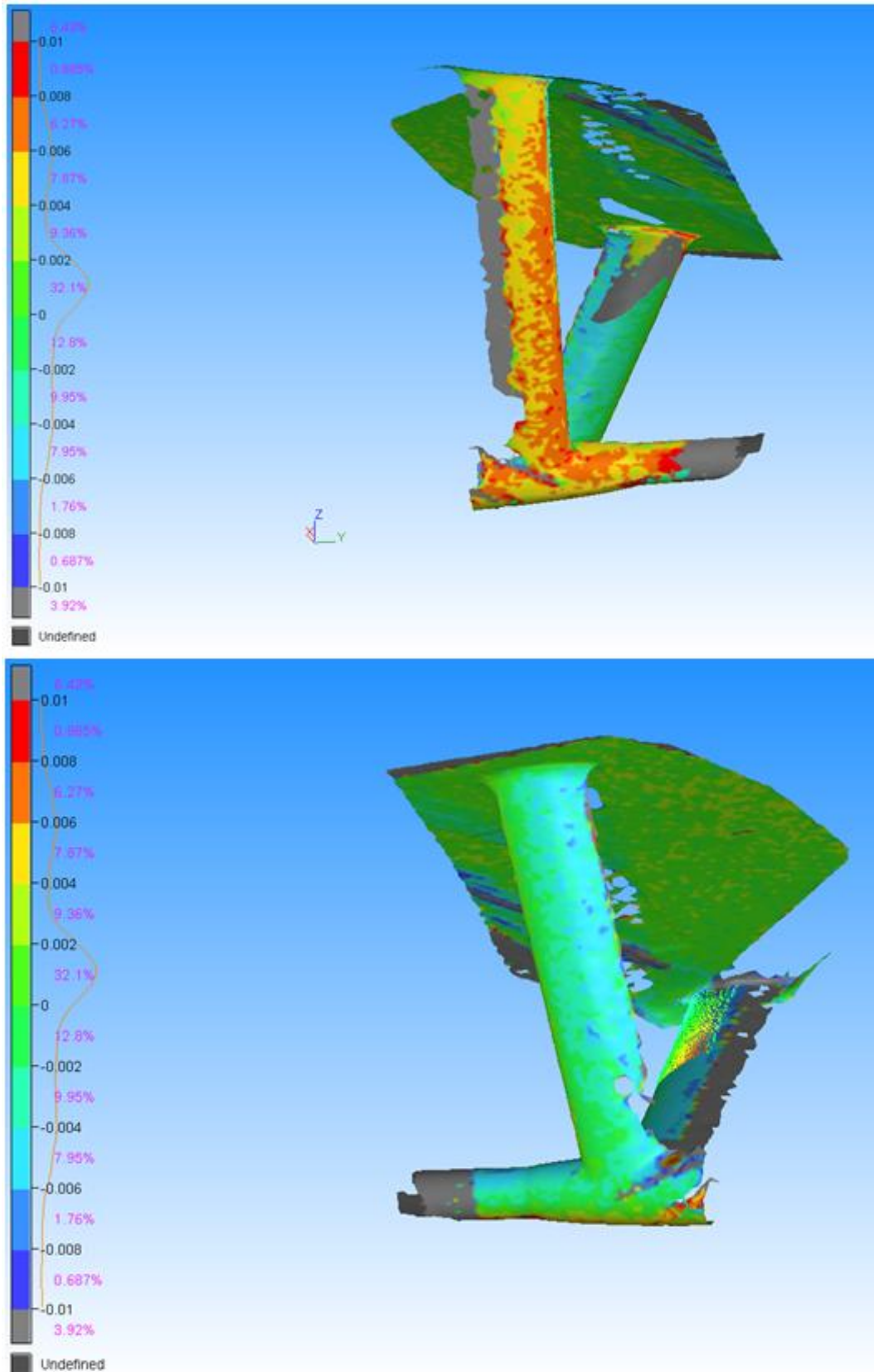


Kuva 16. Vasemmalla vertailukuva MS50:n ja P20:n aineistojen kolmioverkkojen tiheydestä (P20:n verkko tiheämpi), keskellä tasoittamaton MS50:n kolmioverkko ja oikealla tasoitettu.

Kummankin aineiston pistepilvien kolmioinnin ja tasoituksen jälkeen suoritettiin viimeisenä vaiheena kolmioverkkojen keskinäinen vertailu sekä poikkeamien värjääminen, jossa määritettiin värit ± 1 cm poikkeamien välille (kuvat 17 ja 18). Vertailussa selvisi, että MS50:n aineisto oli yhtenevä P20:n aineiston kanssa pistepilvien georeferoinnin eroista huolimatta. MS50:n kolmioverkosta noin 65—70 % oli ± 4 mm:n etäisyydellä P20:n vertailukolmioverkosta.

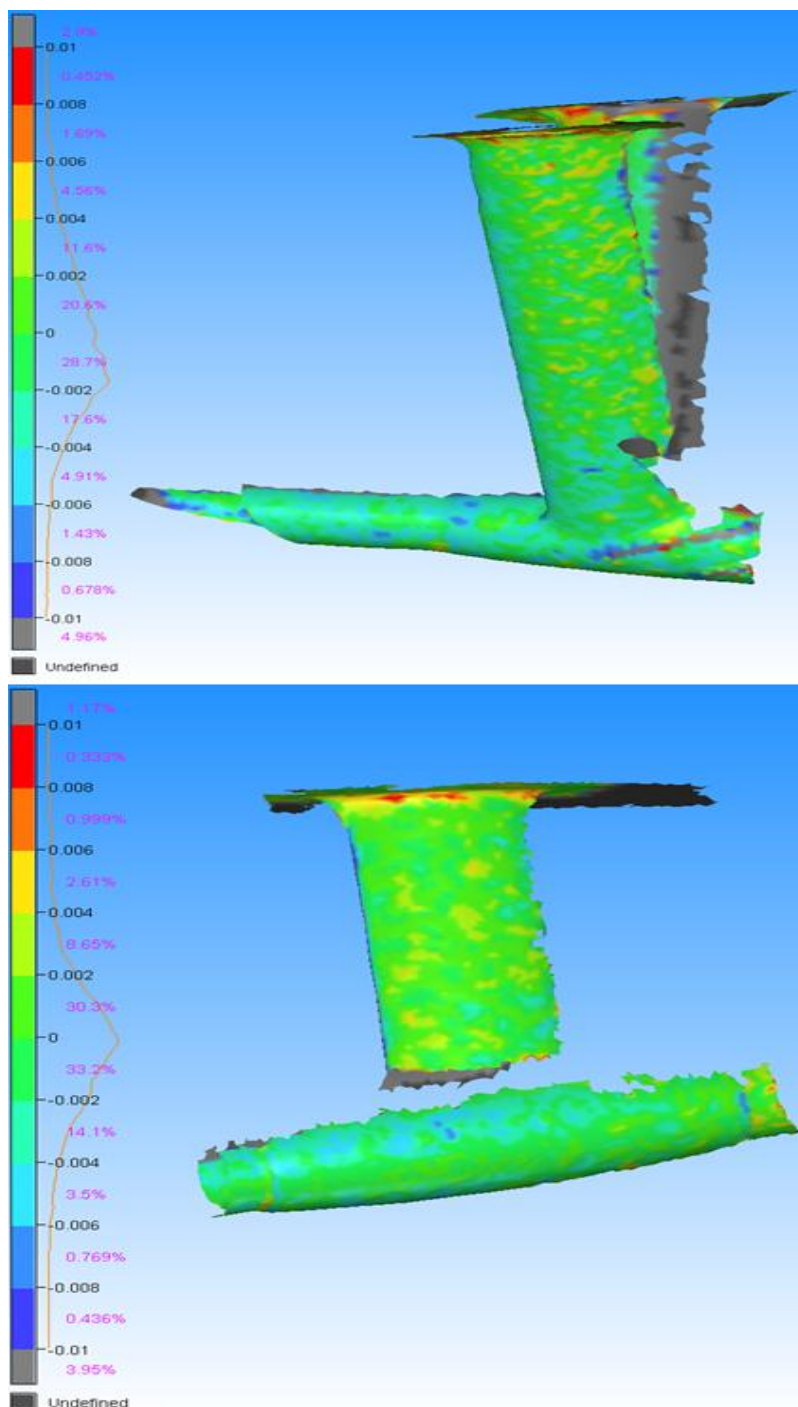


Kuva 17. S-puolen akselinkannattimen alueen georeferoitujen kolmioverkkojen vertailu, jossa MS50:n aineisto värjättyinä.



Kuva 18. P-puolen akselinkannattimen alueen georeferoitujen kolmioverkkojen vertailu, jossa MS50:n aineisto värjätty.

Kannattimien kolmioverkkoja sovitettiin toisiinsa myös best fit -menetelmällä, jonka lopputulos oli odotetunmukaisesti parempi kuin georeferoitujen kolmioverkkojen vertailussa. Best fit -menetelmässä (kuva 19) suurempi osa MS50:n kolmioverkosta oli ± 2 mm:n etäisyydellä ja kolmioverkosta kokonaisuudessaan noin 80—85 % oli ± 4 mm:n etäisyydellä P20:n vertailukolmioverkosta.



Kuva 19. Best fit -toiminnolla tehty sovitus kolmioverkkojen kesken.

Saatujen tulosten perusteella MS50:llä saadaan luotettavaa keilausaineistoa, jota voidaan käyttää laivan geometrian selvittämiseen. Niin georeferoidun aineiston kuin best fit -menetelmän analyyseissa pystyttiin kuitenkin havaitsemaan suurempia hajontoja MS50:n pistepilvissä, jolla ei ole kuitenkaan kovin suurta merkitystä selvittäessä laivan toteutunutta geometriaa akselinkannattimien sijaintien ja kulmien ollessa tärkeimmät tekijät.

7 Yhteenveto

Turun telakan mittausosasto oli kiinnostunut selvittämään markkinoille juuri saapuneen Leica MS50:n keilausominaisuuksia sen sopiessa tarkkuuksien puolesta muutoin telakkamittauksiin. Keilauskohteeksi valittiin telakalla rakenteilla olleen laivan peräpään akselinkannattimien ja peräsimien alue, tarkoituksena selvittää MS50:n laserkeilausominaisuuksien ohella laivan geometrian toteutumista rungonkoonnin päättyessä.

Aineistoille tehtyjen analyysien perusteella MS50:llä kerätty aineisto oli yhtenevä P20:n aineiston kanssa, eikä siinä ollut säännöllisiä merkittäviä poikkeamia pistepilvistä muodostettujen tasoitettujen kolmioverkkojen best fit -sovituksessa P20:n aineistoon verrattaessa. MS50:llä tehtyjä keilauksia voitaisiin siis tämän vertailun perusteella hyödyntää geometrian toteutumisen analysoinnissa, koska analysoinnissa rakenteiden sijaintien ja kulmien eroavuudet suunnitelmista merkitsevät enemmän, kuin pintojen pisteiden hajonnasta johtuvat epätasaisuudet. Vertailussa olisi todennäköisesti voitu päästä parempaan lopputulokseen, jos MS50:n keilausosastojen määrää olisi lisätty tässä työssä käytetystä seitsemästä. Tällöin pisteissä olisi todennäköisesti vähemmän hajontaa ja kappaleiden mallintamiseen käytettävät pistepilvet olisivat eheämpiä.

Merkittävin rajoittava seikka MS50:n keilaimen käytölle on keilauksiin ja pistepilvien käsittelyyn kulunut aika. MS50:llä pystytään keilaamaan noin puolentoista tunnin aikana vain kriittisimmät alueet P20:n suoriutuessa tehtävästä noin 20–30 minuutissa keilaten samalla laitteen näkökentän alueet kokonaisuudessaan. Tämän takia MS50:tä ei voi hyödyntää suurien alueiden tarkoissa keilauksissa mielekkäällä tavalla, mikä voi olla merkittävä kynnyksysymys telakkateollisuudessa ja erityisesti Turun telakalla, joka on erikoistunut rakentamaan offshore-aluksia, autolautoja ja suuria risteilijöitä. Käsittelyyn kuluva aika voi olla merkittävä riippuen halutuista lopputuloksista, mutta voidaan sanoa, että käsittelyyn kuluu moninkertainen määrä aikaa verrattuna itse keilaamiseen.

Kiireisiä käsittelytehtäviä voi olla hankala sovittaa tietyn henkilön työmäärään tarvittavana ajankohtana, eikä työtä tekemään voi palkata henkilöä töiden kokonaismäärän vähäisyyden vuoksi. Pistepilviaineiston käsittelyssä tarvitaan lisäksi myös siihen tarkoitukseen suunniteltuja ohjelmia, joiden lisenssit voivat tuntua liian kalliilta verrattuna niiden hyödyntämisen määrään.

Lähteet

Kirjalliset

- 1 Cronvall Timo, Kråknäs Pasi, Turkka Tommi. 2012. Tutkimus. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Helsinki. Liikennevirasto.
- 2 Frequently Asked Questions. 2014. Verkkodokumentti. International Maritime Organization. <<http://www.imo.org/About/Pages/FAQs.aspx>> Luettu 15.1.2014.
- 3 Gustafsson, Mikko. 2003. Opinnäytetyö. Turun AMK. Laivarungon mittatarkkuuden hallinta.
- 4 Helsingin telakka kokonaan venäläiseen omistukseen. 28.10.2013. Verkkouutinen. Helsingin Sanomat. <<http://www.hs.fi/talous/a1382931080415>> Luettu 10.12.2013.
- 5 ISO Standards on course to support aims of IMO World Maritime Day. 2007. Verkkodokumentti. ISO. <http://www.iso.org/iso/home/news_index/news_archive/news.htm?refid=Ref1080> Luettu 6.2.2014.
- 6 Joala, Vahur. 2006. PDF-dokumentti. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Leica Nilomark Oy.
- 7 Joala, Vahur. 2010. PowerPoint-esitys. Laserkeilaukoulun. Leica Geosystems Oy.
- 8 Joala, Vahur. 2013. PowerPoint-esitys. Leica HDS. Leica Geosystems Oy.
- 9 Joala, Vahur. 2013. PowerPoint-esitys. Leica MS50 Multistation ja P20 Laserkeilain - ainutlaatuiset luokassaan. Leica Geosystems Oy.
- 10 Koillisväylä. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Koillisv%C3%A4yl%C3%A4>> Luettu 10.12.2013.
- 11 Koski, Jarkko. 2001. Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. Artikkel. Maankäyttö, 4/2001, s. 24—26.
- 12 Kuronen, Janne. 2001. Diplomityö. TKK. Tutkimus laivan mittatarkkuuteen vaikuttavista tekijöistä.
- 13 Laine, Herkko. 2013. Insinöörityö. Metropolia AMK. Maalaserskannerin hankintaselvitys Helsingin rakentamispalvelu Staralle.

- 14 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Tornion kirjapaino.
- 15 Leica Nova MS50 White paper. 9/2013. Esite. Leica Geosystems AG.
- 16 Leica ScanStation P20. 2013. Tekniset tiedot. Leica Geosystems AG.
- 17 Leica Viva SmartStation. Verkkodokumentti. Leica Geosystems. <http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Viva-SmartStation_86729.htm> Luettu 3.3.2014.
- 18 Metalliteollisuuden raskassarjalainen STX Finland Oy sillanrakentajana. 2/2011. Verkko uutinen. TeollisuusNyt. <<http://www.teollisuusnyt.fi/fi/artikkelit/metalliteollisuuden-raskassarjalainen-stx-finland-oy-sillanrakentajana>> Luettu 10.12.2013.
- 19 Morais Denis, Waldie Mark, Larkins Darren. 2/2012. Driving the Adoption of Cutting Edge Technology in Shipbuilding. White paper.
- 20 Musta maanantai: STX:n Rauman telakka lopetetaan. 16.9.2013. Verkko uutinen. Yle. <http://yle.fi/uutiset/musta_maanantai_stxn_rauman_telakka_lopetetaan/6832688> Luettu 10.12.2013.
- 21 Rakennuksen tietomalli. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia. <http://fi.wikipedia.org/wiki/Rakennuksen_tietomalli> Luettu 7.3.2014.
- 22 Reijonen, Marko. 2013. Insinööriyö. Metropolia AMK. Turun telakan runkotuotannon kutistumakerrointen päivitysprosessi.
- 23 Räisänen, Pekka. 1997. Laivatekniikka – Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 24 STX Finland -book. 2013. PDF-dokumentti. STX Finland. <<http://www.stxeurope.com/media/Documents/STX%20Finland%20-book.pdf>>.
- 25 STX Finland etsii tukijalkaa tuulivoimaloiden perustuksista. 18.6.2013. Verkko uutinen. Turun Sanomat. <<http://www.ts.fi/uutiset/talous/499644/STX+Finland+etsii+tukijalkaa+tuulivoimaloiden+perustuksista>> Luettu 10.12.2013.
- 26 Valtio päättää telakkatuesta puun ja kuoren välissä. 18.12.2012. Verkko uutinen. Taloussanomat. <<http://www.taloussanomat.fi/politiikka/2012/12/18/valtio-paattaa-telakka-tuesta-puun-ja-kuoren-valissa/201243982/12>> Luettu 10.12.2012.
- 27 Wikman, Esa. 2010. Takymetri – Mittaustyökalu moneen käyttöön. Artikkel. Maankäyttö, 4/2010, s. 18—20.

- 28 Yle: STX:n Turun telakka menetti Scandlines-tilauksen. 17.2.2014. Verkkouutinen. Taloussanomat. <<http://www.taloussanomat.fi/teollisuustuotteet/2014/02/17/yle-stxn-turun-telakka-menetti-scandlines-tilauksen/20142382/12>> Luettu 27.2.2014.

Suulliset

- 29 Reijonen, Marko mittausinsinööri. Kurtti, Joonas hydrodynaamikko. Keskustelu. 28.1.2014.

Nauhoitteet

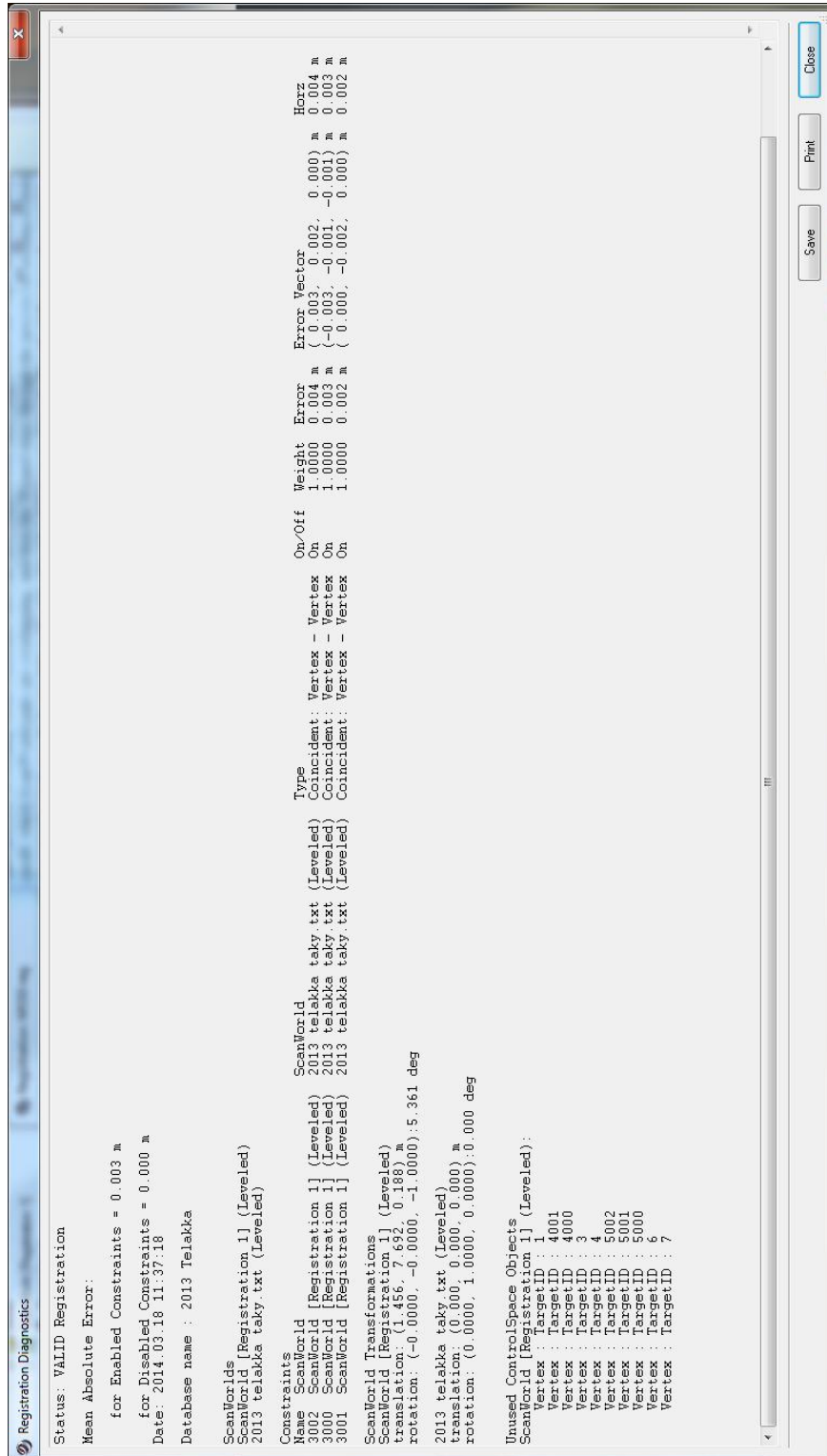
- 30 3D Laser Scanning for the boatbuilding industry. 2013. Webkonferenssinauhoite. Work Boat.

Kuvat

- 31 Leica Geosystems Oy. <<http://www.leica-geosystems.fi/fi/index.htm>> Luettu 28.2.2014.
- 32 Download Center. STX Europe. <<http://www.stxeurope.com/media/Media%20Downloads/Media%20Downloads/STX%20Finland/STX%20Finland%20Shipyard/Turun%20telakka%202.jpg>> Luettu 10.12.2013.
- 33 Download Center. STX Europe. <<http://www.stxeurope.com/media/Media%20Downloads/Media%20Downloads/STX%20Finland/Aura%20I/Aura%20I.JPG>> Luettu 10.12.2013.
- 34 Download Center. STX Europe. <http://www.stxeurope.com/media/Media%20Downloads/Media%20Downloads/STX%20Finland/NB-1383%20TUI%20Cruises/TUI_Mein%20Schiff%203_1.jpg> Luettu 10.12.2013.

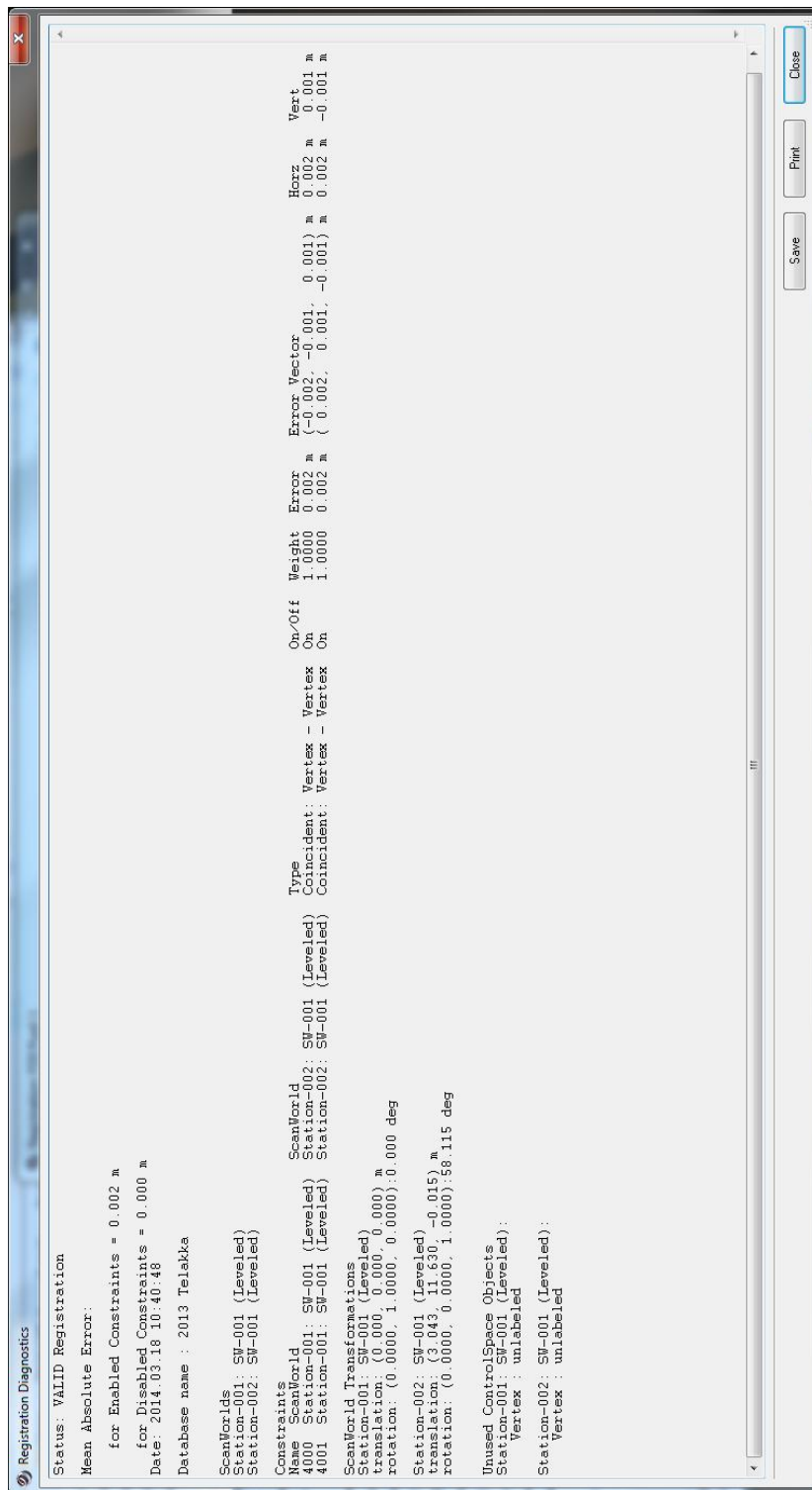
Liite 1. MS50:n laserkeilauksien georeferoinnin tulos

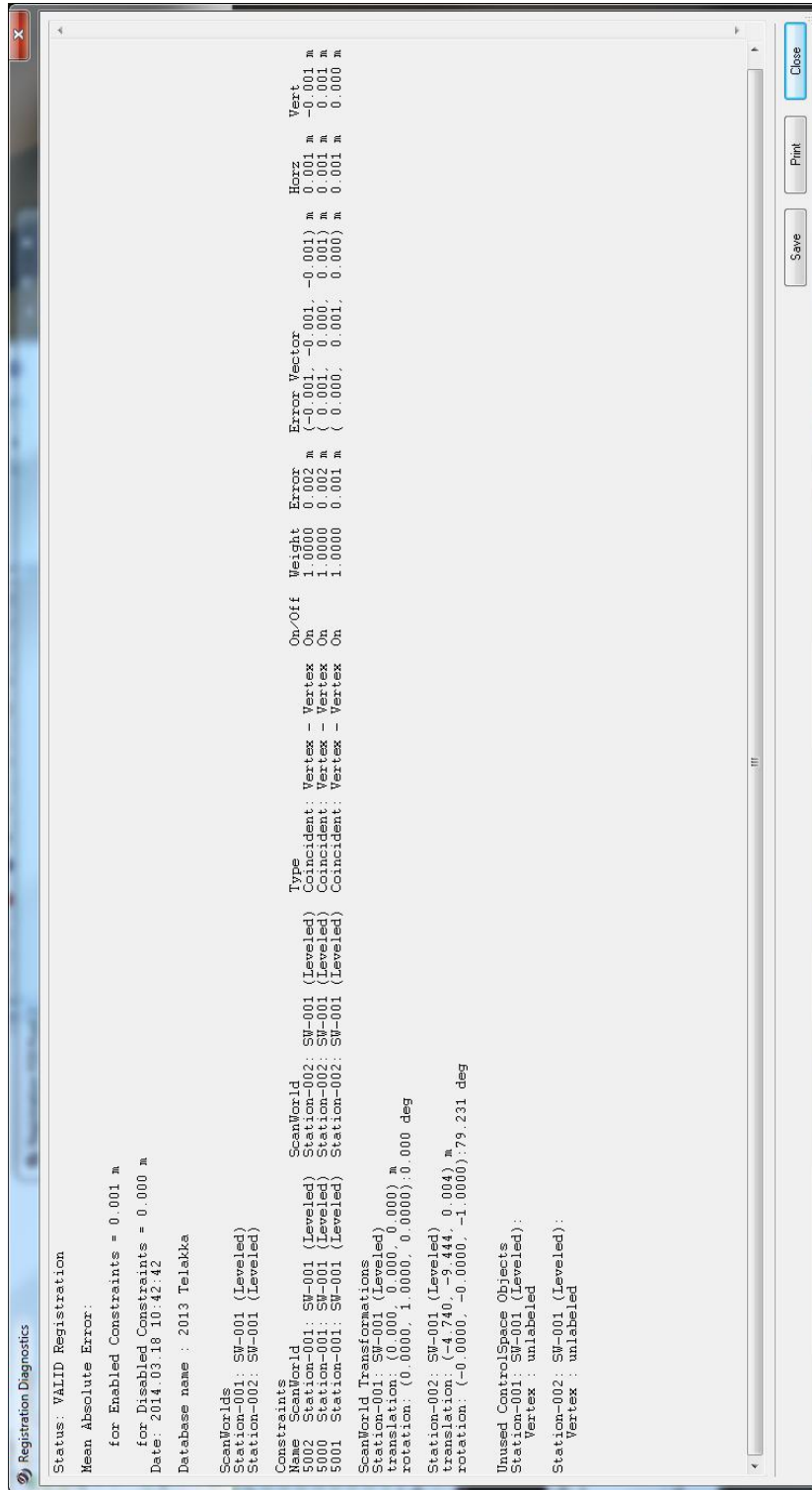
Yhdistettyjen laserkeilauksien georeferoinnin tulos.



Liite 2. P20:n laserkeilauksien kummankin puolen yhteensopivuudet

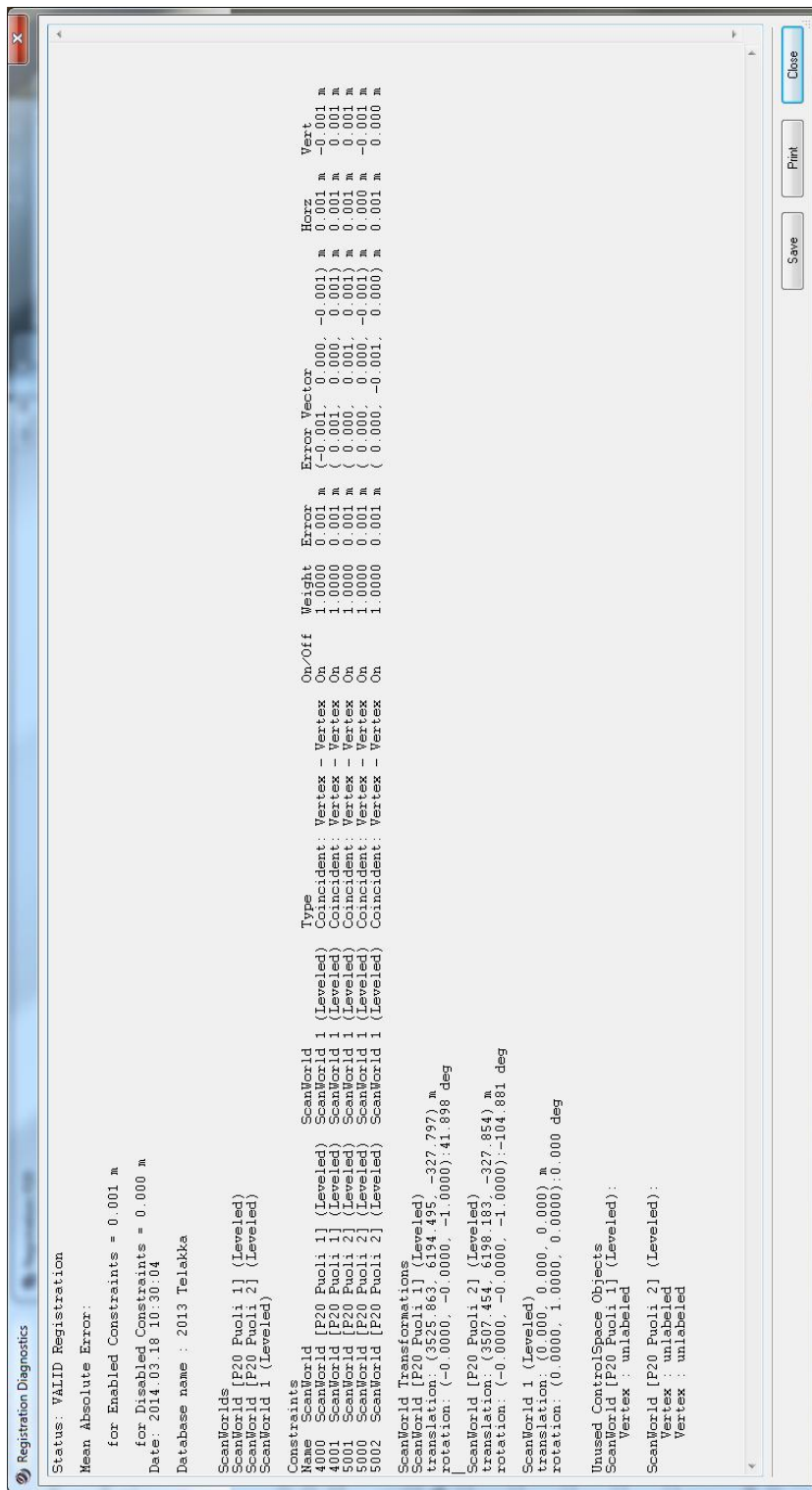
Aluksen pohjan laserkeilauksien kummankin puolen erilliset yhteensopivuudet.





Liite 3. P20:n laserkeilauksien kokonaisyhteensopivuus

Aluksen pohjan kummankin puolen laserkeilauksien yhteensopivuus.



Liite 4. P20:n laserkeilauksien georeferoinnin tulos

Yhdistettyjen laserkeilauksien georeferoinnin tulos.

