

Olli Leirimaa

Monikeilaus- ja mobiililaserkeilausaineistojen yhdistäminen vesirakenteiden mittauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinööryö

18.11.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Olli Leirimaa Monikeilaus- ja mobiililaserkeilausaineistojen yhdistäminen vesirakenteiden mittauksessa 37 sivua 18.11.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaaja	yliopettaja Vesa Rope
<p>Tässä tutkimuksessa selvitetään monikeilausta ja mobiililaserkeilausta sekä niiden yhdistämistä yhtenäiseksi 3D-malliksi. Tutkimus keskittyy veneestä käsin tehtäviin mittauksiin vesirakenteiden mittauksessa. Tutkimuksessa selvitetään, miten monikeilaus- ja mobiililaserkeilausaineistoja kerätään ja mihin tarkoituksiin saatuja tuloksia voidaan käyttää. Lisäksi tutkitaan, mitä lisäarvoa monikeilaus ja laserkeilaus tuovat rakenteiden kartoitukseen ja miten menetelmät ovat kehittyneet.</p> <p>Aluksi käydään läpi GNSS-paikannusta, sillä se kuuluu oleellisena osana sekä monikeilaukseen että mobiililaserkeilaukseen. Tämän jälkeen käsitellään monikeilausta ja mobiililaserkeilausta omina kokonaisuuksinaan. Laserkeilauksessa keskitytään veneestä käsin tapahtuvaan mobiililaserkeilaukseen. Lopuksi tarkastellaan aineistojen yhdistämistä ja siitä saatavia hyötyjä sekä sovelluksia.</p> <p>Monikeilaamalla ja mobiililaserkeilaamalla saadaan nopeasti, tehokkaasti ja tarkasti kuva rakenteiden kunnosta ja pohjan muodoista. Nämä aineistot yhdistämällä nähdään paremmin laajempi kokonaisuus ja osataan hahmottaa ongelmakohtat. Aiempaan hitaaseen tutkimiseen verrattuna uudet menetelmät ovat kustannustehokkaampia ja mahdollistavat tulosten monimuotoisemman jatkokäytön.</p>	
Avainsanat	monikeilaus, mobiililaserkeilaus, merenmittaus, paikantaminen, GNSS, GPS

Author Title Number of Pages Date	Olli Leirimaa Combining multibeam echo sounding and mobile laser scanning data in civil engineering measurements 37 pages 18 November 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructor	Vesa Rope, Principal Lecturer
<p>This Bachelor's thesis explored multibeam echo sounding and mobile laser scanning, and how to combine them into a single 3D model. The thesis focused on vessel based, civil engineering measurements. The final year project studied the collection of multibeam echo sounding data and mobile laser scanning data, and the purposes the data can be used for. Furthermore, the additional value provided by multibeam echo sounding and mobile laser scanning to civil engineering, as well as the development strategies of the methods were looked into.</p> <p>For the project, a literature research was conducted. Personal experience from work projects was also used to the fullest. In the thesis, information from various scientific articles, publications and books was combined with the experience.</p> <p>Multibeam echo sounding and mobile laser scanning allow a rapid and efficient creation of an accurate picture of structures and seabed. By combining these data sets, a larger area can be seen and problematic areas can be recognized. Compared to the earlier slow exploration, the new methods are more cost-effective and allow a more diverse use of the results.</p>	
Keywords	multibeam echo sounding, mobile laser scanning, hydrographic surveys, positioning, GNSS, GPS

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoite	1
1.3	Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	2
2	Paikantaminen	2
2.1	Absoluuttinen paikannus	2
2.2	DGPS	3
2.2.1	VRS	4
2.2.2	Differentiaalikorjauspalvelut Suomessa	5
2.3	RTK	6
2.4	IMU	8
2.5	Paikannuksen virhelähteet	10
3	Monikeilaus	13
3.1	Monikeilausmenetelmät ja -laitteistot	13
3.2	Monikeilaus rakenteiden kuvaamisessa	15
4	Mobiililaserkeilaus	16
4.1	Laserkeilausmenetelmät ja -laitteistot	16
4.2	Mobiililaserkeilaus rakenteiden kuvaamisessa	19
5	Aineistojen yhdistäminen	21
5.1	Aineistojen yhdistämisen hyödyt	27
5.2	Sovellukset	27
5.2.1	Ruoppaus	27
5.2.2	Vesirakennelmat	28
5.2.3	Dockland-rakennus	29
5.2.4	Koehlbrand-pengerrys	32
6	Johtopäätökset	35
	Lähteet	36

Lyhenteet

3D	3 Dimensional. Kolmiulotteinen
C/A-koodi	Coarse/Acquisition-koodi. Salaamaton koodi.
DGPS	Differential Global Positioning System. Differentiaalinen GPS on menetelmä, jossa käytetään tunnettua tukiasemaa paikannuksen tarkentamiseksi.
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System. Maanmittauslaitoksen tarjoama differentiaalikorjauspalvelu, joka tarjoaa korjaukset GPS- ja Glonass-satelliiteille.
DOP	Dilution Of Precision. Satelliittigeometrian hyvyys/huonous ilmaistaan DOP-luvuilla.
EPN	EUREF Permanent Network. Euroopan pysyvä GPS-verkko.
GDOP	Geometric Dilution Of Precision. Geometrinen DOP.
GNSS	Global Navigation Satellite System. Yleisnimitys paikannusjärjestelmille, jossa käytetään myös muita satelliittipaikannusjärjestelmiä kuin GPS.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltain armeijan ylläpitämä paikannusjärjestelmä.
HCU	HafenCity University Hamburg. Hampurin yliopisto.
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision. Horisontaalinen DOP
IGS	International GNSS Service. Kansainvälinen GNSS-palvelu, joka tarjoaa GNSS-dataa, tuotteita ja palveluita.

IMU	Inertial Measurement Unit. Elektroninen laite, joka mittaa nopeutta, asentoa ja gravitaatiovoimia kiihtyvyyssanturien ja gyroskooppien avulla
LAN	Local Area Network. Lähiverkko
MBES	Multi-Beam Echo-Sounder. Monikanavainen kaikuluotain, eli monikeilain, on akustinen mittaussuunnitelma, jossa mitataan usean äänipulssin kulkemaa matkaa vedessä.
NMEA	National Marine Electronics Association. Yhdysvalloista lähtöisin oleva merielektroniikkaorganisaatio, jonka standardeista on muodostunut kansainvälisiä standardeja.
NTRIP	Network Transport of RTCM via Internet Protocol. Protokolla, jolla siirretään DGPS-dattaa internetin välityksellä.
OTF-menetelmä	On-The-Fly-menetelmä. Menetelmä, jossa ratkaistaan reaaliaikaisesti tarkka sijainti.
PDOP	Positional Dilution Of Precision. Sijainnin DOP.
PPS	Pulse Per Second. Pulssia sekunnissa
PRR	Pulse Repetition Rate. Pulssin toistotaajuus.
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime services. Kansainvälinen standardointiorganisaatio.
RTK	Real Time Kinematic. Reaaliaikainen kinemaattinen paikannus, jossa tukiasema lähettää omat vaihehavaintonsa vastaanottimelle, joka laskee erotushavaintojen avulla tarkan sijainnin.
SVP	Sound Velocity Profile. Äänennopeusprofiili, jota käytetään veden eri kerrosten äänennopeuden määrittämiseksi.

TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol. Internetliikenteessä käytettävien tietoverkkoprotokollien yhdistelmä.
TDOP	Time Dilution Of Precision. Ajan DOP.
TLS	Terrestrial Laser Scanner. Maalaserkeilain, jota voidaan käyttää kolmijalalta tai alukseen kiinnitettynä. Mittaa lähettämiensä lasersäteiden heijastuman etäisyyden ja voimakkuuden.
VDOP	Vertical Dilution Of Precision. Vertikaalinen DOP.
VRS	Virtual Reference Station. VRS-mittauksessa vastaanottimen paikka lasketaan kiinteiden tukiasemien avulla laskentakeskuksessa.

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Merenmittaus ja siinä käytettävät laitteistot ovat kehittyneet viime aikoina huomattavasti. Uudet laitteet mahdollistavat uusien ja tehokkaampien menetelmien käyttämisen yhä useammassa sovelluksessa. Monikeilaus eli monikanavainen kaikuluotaus on yleistynyt yhtenä menetelmänä nykyaikaisessa merenmittauksessa. Monikeilaamalla saadaan huomattavasti enemmän ja tarkempaa tietoa kuin aiemmilla laitteistoilla on saatu. Aiemmin merenmittausta on tehty perinteisellä kaikuluotauksella, jolloin dataa on saatu ainoastaan pieneltä alueelta kerrallaan. Monikeilausta on alettu käyttää myös vedenalaisten rakenteiden mittaamisessa, kuvaamisessa ja kuntokartoituksessa. Tämä on huomattavasti nopeampaa ja tehokkaampaa kuin esimerkiksi sukeltajien avulla tehtävä kuntokartoitus. Monikeilaamalla saadaan kuitenkin tietoa vain vedenalaisesta maailmasta. Mobiililaserkeilaamalla voidaan mallintaa samasta kohteesta vedenpäällinen osa. Yhdistämällä nämä aineistot saadaan kokonaisvaltaisempi kuva mittaushetkestä sekä nopeasti ja tehokkaasti kuva infrastruktuurin kunnosta ja pohjan muodoista. Yhdistettyä dataa voidaan käyttää myöhemmin avuksi rakenteiden ylläpidossa, suunnittelussa ja rakentamisessa. Ongelmaksi saattavat muodostua monikeilaus- ja mobiililaserkeilausaineistojen yhdistäminen toisiinsa tarkasti sekä hankalat mittausolosuhteet ja -kohteet.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten monikeilaus- ja laserkeilausaineistoja yhdistetään ja mihin yhdistämisestä saatua aineistoa käytetään. Tutkimuksessa selvitetään, mitä lisäarvoa monikeilaus ja laserkeilaus tuovat rakenteiden kartoitukseen ja miten menetelmät ovat parantuneet. Lisäksi tutkitaan, miten monikeilaus- ja laserkeilausaineistoja kerätään ja mihin lopputuloksia käytetään.

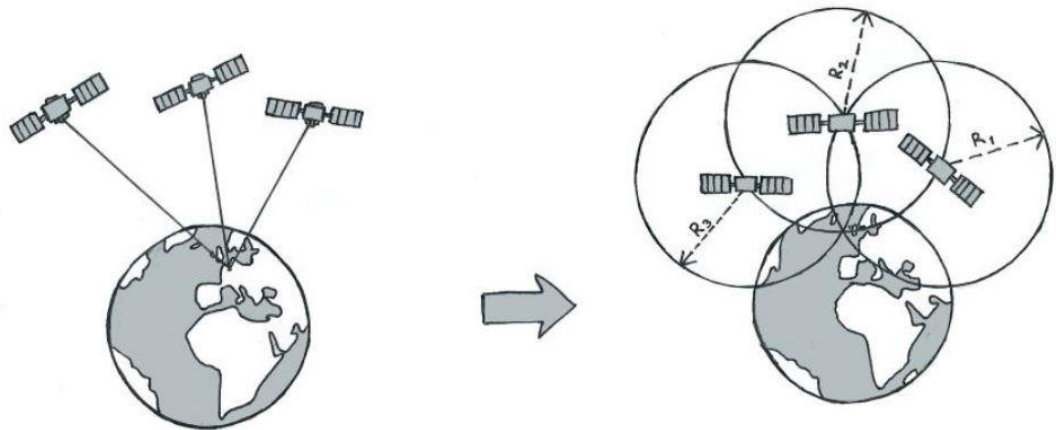
1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimus tehdään kirjallisuustutkimuksena. Tutkimus on jatkoa Olli Leirimaan aikaisemmin kirjoittamaan kandidaatintyöhön Aalto-yliopistossa. Työssä käsitellään aluksi paikantamista yleisesti sekä sen käyttöä mittauksessa. Paikannusta käsitellään ensimmäisenä, koska se on olennainen osa sekä monikeilausta että laserkeilausta. Tämän jälkeen käsitellään monikeilausta ja mobiililaserkeilausta omina kokonaisuuksinaan. Laserkeilauksessa keskitytään veneestä käsin tapahtuvaan mobiililaserkeilaukseen. Lopuksi tarkastellaan aineistojen yhdistämistä ja siitä saatavia hyötyjä sekä sovelluksia.

2 Paikantaminen

2.1 Absoluuttinen paikannus

Useimmat paikannuksen käyttäjät saavat sijaintinsa absoluuttisesta paikannuksesta. Siinä GNSS-vastaanotin (Global Navigation Satellite System) saa satelliitilta C/A-koodihavaintoja (Coarse/Acquisition), joista se saa selville signaalin kulkuajan. Kulkuajasta saadaan laskettua vastaanottimen etäisyys satelliittiin. Vastaanotin tarvitsee etäisyydet vähintään kolmeen satelliittiin laskeakseen sijaintinsa kolmiomittauksella (kuva 1). Neljännestä satelliitista saadaan paikantimen kellon käyntivirhe, jolloin vastaanottimen paikka tarkentuu huomattavasti. (Laurila 2010: 302–303.) Käytännössä mittauksissa tarvitaan kuitenkin useampia satelliitteja, jotta paikannuksen tarkkuus saadaan riittäväksi. Tällöin yksittäisten satelliittien häviäminen vastaanottimen näkyvistä ei myöskään haittaa.

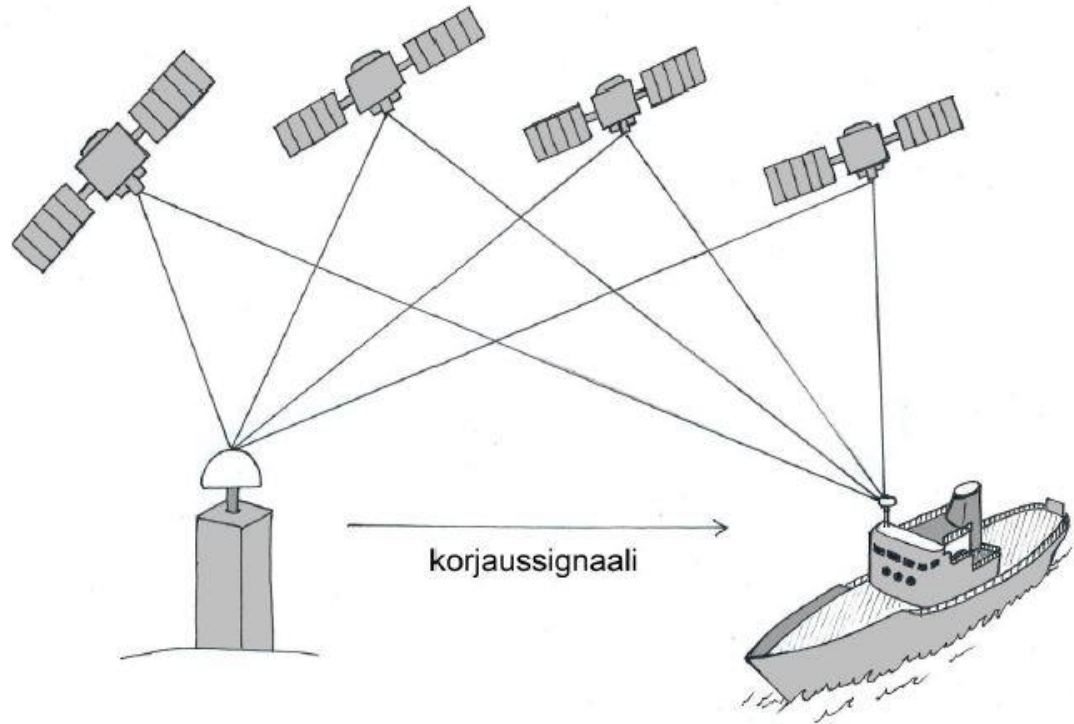


Kuva 1. Absoluuttisen paikannuksen periaate (Toivonen 2013).

2.2 DGPS

DGPS eli differentiaali-GPS on paikannusmenetelmä, jossa käytetään oman paikan saamiseksi tarkasti paikannettuja kiinteitä maa-asemia eli tukiasemia. Mittaajan vastaanotin laskee omaa sijaintiaan absoluuttisen paikantamisen menetelmällä C/A-koodin avulla. Tukiasema laskee sekä tunnetun että havaitsemansa etäisyyden avulla jokaiselle satelliitille korjauksen. Havaitun ja lasketun etäisyyden erotuksena saadaan havainnon virhe ja siitä korjaustieto. Tukiasema lähettää määrittämänsä paikannuksen korjaustiedon mittaajan vastaanottimeen (kuva 2). Tätä etäisyyksiin tehtävää korjausta kutsutaan differentiaalikorjaukseksi. (Laurila 2010: 305–306.) Differentiaalikorjaus lähetetään vastaanottimelle joko matkapuhelimen tai radion välityksellä.

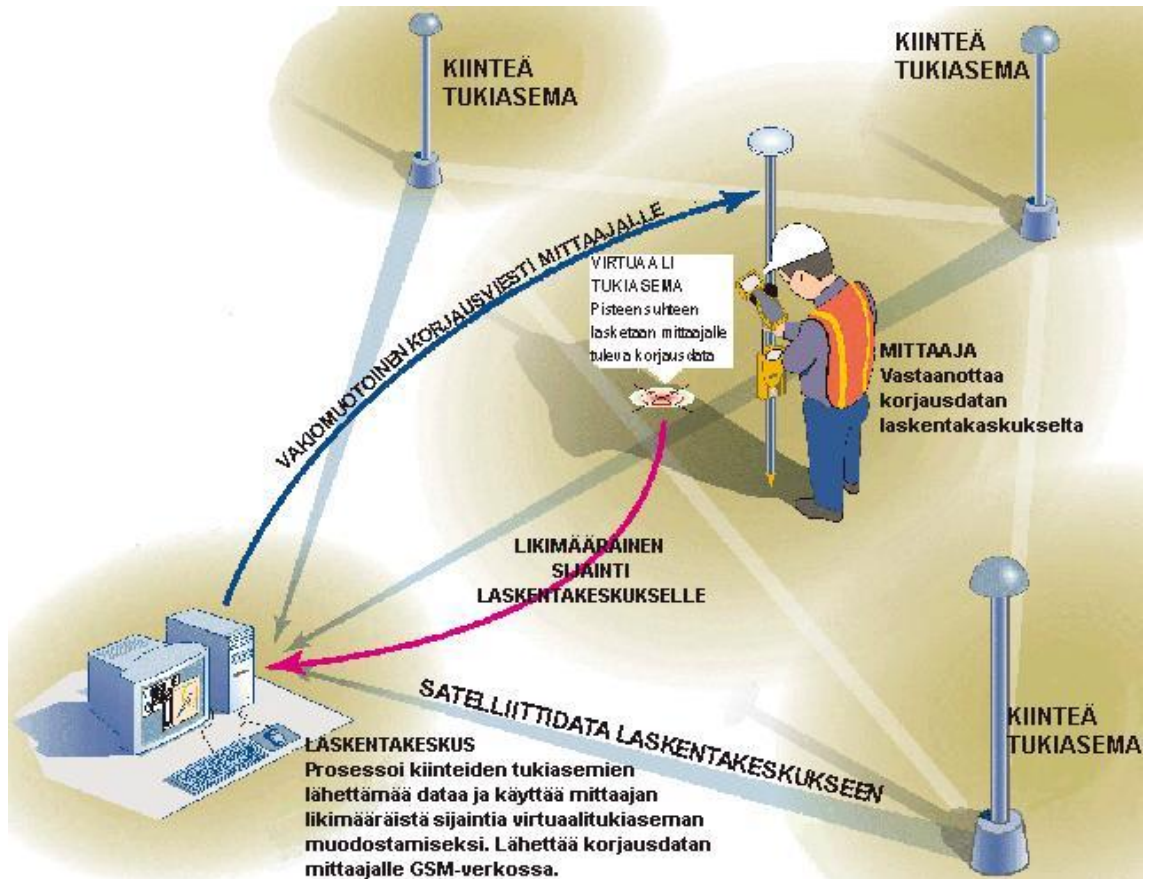
DGPS-vastaanotin laskee saamansa korjaustiedon omiin havaitsemiinsa etäisyyksiin ja saa siitä korjatut etäisyydet ja tarkan paikan. Korjausten avulla paikannustarkkuus on metriluokkaa (0,5–5 m).



Kuva 2. DGPS-periaate. Tukiasema laskee sekä tunnetun että havaitsemansa etäisyyden avulla jokaiselle satelliitille korjauksen. Tukiasema lähettää määrittämänsä paikannuksen korjaustiedon mittajaan vastaanottimeen. (Toivonen 2013.)

2.2.1 VRS

Virtuaalitukiasemakonsepti (VRS) perustuu tukiasemaverkkoon, johon on perustettu pysyviä kiinteitä GPS-tukiasemia (kuva 3). Mittaaja lähettää mittaamansa koordinaatit laskentakeskukseen NMEA-viestinä (National Marine Electronics Association). Saatuaan mittajaan koordinaatit laskentakeskus muodostaa VRS-tukiaseman mittajaan lähelle. Tätä muodostettua virtuaalitukiasemaa ei kuitenkaan ole fyysisesti olemassa. Virtuaalitukiasema saa laskentakeskukselta tukiasemaverkon avulla virtuaalista dataa. Mittaajalle laskentakeskus lähettää virtuaalista dataa esimerkiksi RTCM-formaatissa (Radio Technical Commission for Maritime services). Mittaaja voi tämän jälkeen käyttää mittauksissaan virtuaalitukiasemaa kuten tavallista RTK-tukiasemaa (Real Time Kinematic), josta on kerrottu tarkemmin seuraavassa luvussa. (Häkli & Koivula 2004.)



Kuva 3. VRS-järjestelmän toimintaperiaate (Tampereen kaupunki 2013).

2.2.2 Differentiaalikorjauspalvelut Suomessa

Suomessa on useita mahdollisuuksia saada reaaliaikaista differentiaalikorjausta. Esimerkkejä näistä ovat Geotrim Oy:n VRS-palvelu (Virtual Reference Station), Indagon Oy:n Fokus-palvelu ja Merenkulkulaitoksen palvelu, jossa korjaukset välitetään radiomajakoiden kautta. Lisäksi Leica Geosystems tarjoaa RTK-korjausta mittajalle, mikä mahdollistaa tarkemman paikannuksen ilman omaa RTK-tukiasemaa. Käyttäjällä on myös mahdollisuus itse perustaa tukiasema, josta saadaan vastaanottimelle korjaukset. (Laurila 2010: 306–307.)

Maanmittauslaitoksen paikkatietokeskus, joka aiemmin tunnettiin Geodeettisena laitoksena, on tarjonnut 30.1.2014 alkaen ilmaisen DGNSS-paikannuspalvelun. Nykyään palvelu tarjoaa differentiaalikorjaukset GPS- ja Glonass-satelliiteille. Tulevaisuudessa palvelun on tarkoitus laajentua myös eurooppalaiseen Galileo- ja kiinalaiseen BeiDou-järjestelmään. (Geodeettinen laitos 2014.) Uudistetussa FinnRef-verkossa on 20 GNSS-tukiasemaa ympäri Suomea. FinnRef-verkko kuuluu Pohjoismaiseen GNSS-verkkoon ja

osa asemista on lisäksi mukana maailmanlaajuisessa IGS-verkossa ja eurooppalaisessa EPN-verkossa. (MML Paikkatietokeskus FGI 2015.)

Paikkatietokeskuksen korjaus perustuu FinnRef-asemien havaintojen virhemallinnukseen. Mitä kauemmas yksittäisestä tukiasemasta mennään, sitä heikommaksi korjauksen tarkkuus kasvaa. Palvelun korjausdata lähetetään RTCM 2.2 -formaattissa ja sen lähetettävät datatyytit ovat 1, 3 ja 31. Taulukossa 1 on esitetty viestien sisältö ja lähetysväli. (MML Paikkatietokeskus FGI, 2015.)

Taulukko 1. Paikkatietokeskuksen DGNSS-korjausdatan viestien sisältö (MML Paikkatietokeskus FGI, 2015).

Viestityyppi	Lähetysväli	Sisältö
1	1 sek	GPS-differentiaalikorjaus
3	10 sek	GPS-tukiaseman tiedot
31	1 sek	Glionass-differentiaalikorjaus

DGNSS-palvelu toimii TCP/IP-verkossa. Palvelu käyttää NTRIP-protokollaa, joten sitä voidaan käyttää päätelaitteella, joka hallitsee tämän protokollan. Nykyisiä älypuhelimia voidaan käyttää korjausdatan datansiirtoon jos asennettuna on tarvittava ohjelma. Jos halutaan itse valita käytettävä tukiasema automaattisen valinnan sijaan, on päätelaitteen kyettävä lähettämään oma sijaintinsa NMEA-formaatissa. (MML Paikkatietokeskus FGI 2015.)

2.3 RTK

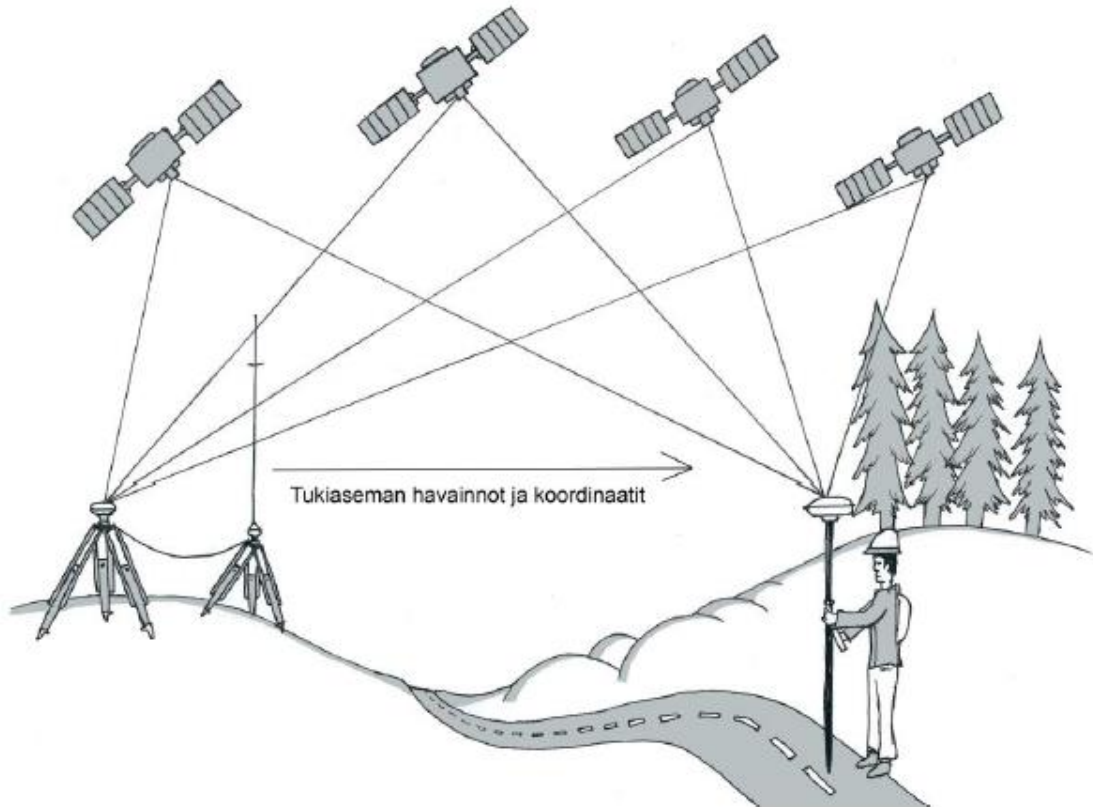
RTK on lyhenne sanoista *real time kinematic*, suomeksi reaaliaikainen kinemaattinen mittaus. RTK-mittaus sopii hyvin esimerkiksi kartoitus- ja maastomallimittauksiin, koska sillä saadaan hyvin tarkasti haluttu paikka selville. RTK-menetelmällä tehtävä paikannus on huomattavasti tarkempi kuin DGPS-paikannus.

RTK-mittauksessa käytetään esimerkiksi kolmijalalle pystytettyä maa-asemaa, joka sijaitsee tunnetulla pisteellä. Tukiasema välittää mittaamansa kantoaallon vaiheen liikkuvalla vastaanottimelle (kuva 4). Havaintosuurena käytetään siis kantoaallon vaiheen mittaamista. Menetelmässä ratkaistaan havaintojakson alkuhetkellä antennin ja

satelliitin väliin jäävät kokonaiset kantoaallon aallonpituudet, joita kutsutaan alkutuntemattomiksi. Nämä ratkaistaan RTK-mittauksissa reaaliaikaisesti, eli on-the-fly-menetelmällä (OTF). Tällä tavoin saavutetaan senttimetriluokan paikannustarkkuus. (Häkli & Koivula 2004.) Koska monessa paikassa ei ole mahdollista pystyttää tukiasemaa tunnetulle pisteelle, voidaan tukiaseman paikka määrittää DGPS:n avulla. Tällöin RTK-tukiasema pystytetään haluttuun paikkaan esimerkiksi luodolle tai laiturille. Tukiasemalle haetaan tarkka paikka DGPS-vastaanottimella käyttäen hyväksi differentiaalikorjausta. Saadut koordinaatit syötetään RTK-tukiaseman sijainniksi, jolloin tukiasema käyttää tätä sijaintia.

Tukiaseman välittämät havainnot liikkuva vastaanotin yhdistää omiin havaintoihinsa erotushavainnoiksi. Erotushavainnoilla voidaan poistaa monia paikannusvirheitä kuten satelliittien rata- ja kellovirheet, vastaanottimen kellovirhe sekä ilmakehän aiheuttamat virheet. RTK-mittauksessa pyritään ratkaisemaan tukiaseman ja vastaanottimen välinen vektori reaaliajassa. Perinteisessä mittauksessa tämä tapahtuu jälkilaskentana. (Häkli & Koivula 2004.)

Tukiaseman ja vastaanottimen välinen tiedonsiirto voidaan toteuttaa radiomodeemin tai GSM-puhelimen välityksellä. Radiomodeemilla toimintasäde on joitain kilometrejä, mutta enintään 10 kilometriä. GSM-puhelinta käytettäessä voidaan teoriassa käyttää enintään 20 km:n etäisyyksiä. Käytännön kokemusten perusteella toimintasäde on kuitenkin noin 10 km, ja vain poikkeusolosuhteissa päästään 20 km:n etäisyyksiin. Toimintasäteen ylärajan määrittävät ionosfäärin häiriöt. Tukiasemalla ja liikkuvalla vastaanottimella tulee olla seurannassa vähintään viisi yhteistä satelliittia, mutta käytännössä vasta 6–7 yhteistä satelliittia antaa riittävän luotettavan tuloksen. (Laurila 2010, 323.) Rakennetulla alueella, muilla esteisillä paikoilla sekä vesistöissä monitieheijastukset ja katvealueet saattavat haitata RTK-mittausta. Satamia ja laitureita mitattaessa on siis hyvin mahdollista, että häiriöitä esiintyy, ja siksi paikannuksen tarkkuus saattaa vaihdella paljon.



Kuva 4. RTK-periaate. RTK-mittauksessa tukiasema välittää mittaamansa kantaosion vaiheen liikkuvalla vastaanottimella ja vastaanotin yhdistää sen omiin havaintoihinsa erotushavainnoiksi. (Toivonen 2013).

2.4 IMU

Inertianavigaatiota voidaan sanoa riippumattomaksi prosessiksi liikkuvan kohteen paikan ja asennon määrittämiseksi. Paikka ja asento saadaan mitattua käyttämällä inertian vaikutusta, kun kohteen alkutilanne on hyvin tunnettu (Thies 2011). IMU-tekniikalla (Inertial measurement unit) mitataan veneen asentoa, eli kallistumaa (roll), nousukulmaa (pitch) ja suuntaa (heading). Asentoa voidaan mitata veneeseen asennetuilla kiihtyvyyssantureilla ja gyroskoopeilla. (Böder ym. 2011.)

Inertiamittaus koostuu kolmesta kohtisuoraan toisiaan nähden asennetusta gyroskoopista ja kiihtyvyyssantureista, jotka antavat tietoa kierroista ja kiihtyvyydestä, kaikilla kolmella koordinaattiakselilla. Näistä mittauksista saadaan kuusi vapaamuuttujaa, kolme kulmanopeutta ja kolme lineaarikiihtyvyyttä, joista voidaan määrittää kohteen paikka ja asento kolmiulotteisessa avaruudessa. (Thies 2011.)

Kohteen kiihtyvyys voidaan laskea kaavalla (1), jossa $x' \equiv [x'(t) \ y'(t) \ z'(t)]^T$ ovat kohteen kolmiulotteiset koordinaatit:

$$\frac{d^2 x'(t)}{dt^2} = \begin{bmatrix} \frac{d^2 x'(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 y'(t)}{dt^2} \\ \frac{d^2 z'(t)}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Kohteen asento lasketaan kaavalla:

$$R = R_3(\alpha_3)R_2(\alpha_2)R_1(\alpha_1) \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha_3 & \sin\alpha_3 & 0 \\ -\sin\alpha_3 & \cos\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha_2 & 0 & -\sin\alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha_2 & 0 & \cos\alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_1 & \sin\alpha_1 \\ 0 & -\sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\alpha_2 \cos\alpha_3 & \cos\alpha_1 \sin\alpha_3 + \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos\alpha_3 & \sin\alpha_1 \sin\alpha_3 - \cos\alpha_1 \sin\alpha_2 \cos\alpha_3 \\ -\cos\alpha_2 \sin\alpha_3 & \cos\alpha_1 \cos\alpha_3 - \sin\alpha_1 \sin\alpha_2 \sin\alpha_3 & \sin\alpha_1 \cos\alpha_3 + \cos\alpha_1 \sin\alpha_2 \sin\alpha_3 \\ \sin\alpha_2 & -\sin\alpha_1 \cos\alpha_2 & \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

eli koordinaattien välinen muunnosmatriisi on

$$x'(t_0) = R(t_0) x(t_0), \quad (5)$$

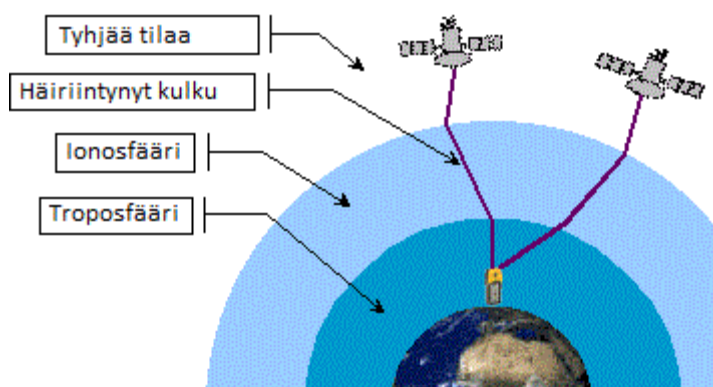
jossa x on globaalit koordinaatit ja x' kappalekohtaiset koordinaatit. Asento saadaan kolmesta tuntemattomasta $\alpha_i(t)$, $i = 1,2,3$, ajan funktioina, ja ne muuttuvat kohteen liikkessa. Asennon muutokset $\frac{d\alpha_i}{dt}$ integroidaan hetkellisen asennon $\alpha(t)$, eli $R(t)$ saamiseksi. Ensimmäisestä integroinnista saadaan kohteen nopeusvektori ja toisesta paikka.

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t [v(t_0) + \int_{t_0}^{\theta} a(\tau) d\tau] d\theta, \quad (6)$$

jossa $x(t_0)$ ja $v(t_0)$ ovat integrointivakioita. Inertianavigaatiossa paikan tarkkuus huononee, mitä pidempään mitataan. Tämä johtuu kiihtyvyyssmittausten epätarkkuudesta ja niiden virheiden kasautumisesta integroinnissa. (Vermeer 2011.)

2.5 Paikannuksen virhelähteet

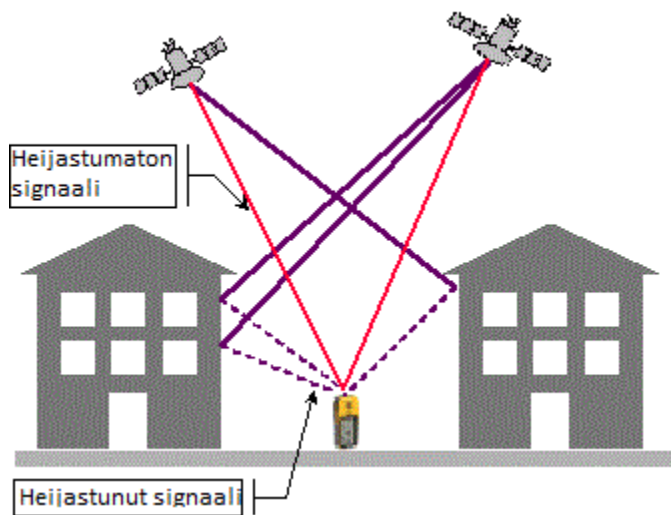
Paikannuksen tarkkuuteen voi vaikuttaa useampi häiriötekijä. Isoin virheiden aiheuttajista on ilmakehä. Signaalin kulkiessa ilmakehän läpi ilmakehän eri kerrokset vaikuttavat sen kulkuun. Ionosfääri ja troposfääri vaikuttavat satelliitin signaalin etenemisnopeuteen, jolloin signaalista laskettu etäisyys satelliittiin vääristyy (kuva 5). Myös auringon aktiivisuuden vaihtelu vaikuttaa ionosfääriin 11 vuoden jaksoissa. Ilmakehän vaikutusta tarkkuuteen voidaan parantaa esimerkiksi erilaisilla algoritmeilla ja ilmakehämalleilla. (Maanmittauslaitos 2015.)



Kuva 5. Ionosfääri ja troposfääri aiheuttavat virhettä signaalin etenemiseen (Kowoma 2015).

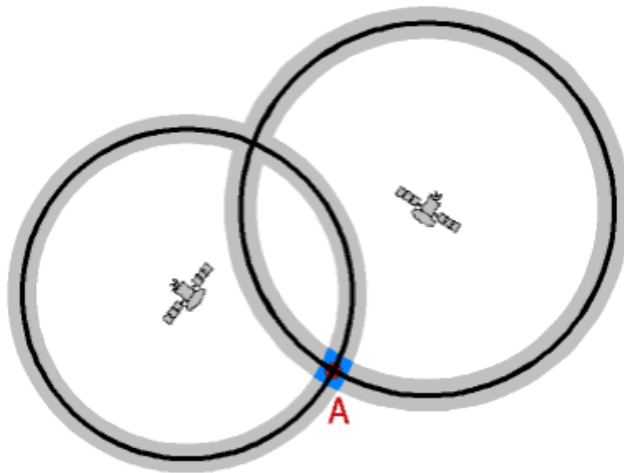
Satelliittien radanmäärityksen ja kellon virheistä johtuva paikannusvirhe on mahdollinen. Tällöin GPS-viestissä ei ole mukana satelliitin tarkkaa paikkaa, vaan Broadcast ephemeris sijainti. Radanmäärityksessä pieni virhe johtuu auringon ja kuun vetovoimasta. Tästä johtuen satelliittien ratatietoja päivitetään ja ne lähetetään vastaanottimelle säännöllisesti. Tämän takia virhe pysyy noin kahden metrin rajoissa. (Kowoma 2015.) Myös vastaanottimessa saattaa olla virheitä, jotka vaikuttavat paikannustarkkuuteen. Näitä voidaan välttää käyttämällä laadukkaampia laitteita, joissa on kehittyneempää teknologiaa.

Monitieheijastuksia aiheutuu, kun ollaan vastaanottimen kanssa esimerkiksi rakennetulla alueella, metsässä tai vuoristossa. Satelliitilta saapuva signaali heijastuu esimerkiksi rakennuksesta, jolloin siltä kestää pidempi aika saapua vastaanottimelle, kuten kuvassa 6. Monitieheijastuksia voidaan välttää valitsemalla hyvä antenni, mittauspaikka ja -aika.

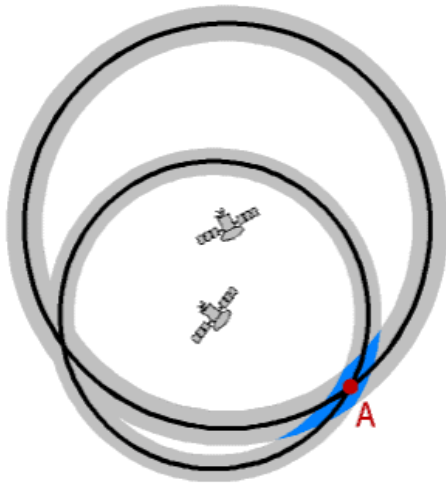


Kuva 6. Monitieheijastuksen aiheuttamia häiriöitä (Kowoma 2015).

Satelliittigeometria tarkoittaa satelliittien keskinäistä sijaintia taivaalla. Paras geometria saadaan, kun satelliitit ovat jakautuneet tasaisesti ympäri taivasta (kuva 7). Huono geometria saadaan, kun satelliitit ovat samassa suunnassa ja lähekkäin (kuva 8).



Kuva 7. Kahden satelliitin hyvä keskeinen geometria (Kowoma 2015).



Kuva 8. Kahden satelliitin huono keskeinen geometria (Kowoma 2015).

Satelliittigeometrian hyvyys tai huonous ilmaistaan DOP-luvuilla (dilution of precision). Informaatio siitä, mitä tietoja laskennassa käytetään, kerrotaan eri DOP-arvoilla.

- GDOP (Geometric Dilution Of Precision); 3D-koordinaatit ja aika
- PDOP (Positional Dilution Of Precision); 3D-koordinaatit
- HDOP (Horizontal Dilution Of Precision); 2D-koordinaatit
- VDOP (Vertical Dilution Of Precision); korkeus
- TDOP (Time Dilution Of Precision); aika

Mitä pienempi on DOP-luku, sitä parempi on paikannustarkkuus. Jos yleisimmin käytetty PDOP-arvo on alle 6, on satelliittigeometria riittävän hyvä (Maanmittauslaitos 2015).

Taulukossa 2 on esitetty virhelähteiden vaikutus mittaustarkkuuteen, kun käytössä on DGPS sekä ilman sitä.

Taulukko 2. Virhelähteiden vaikutus paikannustarkkuuteen (Jokelainen 2009).

Virhelähde	Virhe ilman DGPS:iä	Virhe DGPS:n kanssa
Ratatiedot	1,5m	0,1m
Satelliittien kellot	1,5m	0,1m
Ionosfääri	3,0m	0,2m
Troposfääri	0,7m	0,2m
Monitieheijastukset	1,0m	1,4m
Vastaanotin	0,5m	0,5m

3 Monikeilaus

Merenpohjan kuvaaminen koki mullistuksen 1940-luvulla, kun korkeataajuuksisia kaikuluotaimia alettiin kohdistaa kohti pohjaa. Ensimmäisten kaikuluotainten kuvat olivat huonoja resoluutioltaan, ja niistä pystyttiin tunnistamaan vain isoja kohteita, kuten hylkyjä. 1970- ja 1980-luvuilla akustinen elektroniikka kehittyi huomattavasti, mikä johti siihen, että signaaleja pystyttiin ohjaamaan tarkasti. Tämän seurauksena merenpohja saatiin kartoitettua hyvällä resoluutiolla. Merkittävin kehitys tapahtui kuitenkin 1990-luvulla, kun modernit tietokoneet yleistyivät. Laskentateho ja datan käsittely paranivat paljon, minkä ansiosta pystyttiin tekemään yhä parempia kuvia kohteesta. Nykyään tarkkaa kuvaa merenpohjasta saadaan jopa reaaliajassa. (Kenny ym. 2003.) Uusimmilla järjestelmillä voidaan pohjasta tunnistaa yhä pienempiä pinnanmuotoja ja kohteita.

3.1 Monikeilausmenetelmät ja -laitteistot

Monikeilaus on Suomessa käytetty termi englanninkieliselle *multibeam echosounder scanningille* (MBES), eli monikanavaiselle kaikuluotaukselle. Monikeilaintekniikka on akustinen mittausmenetelmä, joka on kehitetty alun perin merenmittauksen tarpeisiin. Monikeilainanturi lähettää veteen äänipulssin, jonka heijastus pohjasta (tai mitattavasta kohteesta) jaetaan useaan osaan eli keilaan. Keilat muodostavat viuhkamaisen kuvion, joka kattaa peittävästi mitattavan alueen. Monikeilainluotain mittaa ajan, jonka äänipulssi käyttää kulkiessaan kohteeseen ja takaisin.

Monikeilausta käytetään mm. syvyyksien ja pohjanmuotojen kartoittamiseen, hylkyjen etsimiseen, rakenteiden kartoitukseen ja pohjan tutkimukseen. Saatavan informaation määrä on hyvin suuri. Uusimmat monikeilaimet voivat lähettää 512 keilaa 50 kertaa sekunnissa, jolloin saadaan jopa 25 000 syvyyspistettä sekunnissa. Jokaisella pisteellä on oma 3D-koordinaatti, mikä mahdollistaa aineiston tarkastelun ja sijoittamisen oikeaan paikkaan myöhemmässä vaiheessa. Ero perinteiseen kaikuluotaimeen on siis suuri.

Mittalaitteisto voi olla asennettuna veneeseen joko kiinteästi runkoon tai kiinnitettynä ulkoisesti. Laserkeilaimen sekä monikeilaimen paikantamiseen käytetään RTK-paikannusta, joka on kuvattu tarkemmin aiemmassa luvussa. Yhdistämällä RTK-paikannus ja IMU-tekniikka saadaan tarkempaa ja luotettavampaa paikannustietoa. Veneen asento voidaan saada $0,01^\circ$, suunta $0,02^\circ$ ja nopeus $0,01$ m/sek tarkkuudella. Kaikki tämä päivittyy 200:n Hz nopeudella (Mayer ym. 2000). Lisäksi vikasietoisuus paranee, kun paikannuksessa ei luoteta vain yhteen teknologiaan. Mittalaitteistojen sensorien väliset vektorit mitataan hyvin tarkasti laivan koordinaatistoon, jotta kaikki mittaukset saadaan samaan tarkkaan koordinaattijärjestelmään. (Böder ym. 2011.)

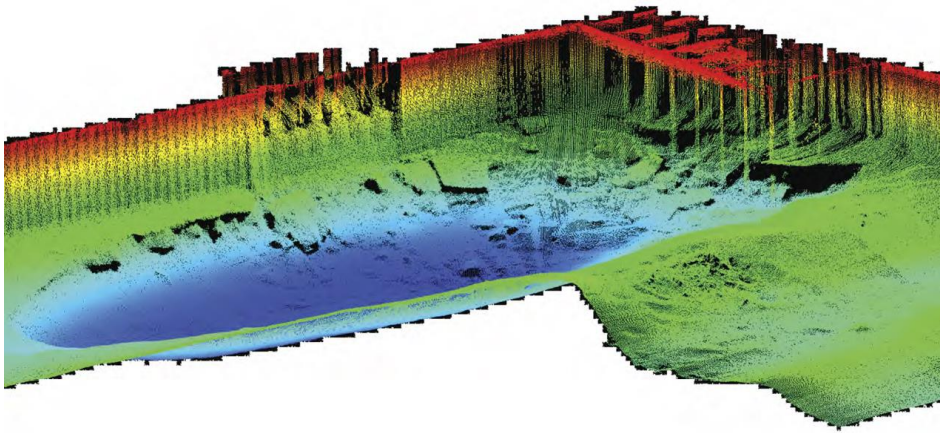
Yhdistetty paikannustieto siirretään reaaliajassa tietokoneelle käyttämällä LAN:ia (Local area network). Merenmittauksessa yksi hyvin yleisesti käytetty tietokoneohjelma datan prosessointiin on QINSy (QPS, Zeist, Alankomaat). QINSy käsittelee muun muassa kaikkien sensoreiden tietoja ja vertailee niiden tarkkuuksia.

Mittausolosuhteiden pitää olla erinomaiset, jotta todella tarkkoihin tuloksiin päästään. Veneen heilahdukset ja moottorien aiheuttamat pyörteet vedessä aiheuttavat häiriötä aineistoon. Jälkikäsitellyssä häiriöt poistetaan, mutta isot häiriöt saattavat jättää aukkoja aineistoon. 10 metrin syvyydessä vedessä on mahdollista saavuttaa alle 10:n cm tarkkuus, mutta harvoin alle 5:n cm tarkkuutta. Mitä matalammassa vedessä mitataan, sen tarkempaa dataa on mahdollista saada. Horisontaalisen tarkkuuden parantamiseksi on käytettävä korkeataajuisia monikeilainta ja avustettava paikannusta IMU-laitteistolla. Esimerkiksi RESONin SeaBat 7125 -luotaimella voidaan mitata 200:n kHz ja 400:n kHz taajuuksilla 0,5m–500m syvyisissä vesissä (Teledyne RESON Seabat 7125 product leaflet 13). Isommalla taajuudella ei syvissä vesissä päästä tarkkoihin tuloksiin, mutta vesirakenteet, kuten satamien laiturit, harvoin ovat yli 20 m syvemmällä. Vertikaalinen epätarkkuus johtuu pääasiassa veden äänennopeudesta ja suolapitoisuudesta. Siksi ennen mittauksia otetaan vedestä äänennopeusprofiili SVP (Sound velocity profile). Otettua profiilia verrataan mittauksen aikana luotaimen oman äänennopeusanturin

lukemiin, jotta tarkkuus pysyisi hyvänä koko mittauksen ajan. SeaBat 7125 -luotaimella voidaan mitata jopa 165°:n avauskulmalla. Suuri avauskulma aiheuttaa kuitenkin sen, että reunimmaisat kaiut joutuvat kulkemaan vedessä pidemmän matkaa. Tällöin niiden tarkkuus heikkenee.

3.2 Monikeilaus rakenteiden kuvaamisessa

Kallistamalla monikeilainta voidaan kuvata tehokkaasti informaatiota vedenalaisista rakennelmista, kuten laitureista ja aallonmurtajista. Kallistetulla monikeilaimella saadaan kerättyä dataa aina pohjasta veden pintaan saakka. Tämä mahdollistaa kattavamman tarkastelun satamien rakenteisiin sekä vedenalaisiin kohteisiin. Korkearesoluutioisesta datasta voidaan nähdä muutokset seinämien murtumisista, eli niin sanotuista maanvyörymistä. Laivojen potkurien aiheuttamaa eroosiota pohjassa ja eroosiolaattojen kuntoa voidaan tutkia. Myös pienempiä kohteita voidaan havaita, kuten säiliöitä, auton renkaimia ja laiturimuurista kadonneita lepuuttajia. Löytämällä ja poistamalla pohjasta sinne kuulumatonta esineistöä pystytään laivojen turvallisuutta satamassa parantamaan. (Pötrönen 2013.) Kuvista voidaan seurata laiturirakenteiden kuntoa nopeasti laajalta alueelta. Koska datalla on tarkat koordinaatit, voidaan lisätutkimuksia tehdä nopeasti ja oikeassa paikassa, esimerkiksi skannaavalla sonarilla tai sukeltajien avulla. Kuvassa 9 on esimerkki Helsingin satamassa tehdystä monikeilaustutkimuksesta. Siinä on mitattu sekä tasaisella että kallistetulla anturinasennolla. Kuvasta voidaan erottaa hyvin laivojen potkurivirtojen aiheuttamaa eroosiota pohjassa sekä kallistuneita eroosiolaattoja seinän vieressä.



Kuva 9. Monikeilaustutkimusta kallistetulla luotaimella Helsingin satamassa (Pötrönen 2013).

4 Mobiililaserkeilaus

Tässä työssä keskitytään mobiililaserkeilaukseen veneestä. Laserkeilaus on mahdollista suorittaa myös ilmasta tai maalta käsin. Maalaserkeilainta TLS (Terrestrial laser scanner) käytetään tässä tapauksessa veneeseen asennettuna, eikä esimerkiksi kolmijalalta, kuten normaalisti on tapana.

4.1 Laserkeilausmenetelmät ja -laitteistot

Laserkeilauksessa keilain lähettää lasersäteitä tiheänä viuhkana. Säde heijastuu kohteesta, jolloin keilain mittaa etäisyyden ja säteen heijastuman voimakkuuden. Laserkeilauksessa tarvitaan myös RTK-paikannusta ja IMU:n dataa, joka on kuvattu tarkemmin aiemmissa luvuissa. Näiden yhdistelmästä saadaan laserkeilaimen tarkka sijainti sekä asento mittauksen aikana. Näistä tiedoista keilain laskee säteen heijastuspisteen koordinaatit. Säteiden tiheyttä voidaan säätää riippuen siitä, kuinka tarkasti kohde halutaan mallintaa. Rakennusmittauksessa tarkkuus voi olla kohteessa alle 10 mm, kauempaa tapahtuvassa puusto- tai maastokartoituksessa esimerkiksi noin 10 cm.

Kohde voidaan keilata käyttötarkoituksesta riippuen useammasta suunnasta. Tällöin pystytään välttämään katvealueiden syntyminen. Tulokseksi saadaan kohteesta kolmiulotteinen malli, johon voidaan yhdistää laserkeilaimen kameralla ottamista kuvista

tekstuuri. Laserkeilaamalla syntyviä pisteitä voi yhdessä pistepilvessä olla useita satoja miljoonia. Veneestä tapahtuvassa laserkeilauksessa keilain ei pyöri itsensä ympäri kuten normaalisti. Laserkeilain on lukittu yhteen asentoon osoittamaan suoraan sivulle.

Tässä työssä otetaan esimerkiksi Riegl VZ-400 -laserkeilain, jota on käytetty veneestä käsin tapahtuvissa mobiililaserkeilauksissa niin Suomessa kuin ulkomailla (kuvat 10 ja 11). VZ-400 käyttää lähi-infrapunavaloa, jonka säteen avauskulma on 0,35 mrad eli 0,017°. Säteen leveys 100 metrin päässä on siis 30 mm. 100 metrin päässä kahden keilauslinjan välinen etäisyys pysty- ja vaakasuorassa on minimissään 4 mm. (Böder ym. 2011.)

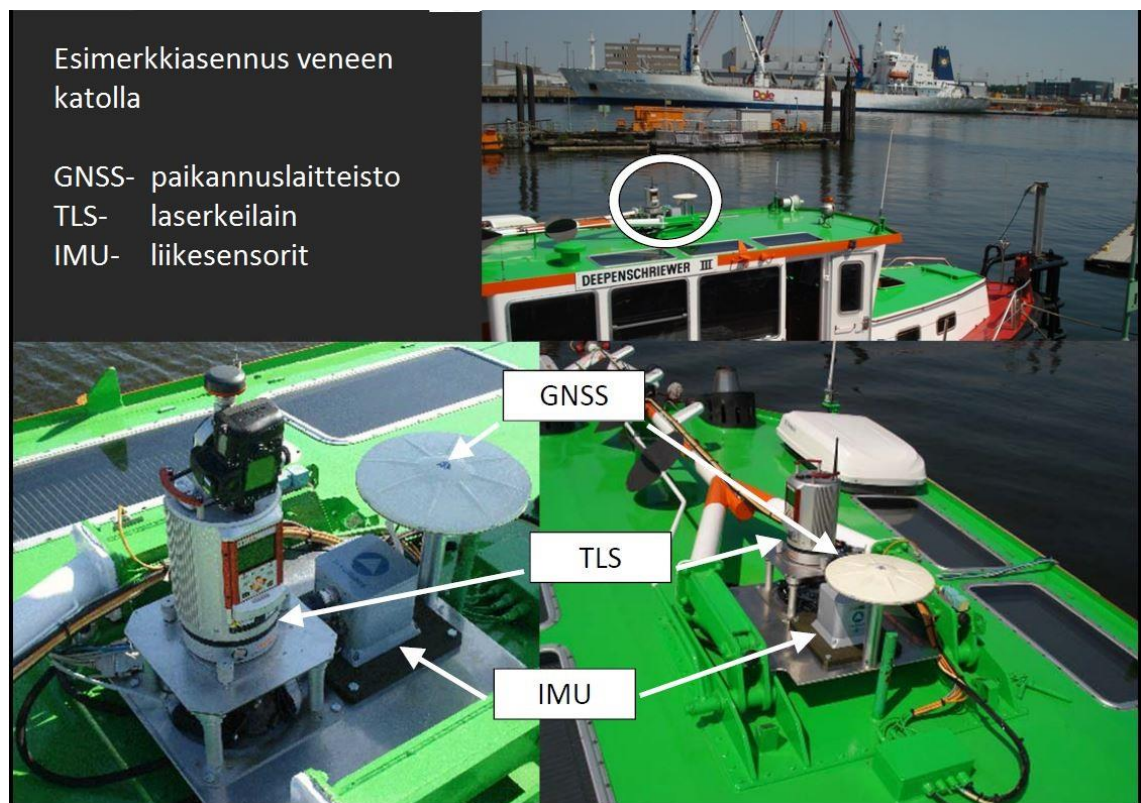
Rieglin testeissä etäisyysmittauksen keskihajonnaksi on määritelty 5 mm 100 m:n matkalla. Vaaka- ja pystykulmien tarkkuus on 0,0005°, mikä vastaa 500 m:n päässä 4 mm:n sivuttaispoikkeamaa. Näiden tietojen perusteella jokaisen pisteen koordinaatin keskihajonnan tarkkuudeksi 100 m:n matkalla, voidaan arvioida alle 1 cm. (Böder ym. 2011.)

VZ-400:ssa on kaksi toimintatilaa: Long Range Mode ja High Speed Mode. Long Range Modessa pisin mittausetäisyys on 600 m, jos kohde on hyvä luonnollinen heijastaja (heijastavuus $\rho \geq 90\%$). Kun kohteen heijastavuus on $\rho \geq 20\%$, mittausetäisyys on 280 m. Tehokas mittausnopeus on 42 000 mittausta sekunnissa, kun pulssintoistotaajuus PRR (pulse repetition rate) on 100 kHz. High Speed Modessa mittausnopeus voidaan kolminkertaistaa, jolloin saadaan 122 000 mittausta sekunnissa, PRR:n ollessa 300 kHz. Tällöin pisin mittausetäisyys on 350m, kun $\rho \geq 90\%$ ja 160m, kun $\rho \geq 20\%$. (RIEGL VZ-400 Datasheet 2013.)

Vaakasuunnassa keilausnopeus voidaan valita 3–120 linjaa/sek. väliltä. Esimerkiksi 3 cm:n vaakasuuntainen linjaväli saadaan, kun veneen nopeutena pidetään 3 m/s, keilausnopeuden ollessa 100 linjaa/sek. (Böder ym. 2011.) Rieglin VZ-400-laserkeilainta voidaan ohjata QINSy-ohjelmalla kuten monikeilauksessakin. QINSy tallentaa laserkeilauksesta saadun datan, ja sillä voidaan tutkia saatuja mittauksia reaaliajassa.



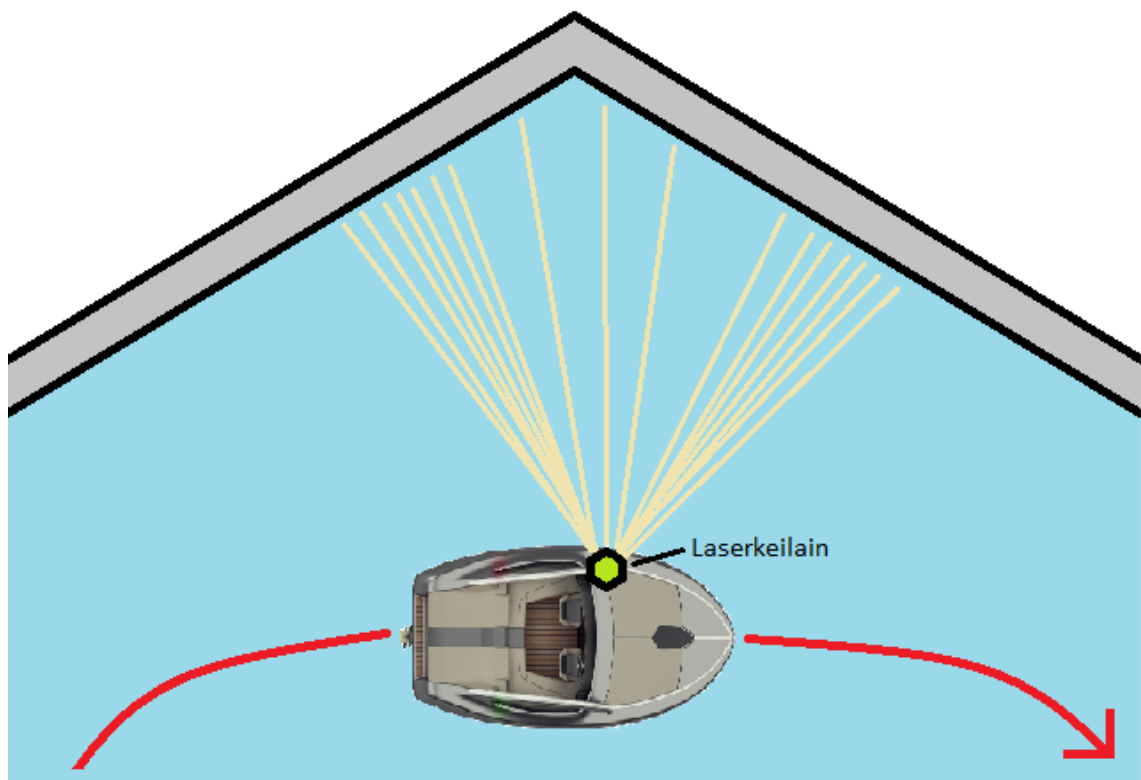
Kuva 10. RIEGL VZ-400-laserkeilain (RIEGL 2013).



Kuva 11. Esimerkkiasennus katolla olevasta mittalaitteistosta Deepenschriewer III -veneessä Hampurin satamassa (Böder ym. 2011).

4.2 Mobiililaserkeilaus rakenteiden kuvaamisessa

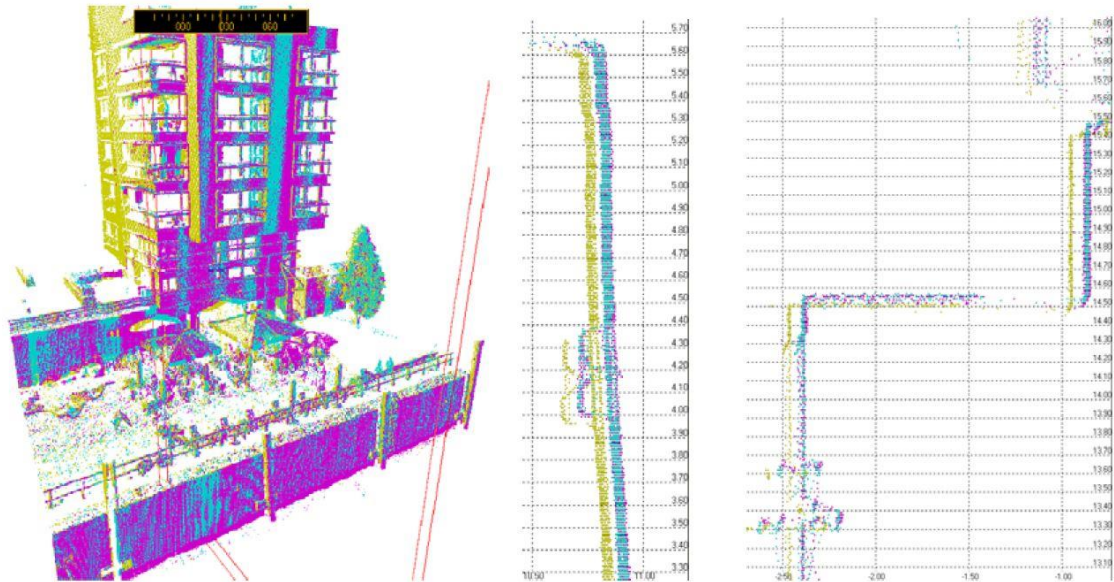
Monikeilatessa vedenalaisia rakenteita on hyvin kustannustehokasta laserkeilata samalla niiden vedenpäälliset osat. Laiturirakenteita laserkeilatessa veneestä, laserkeilain on lukittuna osoittamaan suoraan sivulle. Venettä ajetaan tasaisella nopeudella, jotta pistepilvestä saadaan tasainen ja tarkka. Ongelmaksi veneestä käsin tehtävässä mobiililaserkeilauksessa saattaa syntyä laiturirakenteiden ja satamainfrastruktuurin muodot sekä hankala sijainti. Veneellä ei välttämättä päästä kaikkiin haluttuihin paikkoihin kuvaamaan, joten katvealueita voi syntyä. Liian nopeista käännoksistä johtuva kulmakiihtyvyyden kasvu voi aiheuttaa harventumaa dataan, kuten kuvassa 12 on esitetty. Tätä voidaan välttää ajamalla käännoksien mahdollisimman hitaasti sekä tarvittaessa keilaamalla rakenne toiseen kertaan. Tarvittaessa laserkeilausaineistoa on mahdollista täydentää myös maalta käsin laserkeilaamalla. Tällöin eri aineistot on kuitenkin saatava hyvin yhdistettyä toisiinsa.



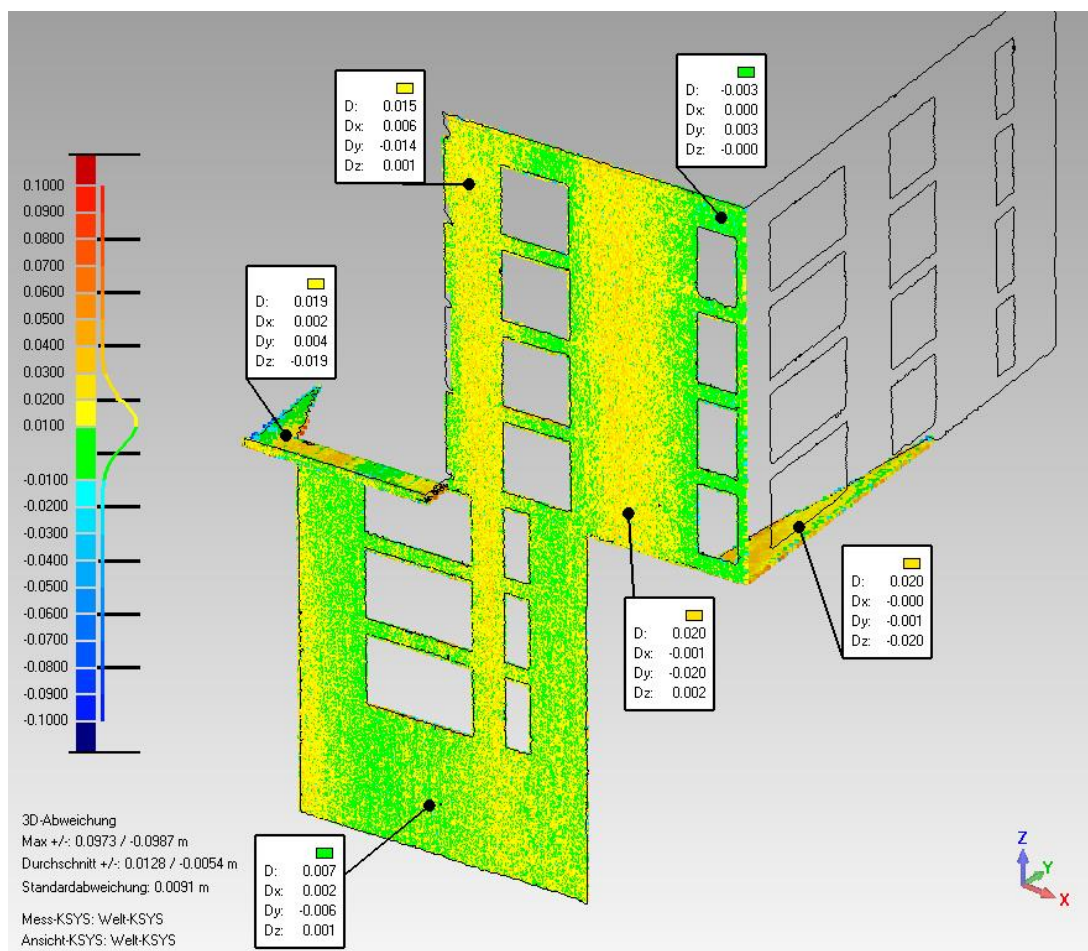
Kuva 12. Nopeasta käännoksestä johtuvan kulmakiihtyvyyden kasvun vaikutus laserkeilausdatan tiheyteen.

Grasbrookin satamassa tehtyjen mobiililaserkeilausmittausten tarkkuutta voidaan tarkastella taka-alalla sijaitsevasta talosta, sekä etualan laituriseinämästä (kuvat 13 ja 14). Kohteisiin on ajettu useampi laserkeilauslinja, jotta saadaan vertailtavaa aineistoa

eri ajanhetkiltä. Tulokset osoittivat vertailukelpoisia lukemia, 7 cm X- ja Y-suunnassa sekä 4 cm Z-suunnassa. Poikkeavan profiilin koordinaatit ovat jatkuvasti kauempana veneestä, joten tällä voidaan olettaa olevan systemaattista vaikutusta tähän profiiliin. (Böder ym. 2011.)



Kuva 13. Mobiililaserkeilauksen tarkkuusanalyysi X, Y ja Z koordinaateissa, rakennuksesta ja laiturin seinämästä Grasbrookin satamassa (Böder ym. 2011).



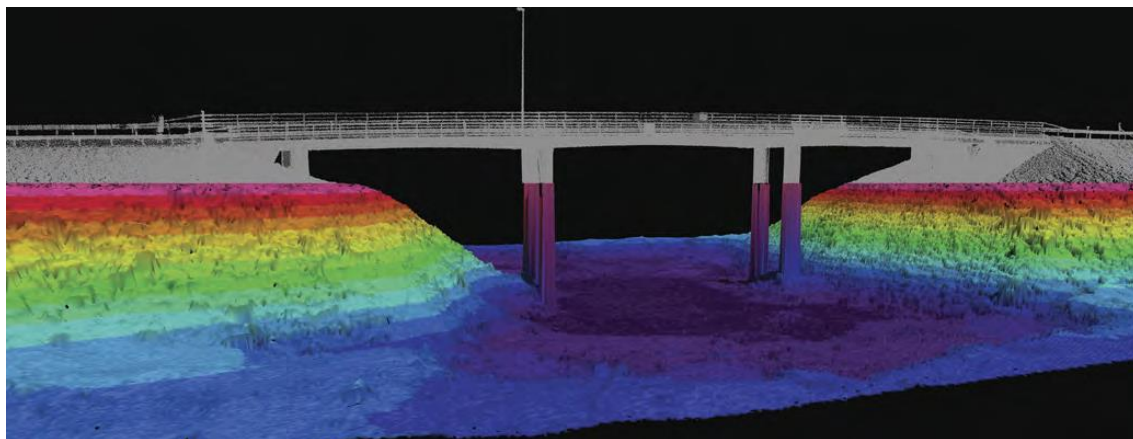
Kuva 14. Mobiililaserkeilauksesta saadun 3D-mallin eroavaisuus johdettuna 1 ja 8 luotauslinjasta Grasbrookin satamassa (Böder ym. 2011).

5 Aineistojen yhdistäminen

Luvussa käsitellään monikeilaus- ja laserkeilausaineistojen yhdistämistä ja tästä saatavaa hyötyä sekä sovelluksia. Monikeilaus ja laserkeilaus antavat tehokkaan työkalun tarkastella laajempia kokonaisuuksia ja tunnistamaan potentiaalisia kohteita tarkempaa tarkastelua varten. Näitä yksittäisiä kohteita voidaan sen jälkeen tutkia esimerkiksi sukeltajien, kauko-ohjattujen ajoneuvojen ROV (Remote Operated Vehicle) tai keilaavan kaikuluotaimen avulla.

Kaikkea saatua informaatiota voidaan käyttää myöhemmin avuksi rakenteiden ylläpidossa, suunnittelussa ja rakentamisessa. Tämä lähestymistapa auttaa merenkulun turvallisuuden suunnittelemisessa ja ylläpitämisessä sekä satamissa että muualla vedessä olevien infrastruktuurien käytössä. (Pötrönen 2013.) Yhdistettyä dataa voidaan

käyttää myös jokien ja niiden luontotyyppien kartoittamiseen sekä rannikon pinnanmuotojen mallintamiseen (Böder ym. 2011). Kuvassa 15 on esimerkki yhdistetyn aineiston käytöstä. Siinä on tehty laserkeilaus Särkisalon sillasta sekä monikeilausmittaus siltaa ympäröivistä vesialueista. Aineistosta voidaan tarkastella esimerkiksi sillan tukipilarien kuntoa ja mahdollisia valumia maavallissa.

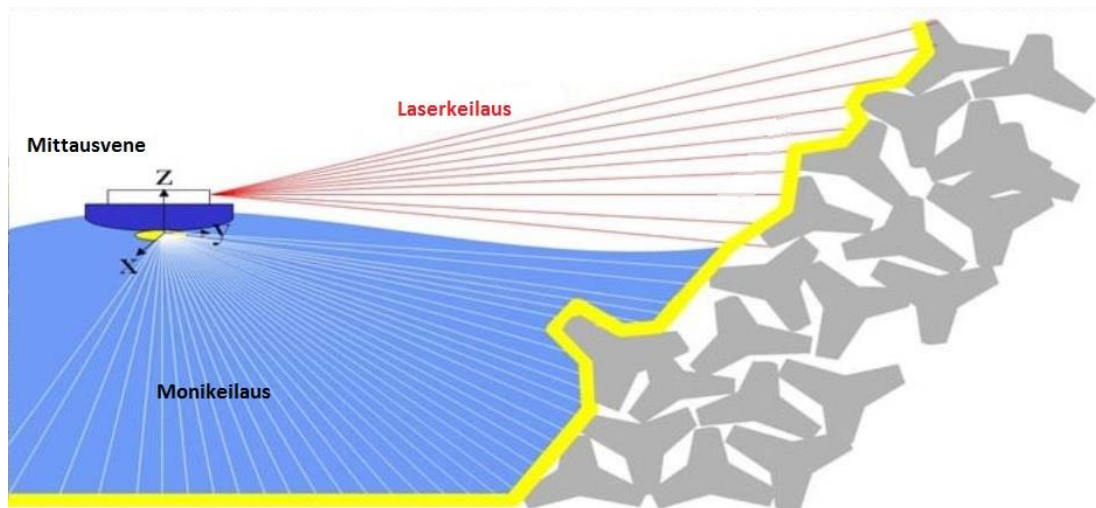


Kuva 15. Yhdistettyä monikeilaus- ja laserkeilausaineistoa Särkisalon sillalta (Pötrönen 2013).

Jotta yhdistetty aineisto sopisi toisiinsa nähden hyvin, ovat mittalaitteistojen väliset vektorit mitattava hyvin tarkasti laivan koordinaatistoon. Tällöin kaikki mittaukset saadaan samaan tarkkaan koordinaattijärjestelmään. (Böder ym. 2011.) Laitteistot on myös kalibroitava veneen kanssa. Mittausveneen asento vaihtelee paljon, joten nousukulman, kallistuman ja suunnan kalibrointiarvot pitää määrittää ennen mittauksia. (Thies 2011). Jos aluksen mittauslaitteisto osuu esimerkiksi pohjakosketuksen takia johonkin esteeseen, on kalibrointi tehtävä uudelleen sekä uudet kalibrointiarvot laskettava. Tällöin voidaan varmistaa, että aiemmat ja tulevat mittaukset sopivat yhteen hyvin eikä virhettä pääse syntymään.

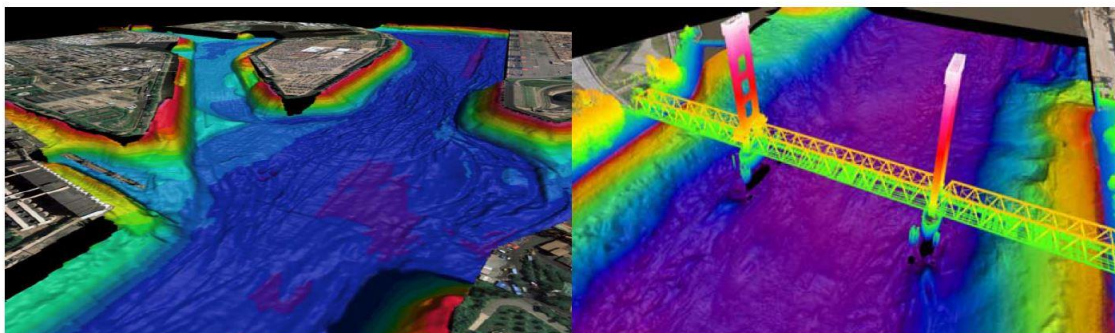
Monikeilatun aineiston paikannustarkkuus saattaa olla heikompa kuin laserkeilatun aineiston. Tämä johtuu siitä, että vesi on monimutkaisempi elementti kuin ilma. Läheltä pintaa sekä aivan rannasta havaitut pisteet ovat luotaimen nähden suuremmissa kulmassa kuin suoraan luotaimen alta havaitut. Tällöin veden äänennopeusprofiili ei ole samanlainen eri havainnoilla. Rannassa kaiku voi saada häiriötä myös monitieheijastuksista veden mataluuden vuoksi. Myös laserkeilausdataan voi veden pintaan osuessaan syntyä monitieheijastuksia. Näitä virheitä voidaan korjata manuaalisesti tai erilaisilla algoritmeilla ennen aineistojen yhdistämistä. (Mitchell ym. 2011.)

Kuvassa 16 on esitetty sivuprofiili mittaustilanteesta. Monikeilaus on usein hyvä suorittaa ensin, jotta on turvallista ajaa laserkeilaushalssit tuntemattomalla vesialueella. Tällöin voidaan välttää mahdolliset pohjakosketukset esimerkiksi sortuneeseen aallonmurtajaan. Alueilla joissa vaikuttavat vuorovedet, on mittaus suunniteltava niiden mukaan. Monikeilaus tulee tehdä korkean veden aikana, jolloin saadaan rakenteet mitattua mahdollisimman korkealta. Tämän jälkeen suoritettava laserkeilaus tulisi tehdä matalan veden aikana, jolloin laserkeilaus kattaa mahdollisimman paljon vedenpäällisistä osista. Vaikka molemmissa mittauksissa syntyisi virheitä veden rajaan, ei niiden poistaminen aiheuta harventumaa dataan. Näin ollen lopputulokseksi saadaan hyvin toisiaan peittävät monikeilaus- ja laserkeilausmittaukset, eikä veden rajaan synny aukkoa mittaukseen.



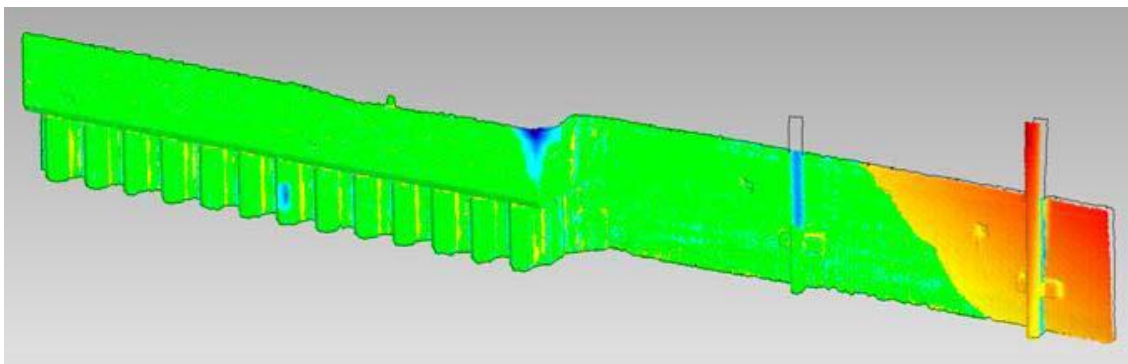
Kuva 16. Sivuprofiili mittaustilanteesta. Kallistettu monikeilain kuvaa vedenalaista aluetta ja samalla laserkeilain kuvaa veden päällistä osaa (Diouri & El Aichati 2011).

Kuvasta 17 nähdään monikeilatusta alueesta, ortoilmakuvasta ja mobiililaserkeilauksesta tehty 3D-malli sataman sillasta. Tämän kaltaista dataa voidaan käyttää esimerkiksi laivojen ohjaamiseen riittäväkorkuisten siltojen ali.



Kuva 17. 3D-syvyysmalli yhdistettynä ortokuvaan (vasen) ja alikulkukorkeus informaatio johdettuna mobiilikartoituksesta (oikea) (Böder ym. 2011).

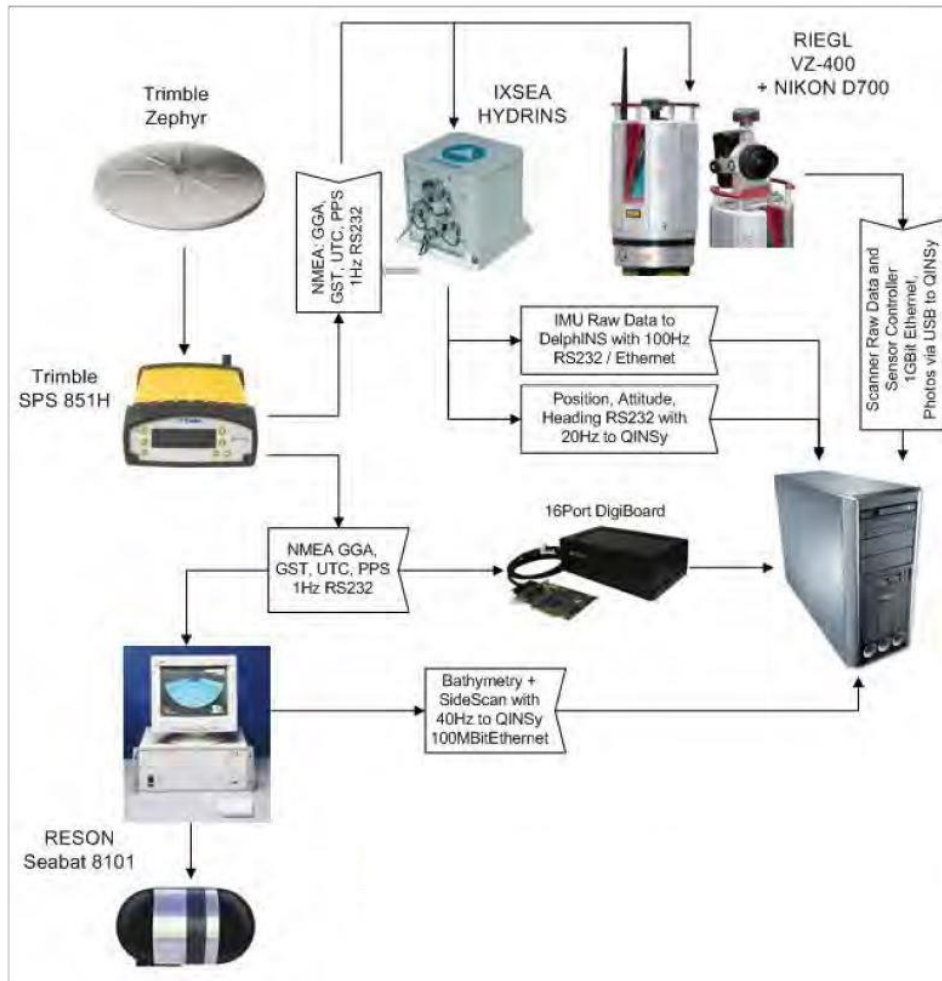
Vanhojen laiturirakennelmien kuntoa voidaan analysoida 3D-mallin muutoksista, kuten kuvassa 18. Tällöin tarvitaan kuitenkin mittaustuloksia useammalta ajanhetkeltä.



Kuva 18. Vanhan laiturinosan seinämän muutoksen analyysikuva (Böder ym. 2011).

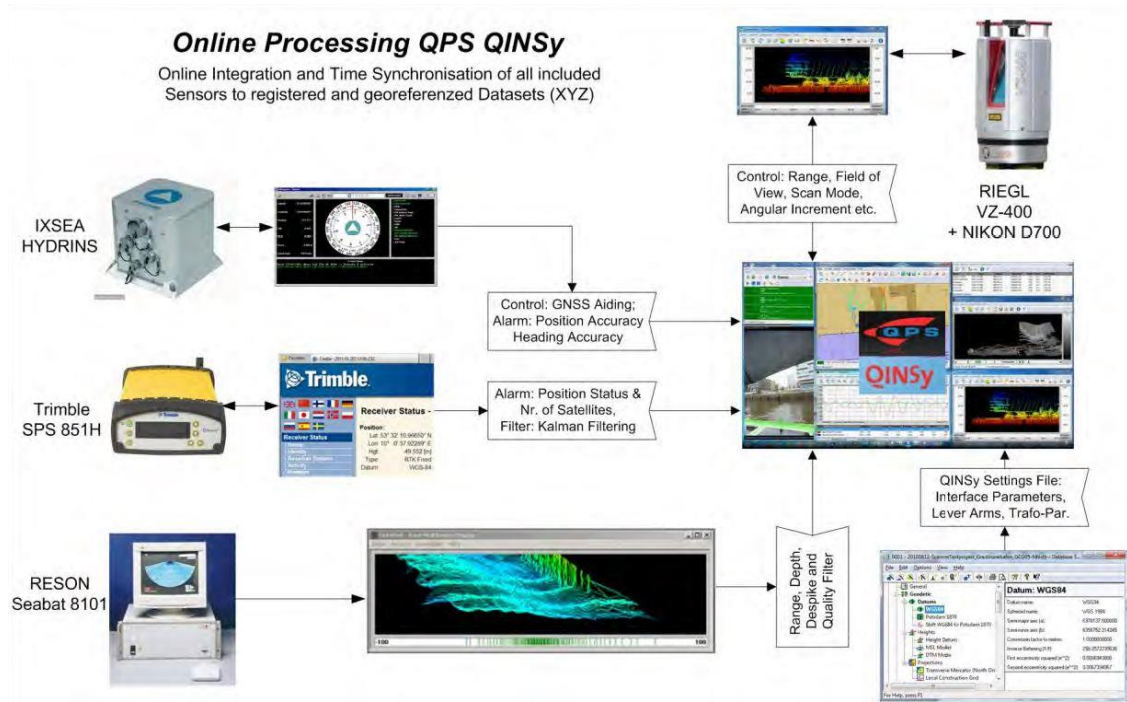
Hampurin yliopistossa, HafenCity University Hamburg (HCU), tehtyjen tutkimusten mukaan, QINSy- ohjelmisto on ratkaisevan tärkeässä roolissa reaaliaikaisen laserkeilausaineiston yhdistämisessä. Lisäksi tutkimuksesta ilmeni että, IMU:n tarkkuus vaikuttaa merkittävästi laserkeilausdatan tarkkuuteen ja laatuun. Järjestelmän integroinnilla ja maalaserkeilainten käyttämisellä veneessä, erilaisia sovelluksia voidaan tulevaisuudessa kehittää lisää. (Böder ym. 2011.)

Asennettujen laitteistojen pitää olla yhdistettynä toisiinsa, jotta niiden kellot saadaan synkronoitua ja dataa siirrettyä eri laitteiden välillä (kuva 19). GNSS-vastaanotin tuottaa PPS-signaalia (Pulse Per Second) ja vastaavia aikaviestejä, jotta monikeilain, laserkeilain, IMU ja tietokone saadaan pysymään samassa ajassa (Thies 2011).



Kuva 19. Kaaviokuva mittalaitteiden käyttöliittymästä. Datansiirto tapahtuu joko sarja- tai ethernet-kaapeilla (Thies 2011).

Mittauksenaikainen datan prosessointi tehdään QINSy-ohjelmalla. QINSyn tehtävät voidaan jakaa kahteen osaan. Jälkikäsitteilyä varten sen pitää tallentaa mittaussensoreilta raakadataa kronologisessa järjestyksessä. Toisaalta sen pitää käsitellä ja yhdistää paikannus-, IMU- ja mittauslaitteiden raakadatat toistensa kanssa, jotta saadaan muodostettua täysin rekisteröity pistepilvi (kuva 20). Jokaiselle aikakoodatulle laser- ja kaikupisteelle QINSy määrittää kehityskaaren arvot ja suorittaa koordinaattimuunnoksen laitteiden omasta koordinaatistosta referenssikoordinaatistoon. Prosessin seurauksena saadaan georeferoituja pistepilviä, joista löytyy tyypillisiä määritelmiä, kuten intensiteetin ja laadun arvot. (Thies 2011.)



Kuva 20. Kaaviokuva QINSyn online-prosessista. Käyttäjän päätehtävä on valvoa ja ohjata mittalaitteita. QINsy laskee jokaiselle monikeilaus- ja laserkeilauspisteelle 3D-koordinaatit ja sovittaa liike- ja suuntadataa reaaliaikaisesti. (Thies 2011.)

Vaikka reaaliaikainen prosessointi saattaa sisältää systemaattisia virheitä, kuten paikannushyppyjä tai IMU:n ajalehtimistä, se antaa silti hyvän yleiskuvan mittauksen tuloksista ja mahdollistaa sensoreiden hienosäädön mittauksen aikana. Siitä voidaan havaita myös suurempia systemaattisia virheitä tai ongelmia mittalaitteissa. Tämä ei kuitenkaan poista jälkikäsitteilyn tarvetta, sillä siinä aineistoa saadaan tarkemmaksi ja virheitä voidaan poistaa erilaisilla suotimilla. (Thies 2011.)

Aineiston jälkikäsitteilyyn on olemassa useita ohjelmia. QINsyllä voidaan tehdä osa käsittelystä, jonka jälkeen käyttää esimerkiksi Fledermaus-ohjelmaa monikeilausaineiston käsittelyyn. Rieglillä on oma Riscan-ohjelmansa laserkeilausaineiston käsittelyyn. Tähän ohjelmaan voidaan tuoda myös käsitelty monikeilausaineisto, jolloin saadaan molemmat aineistot samaan kuvaan yhtenäiseksi 3D-malliksi. Tällöin nähdään aineistojen sopivuus toisiinsa ja voidaan tarvittaessa tehdä korjauksia dataan.

5.1 Aineistojen yhdistämisen hyödyt

Verrattuna sukeltajan tekemään tutkimukseen ja valokuvaan vesirakenteista monikeilauksen ja laserkeilauksen yhdistelmä on hyvin paljon tehokkaampaa. Jokaiselle aineiston pisteelle tunnetaan 3D-koordinaatit ja kohteet voidaan helposti löytää myöhempää tarkastelua varten. Aineistoa voidaan käyttää hyödyksi myös alueen kehittämisen suunnittelussa. Useamman vuoden mittauksista voidaan vertailla rakenteissa tapahtuvia mahdollisia muutoksia. Korjaussuunnitelmat ja niiden laajuus saadaan helpommin esitettyä tarkoilla kuvilla ja 3D-malleilla. Aineistosta voidaan löytää veden alta sinne kuulumattomia kohteita tai kadonneita kohteita. Kyseisellä menetelmällä voidaan myös välttää työskentely rannoilla sekä alueilla, joilla on tärkeitä luontoarvoja tai jotka saattavat aiheuttaa riskin työturvallisuudelle.

Hampurissa saatujen tutkimusten perusteella voidaan todeta, että maalaserkeilainta voidaan käyttää asennettuna veneeseen ja sillä kerättyä dataa pystytään yhdistämään hyvin monikeilausaineistoon. Yhdistäminen voi tapahtua joko reaaliajassa tai jälkikäteen. Kohteesta nopeasti saatava tieto sekä tarkka 3D-informaatio antavat hyvät edellytykset tämän uuden teknologian käyttöön monissa sovelluksissa veden päällä sekä pinnan alla. (Böder ym. 2011.)

5.2 Sovellukset

Tässä luvussa käydään läpi muutama sovellusesimerkki yhdistetystä monikeilauksesta ja mobiililaserkeilauksesta. Dockland- ja Koehlbrand-esimerkit ovat Thomas Thiesin diplomityöstä (2011).

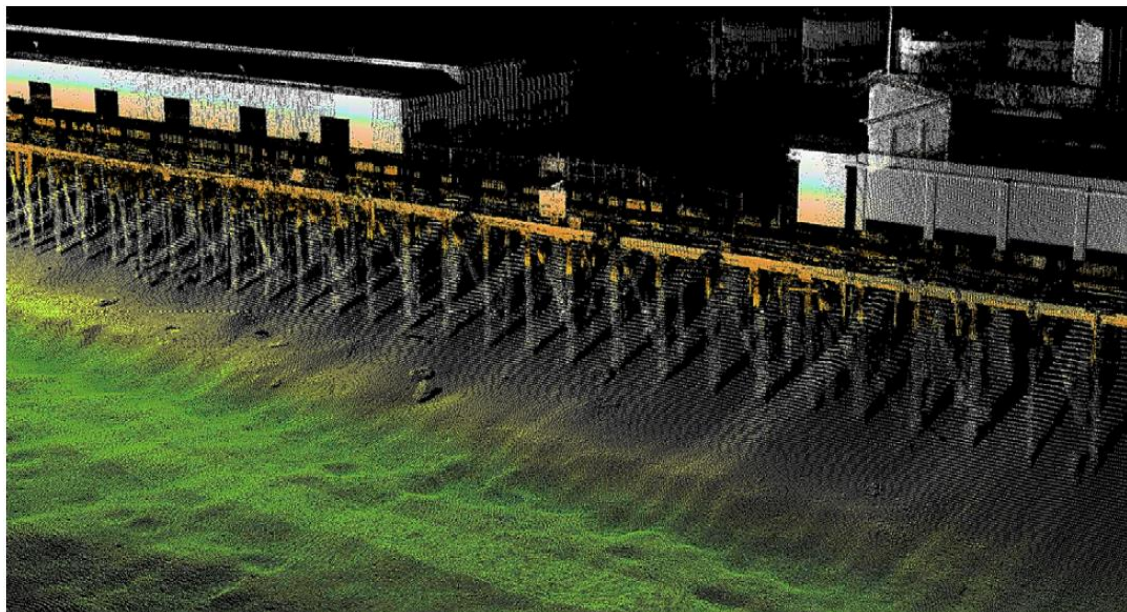
5.2.1 Ruoppaus

Ruoppauksia tehdessä on tärkeää tietää, kuinka paljon ja mistä aiotaan ruopata. Tästä ovat kiinnostuneita sekä ruoppaava taho että tilaaja. Ruoppaaja ei halua turhaan ruopata ylimääräistä, eikä tilaaja halua maksaa näistä turhista ja ylimääräisistä ruoppauksista. Monikeilaamalla ruopattava alue saadaan tiheä pisteaineisto, josta pystytään määrittelemään tarkasti vedenalaiset pinnanmuodot ja haluttu työalue. Koska monikeilaus kattaa vain vedenalaiset alueet, saatetaan työmaalla tarvita myös veden päällisen osan mallintamista laserkeilaamalla. Tämä voitaisiin tehdä maa-asemalta,

mutta tällöin työntekijän täytyy rantautua. Tämä saattaa olla joillain alueilla vaikeaa, ja ranta voi olla vaarallinen. Maalta käsin laserkeilatessa on erittäin vaikeaa kerätä peittävää aineistoa aina vedenpintaan ja monikeilausaineistoon saakka. Suorittamalla laserkeilaus aluksesta käsin voidaan kaikki nämä ongelmat välttää. Yhdistetystä aineistosta on hyötyä etenkin satama-alueilla, joilla voidaan törmätä maantäytöstä, alusten potkurivirroista, eroosiosta tai maanvyörymistä aiheutuneisiin muutoksiin. Nämä kertymät ja muutokset voidaan tarvittaessa jäljittää helpommin maanpäällisiin toimintoihin, kun käytössä on myös laserkeilausaineisto. (Mitchell ym. 2011.)

5.2.2 Vesirakennelmat

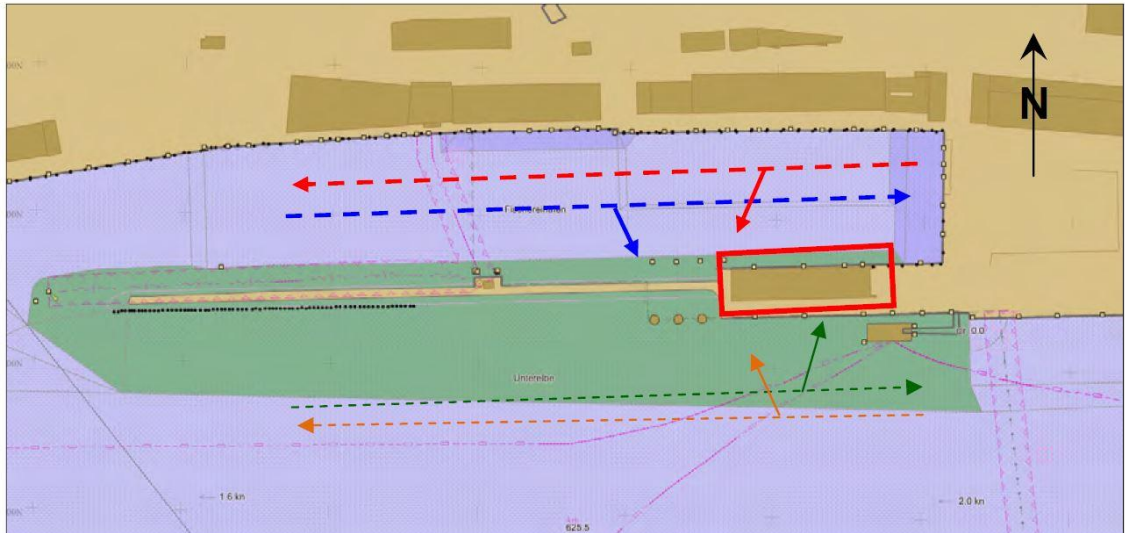
Vesialueille on rakennettu paljon erilaisia rakennelmia, joilla on vedenalaisia pylviä ja tukirakenteita. Näitä ovat esimerkiksi laiturit, avomerialustat kuten öljynporauslautat ja sillat. Maa-aineksen liikkeet sekä jäälautat kuluttavat ja aiheuttavat rasitusta rakenteille. Monikeilaamalla voidaan nopeasti nähdä, onko rakenteeseen aiheutunut vahinkoa ja tarvitaanko tarkempaa tutkimista, esimerkiksi sukeltajien avulla. Käyttämällä avuksi tätä aineistoa sukellusaikoja saadaan lyhennettyä ja näin ollen kuluja pienennettyä. Erityisen hyödyllistä monikeilausaineisto on paikoissa, joissa on kovia virtauksia tai tulvia, jolloin sukeltaminen on vaarallista. (Mitchell ym. 2011.) Laiturit on useasti rakennettu pilarien päälle (kuva 21), jolloin maa-ainesta ja hylkytavaraa saattaa kulkeutua niiden väliin. Sukeltajan on vaikeaa toimia ahtaissa tiloissa laiturien alla ja joissain paikoissa jopa mahdotonta. Monikeilauksen ja laserkeilauksen yhdistämällä saadaan laiturin alla olevien pilarien välit kartoitettua ja mallinnettua. Vastaavia kohteita ovat myös esimerkiksi siltojen alustat, joita on hankala tutkia ilman erikseen rakennettuja telineitä. Rakentajat ja suunnittelijat saavat tarkan kuvan luonnon ja ihmisen aiheuttamista muutoksista suhteellisen nopeassa ajassa, kun tutkimukseen käytetään moni- ja laserkeilausta.



Kuva 21. Monikeilattu ja laserkeilattu malli satamarakennelmista Los Angelesissa (Mitchell ym. 2011).

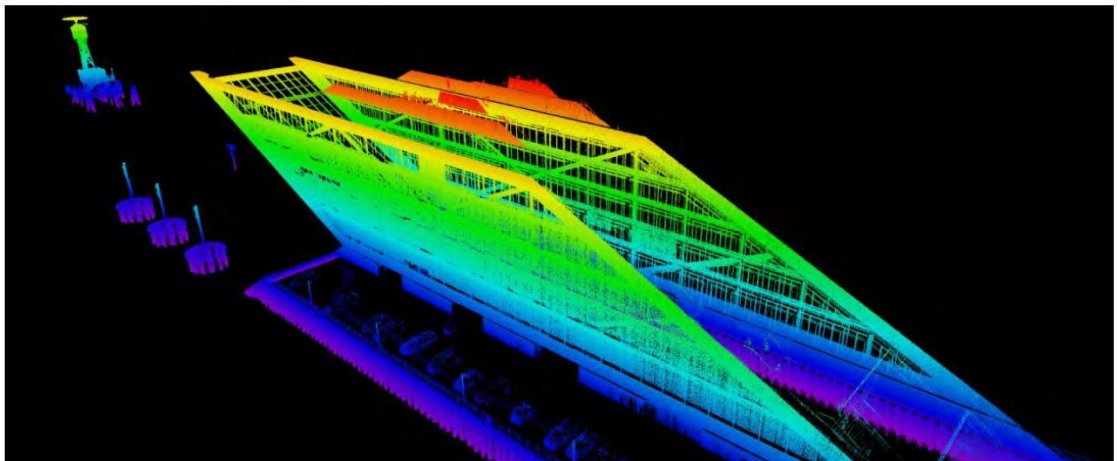
5.2.3 Dockland-rakennus

Thiesin diplomityössä oleva esimerkki Hampurin satamassa tehdystä mittausprojektista Dockland-rakennuksesta on mielenkiintoinen mallinnuskohde, sillä sitä ympäröi miltei kokonaan Elbe-joki. Rakennus sijaitsee Elbe-joen pohjoisrannalla, ja siitä on muodostunut yksi kaupungin maamerkeistä. Mittaus suoritettiin muutamalla vastakkaisiin suuntiin ajettulla linjalla. Laserkeilain käännettiin aina päinvastaiseen suuntaan linjaa vaihdettaessa, kuten kuvasta 22 nähdään. Laserkeilain oli asetettu High Speed Mode -mittaustilaan ja kohteiden enimmäisetäisyydeksi 80 m. Mittausveneen nopeus rajoitettiin viiteen solmuun. (Thies 2011: 107)

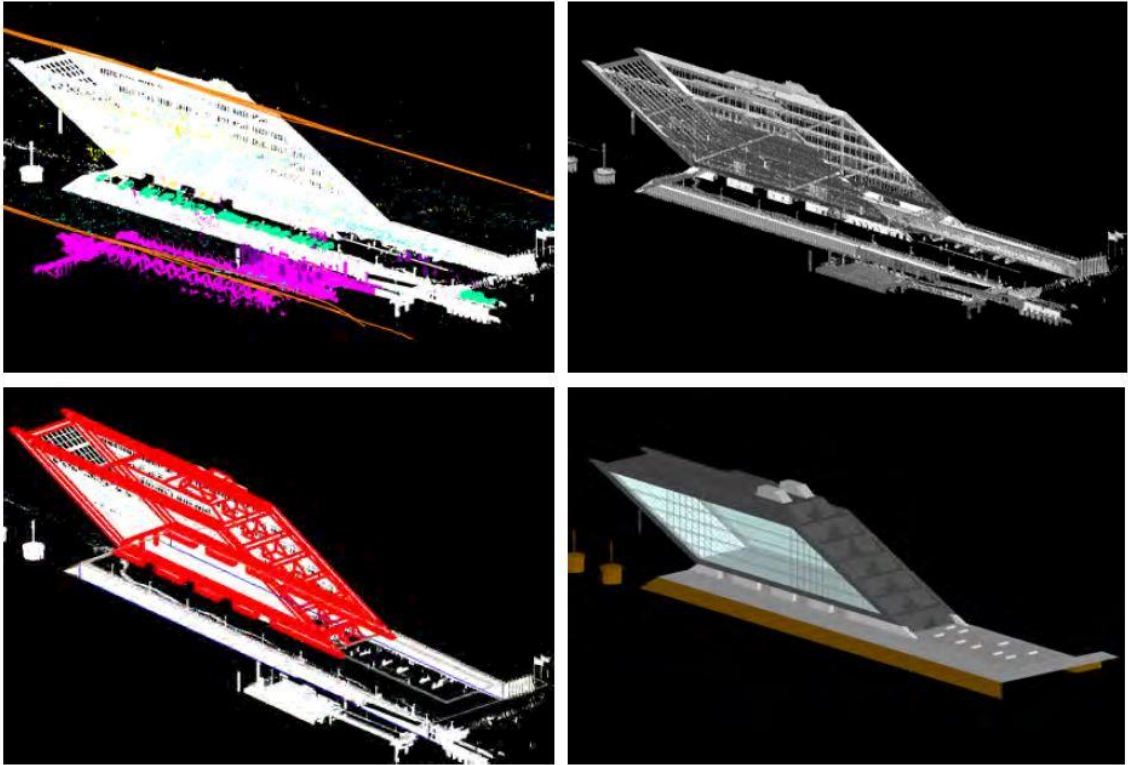


Kuva 22. Yleiskuva Docklandin mittaustilanteesta. Rakennuksen pohjois- ja eteläpuolelle ajettiin kaksi mittaussinjaa, jolloin keilain oli käännettynä eri suuntiin. Rakennus sijaitsee punaisella merkityn suorakulmion sisällä. (Thies 2011: 107.)

Laserkeilauksen tulokseksi jokaiselta linjalta saatiin georeferoituja pistepilviä, jotka yhdistettiin yhdeksi kuvaksi (kuva 23) Vaikka kuva onkin jo valmis visuaaliseen käyttöön, se sisältää miljoonia pisteitä ja on raskas käsitellä. Tämän takia tehtiin yksinkertainen, mutta yksityiskohtainen 3D-malli, jonka työvaiheet ja valmis 3D-malli nähdään kuvasta 24. (Thies 2011: 107.)



Kuva 23. Esikäsitelty pistepilvi Dockland-rakennuksesta, värikoodattuna korkeuden mukaan (Thies 2011: 108).

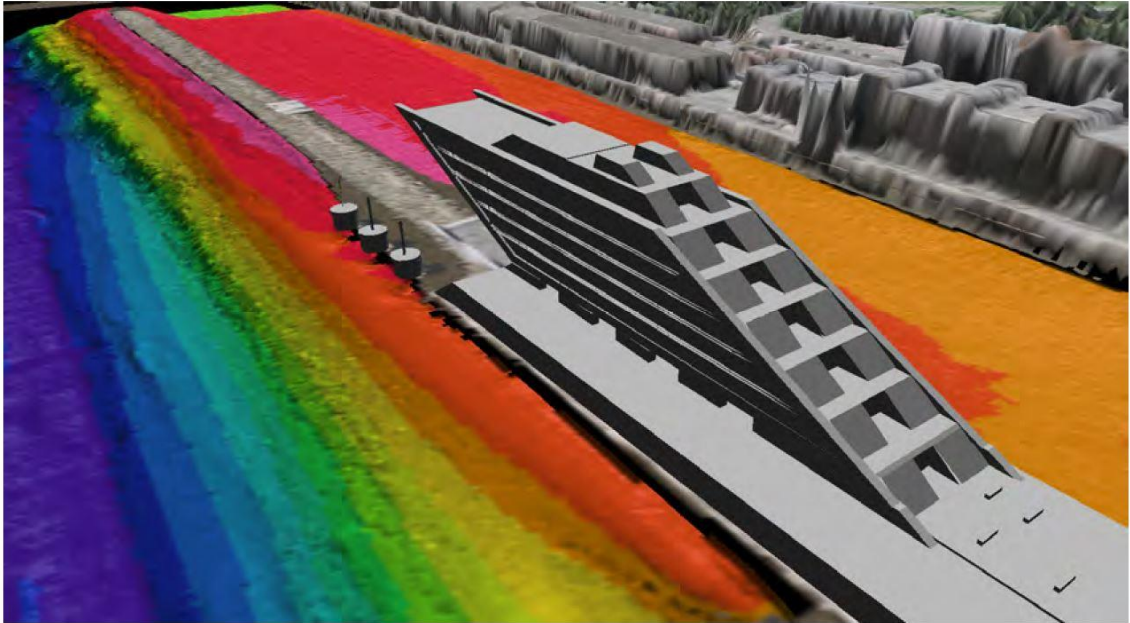


Kuva 24. Yleiskuva mallinnuksen työvaiheista. Pistepilven luokittelusta (ylhäällä vasemmalla), ominaisuuksien digitoimiseen ja kohteen mallintamiseen (alhaalla vasemmalla) (Thies 2011: 108).

Aluksi pistepilvi halutaan luokitella ominaisuuksien mukaan, kuten rakennus, satamamuri tai huono data, jotta suurta määrää dataa pystytään käsittelemään. Varsinkin digitointiprosessin aikana, joka on laajin osa 3D-mallinnusta, luokittelun avulla pyritään keskittymään vain aineiston tärkeimpiin osiin. Digitalisointi alkaa rakennuksen karkeiden muotojen määrittelyllä, missä sille määritellään yhdensuuntaisuudet ja kohtisuoruudet. Mallin yksityiskohtaisuus riippuu siitä, kuinka tiheä pistepilvi on ja kuinka hyvin aineiston eri ominaisuudet pystytään luokittelemaan. Dockland-projektissa vaikein osuus oli rakennuksen muodot ja materiaali. Dockland on rakennettu ristiin kulkevista teräskehikoista, ja julkisivut ovat miltei kokonaan kaksinkertaista lasia. Tämä aiheutti mittauksessa paljon monitieheijastuksia. (Thies 2011: 109.)

Seuraavaksi digitoidusta vektoridatasta rakennettiin pienempiä kohteita, kuten ikkunoita. Rakennuksen katon muodot ovat peräisin ilmalaserkeilauksesta, koska mobiililaserkeilauksessa sinne syntyi katvealueita. Lopuksi pinnoille istutettiin valokuvista väriarvot, jotta mallista saatiin realistisempi. (Thies 2011: 109.)

Lopullinen 3D-malli sisältää eri aineistot yhdistettynä (kuva 25). Tämän kaltaisen satamamallin käyttötarkoitus voi olla monenlainen. Uuden infrastruktuurin rakentamisen suunnittelun tueksi voidaan tehdä 3D-malli, mikä sisältää vesi- ja maainfrastruktuurit yhdistettynä maasto- ja syvyystietoihin. Myös esimerkiksi riskialueiden tulvamallinnusta voidaan laskea tarkasti mallin perusteella. (Thies 2011: 109.)



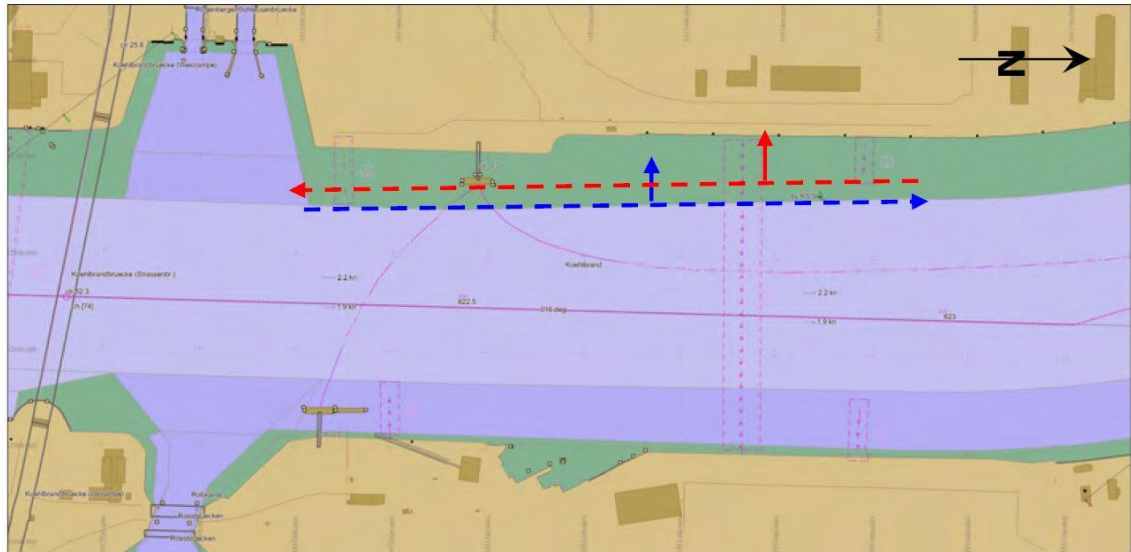
Kuva 25. Monikeilauksesta, mobiililaserkeilauksesta, korkeusmallista ja ortoilmakuvastakuvasta yhdistetty 3D-malli Dockland-rakennuksesta (Thies 2011: 110).

5.2.4 Koehlbrand-pengerrys

Yksi Hampurin satamaviranomaisten tehtävistä on tarkkailla sataman vesiväylien pengerryksen kuntoa. Aluksille on oltava tarpeeksi syvät kulkuväylät satama-alueella. Monen satama-altaan reunat on rakennettu, jotta rajalliset vesialueet voitaisiin hyödyntää tehokkaasti kasvavalle vesiliikenteelle. Tämän takia useita kilometrejä erilaisia satamamureja on rakennettu viime vuosikymmenten aikana. Lähes kaikki muut vesirajat on pengerretty hyvin määritellyine poikkileikkauksineen. Pengerrykset on pyritty rakentamaan mahdollisimman jyrkiksi, jotta vesiliikenteelle jää mahdollisimman paljon tilaa. Vakauden parantamiseksi pengerryksen kerrokset on rakennettu useasta eri materiaalista. Monen ulkoiset toiminnot, kuten pohjakosketukset ja ruoppaukset, vaikuttavat rinteiden kuntoon ja näiden seurauksena saattaa syntyä penkereen murtumisia. Pengerryksen vahingot vaikuttavat laivojen turvallisuuteen ja veden lähellä olevien rakennusten vakauteen. Tämän takia monia pengerryksiä valvotaan

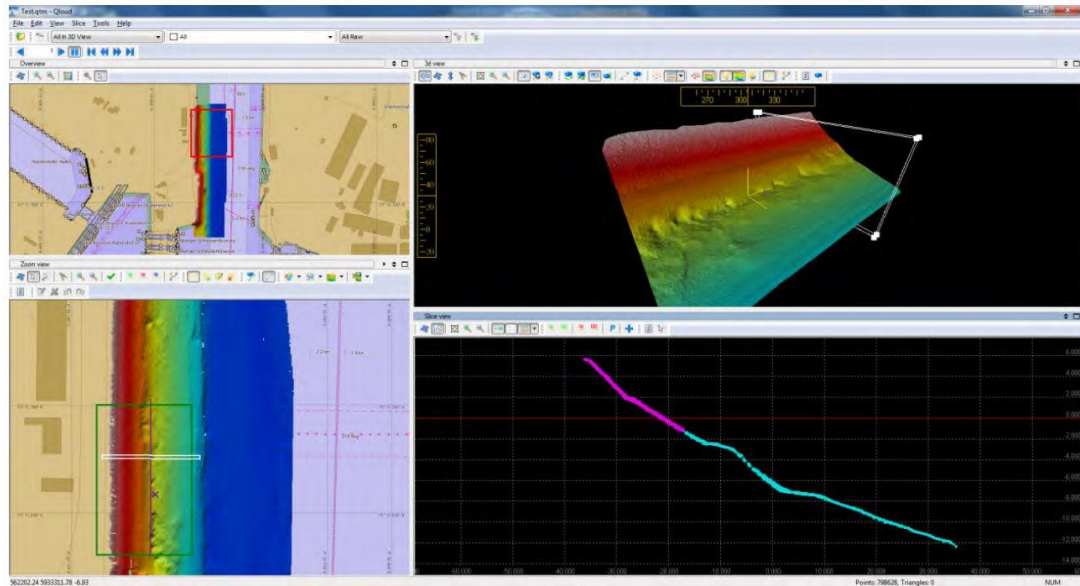
monikeilaamalla ja laserkeilaamalla niitä tietyin väliajoin. Eri ajanjaksoilla saatuja tuloksia vertailemalla voidaan rakennelmissa tapahtuneet muutokset havaita. (Thies 2011: 111.)

Koehlbrandin mittauksessa laserkeilaus tehtiin matalan vuoroveden aikaan, jotta myös korkeanveden aikana veden alla olevia kohteita saatiin mukaan. Monikeilaus tehtiin taas korkean vuoroveden aikana. Kuvasta 26 nähdään suoritettujen mittauksen ajolinjat. (Thies 2011: 112.)

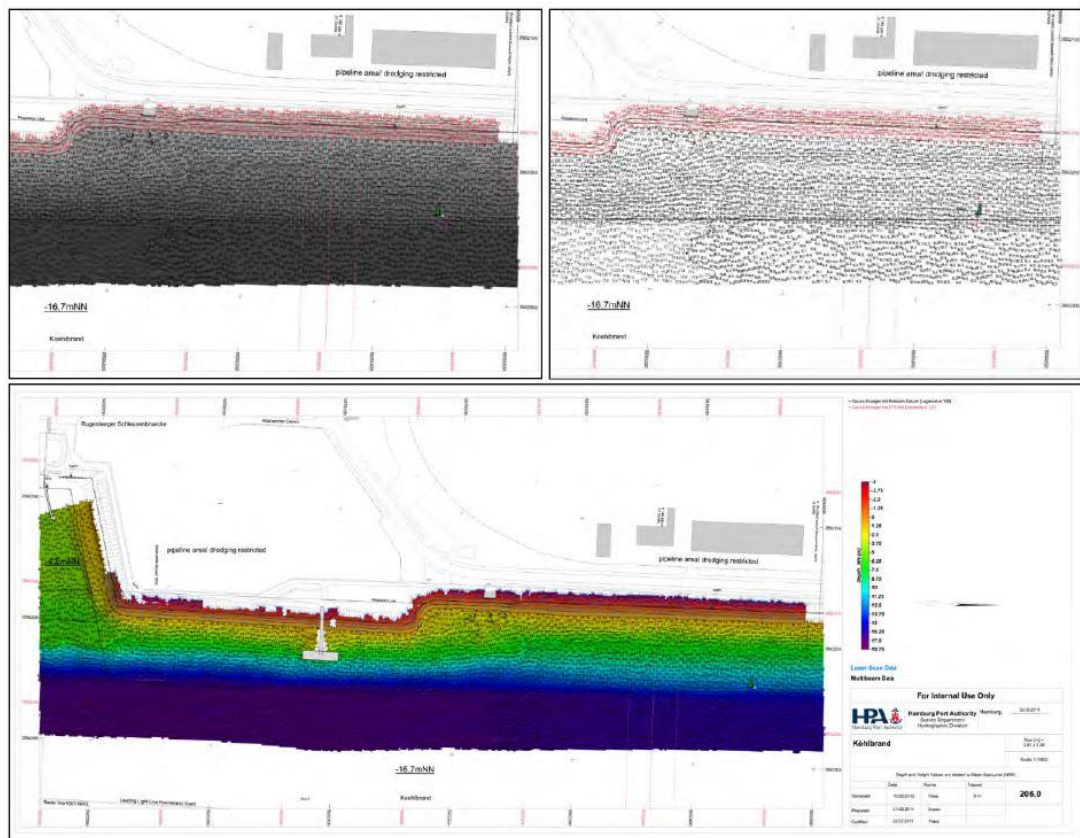


Kuva 26. Yleiskuva Koehlbrandin mittauksesta. Mittaus tehtiin kahdella erisuuntaisella ajolinjalla, jolloin laserkeilain oli kohdistettu kohtisuoraan pengertä vasten. (Thies 2011: 111.)

Mittauksen jälkeen molemmat aineistot nähtiin reaaliaikaisesti, josta jo kentällä pystyttiin tekemään ensiarviot pengerryksen kunnosta. Kuten kuvasta 27 nähdään, molemmat pistepilvet muodostavat saumattoman aineiston ilman eroavaisuuksia päällekkäin menevillä alueilla. Lopputuotteena voidaan esimerkiksi tulostaa paperikartta, josta näkyy seinämien syvyystiedot (kuva 28.). Kuten tästä esimerkistä nähdään, aineistoja yhdistämällä voidaan osin korvata staattiset, maalla tehtävät mittaukset etenkin vesirajan tuntumassa. Vuorovesi-ilmiötä voidaan käyttää hyödyksi saumattoman aineiston keräämiseksi aina syväväyliltä patoseinämien mittaamiseen. (Thies 2011: 112.)



Kuva 27. Laadunvarmistusta heti mittauksen jälkeen QPS:n jälkikäsitteilyohjelmisto QCloud:lla. Vasemmalla puolella aineisto on esitetty syvyyden mukaan koodattuna. Oikealla ylhäällä 3D-kuva kohteesta. Oikealla alhaalla poikkileikkaus, jossa laserkeilausaineisto lilana ja monikeilausaineisto sinisenä. (Thies 2011: 112.)



Kuva 28. Lopputuotteena saatu syvyyskartta pengerryksen mittauksesta. Ylhäällä laserkeilaamalla saadut pisteet merkitty punaisella täydentämässä monikeilausaineistoa vedenpäällisiin osiin. (Thies 2011: 113.)

6 Johtopäätökset

Monikeilaamalla ja mobiililaserkeilaamalla saadaan nopeasti ja tehokkaasti kuva infrastruktuurin kunnosta ja pohjan muodoista. Nämä aineistot yhdistämällä nähdään paremmin laajempi kokonaisuus ja osataan hahmottaa ongelmakohtat. Aiempaan hitaaseen tutkimiseen ja mallintamiseen verrattuna uudet menetelmät ovat kustannustehokkaampia ja mahdollistavat tulosten monimuotoisemman jatkokäytön. Työturvallisuus paranee, kun voidaan välttää maalta käsin tehtävät mittaukset vaarallisilla alueilla. Vaikka kasvillisuus, rakennukset, muut rakennelmat ja alukset voivat aiheuttaa esteitä mittausalueella ja tällöin aukkoja dataan, voidaan huolellisella etukäteissuunnittelulla saada kuitenkin hyviä tuloksia aikaiseksi.

Tavoitteena oli selvittää, miten monikeilaus- ja laserkeilausaineistoja yhdistetään ja mihin yhdistämisestä saatua aineistoa käytetään. Aineistoja voidaan yhdistää esimerkiksi QPS:n tarjoamilla ohjelmilla joko reaaliaikaisesti tai jälkikäteen. Tällöin aineistojen on kuitenkin oltava määriteltynä samassa koordinaatistossa ja niiden paikkatiedot on tunnettava. Maailmalla on viime aikoina alettu tutkia ja testata yhdistetyn mittauksen mahdollisuuksia. Useita hyötyjä onkin saatu aikaan pienistä ongelmista huolimatta. Esimerkkejä näistä ovat Hampurin sataman Dockland-rakennuksen mallintaminen vesialueineen sekä Elbe-joen pengerrysten kuntokartoitukset.

Menetelmät ovat olleet vasta vähän aikaa käytössä, joten kehittämismahdollisuuksia on tulevaisuudessa paljon. Monia hyötyjä on kuitenkin saavutettu jo nyt, joten menetelmää tullaan luultavasti vastaisuudessa käyttämään ja kehittämään paljon. Menetelmän avulla ja sen yleistyessä tuloksia pystytään hyödyntämään tulevaisuudessa toivottavasti paljon enemmän.

Lähteet

Böder, Volker, Kersten, Thomas P., Thies, Thomas, Sauer, Arne. 2011. *Mobile Laser Scanning on Board Hydrographic Survey Vessels -Applications and Accuracy Investigations-*. FIG Working Week 2011. TS05J - Hydrography in Practice, paper no 4927. Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco. Saatavissa: http://www.fig.net/pub/fig2011/papers/ts05j/ts05j_boeder_kersten_et_al_4927.pdf. Luettu 22.9.2015

Diouri, L, El Aichati, M. 2011. *The Surveying Profession in the Service of the Harbor Activities*. FIG Working Week 2011. TS05J - Hydrography in Practice, paper no 5304. Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco. Saatavissa: http://www.fig.net/pub/fig2011/ppt/ts05j/ts05j_diouri_elaichati_5304_ppt.pdf. Luettu 22.9.2015

Geodeettinen laitos avaa ilmaisen paikannuspalvelun. 2014. Tiedote. Geodeettinen laitos. Saatavissa: http://euref-fin.fgi.fi/cgi/sites/default/files/pp/Lehdistotiedote_paikannuspalvelu.pdf. Luettu 22.9.2015

Häkli, Pasi, Koivula, Hannu. 2004. *Virtuaali RTK (VRS) tutkimus*. Helsinki: Edita Prima. 60 s.

Jokelainen Miikka. 2009. *GPS-vastaanotin- ja -antennivertailu*. Aalto-yliopisto. Saatavissa: http://autsys.aalto.fi/intranet/as-0.3200/attach/A09-02/GPS_kirjallisuusselvitys.pdf. Luettu 24.9.2015

Kenny, A. J., Cato, I., Desprez, M., Fader, G., Schüttenhelm, R. T. E., Side, J. 2003. *An overview of seabed-mapping technologies in the context of marine habitat classification*. Oxford Journals, Life Sciences, ICES Journal of Marine Science, Volume 60, Issue 2, S. 411-418. doi: 10.1016/S1054-3139(03)00006-7. Saatavissa: <http://icesjms.oxfordjournals.org/content/60/2/411.full>. Luettu 22.9.2015

Fehlerquellen bei GPS. 2015. Kowoma. Saatavissa: <http://www.kowoma.de/gps/Fehlerquellen.htm>. Luettu 24.9.2015

Laurila, Pasi. 2010. *Mittaus ja kartoitustekniikan perusteet*. Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro 3. Rovaniemi 2010. Rovaniemen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: http://virtual.ramk.fi/Tuotantoalat/eJulkaisu_Mittaus%20ja%20kartoitustekniikka_Laurila.pdf. Luettu 22.9.2015

GPS-mittaus. 2015. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>. Luettu 24.9.2015

Mayer, Larry, A. Paton, Mark. Gee, Lindsay. Gardner, James, V. Ware, Colin. 2000. *3D GIS: Interactive 3-D Visualization: A tool for seafloor navigation, exploration and engineering*. IEEE Oceans Conference. Providence, RI, USA. Sep. 11-14, 2000. Saatavissa: <http://ccom.unh.edu/vislab/PDFs/3D GIS.pdf>. Luettu 22.9.2015

Mitchell, T., J., Miller, C., A., Lee, P., T. 2011. *Multibeam Surveys extended above the waterline*. Proceedings of 2011 WEDA Technical Conference and Texas A&M Dredging Seminar. Verkkodokumentti. Western Dredging. https://www.westerndredging.org/phocadownload/ConferencePresentations/2011_Nashville/Session7B-FieldEquipmentAndStudies/1%20-%20Mitchell,%20Miller,%20Walters%20-%20Multibeam%20Surveys%20Extended%20Above%20the%20Waterline.pdf. Luettu 9.10.2015

MML Paikkatietokeskus FGI. 2015. *Paikannuspalvelu verkkosivut*. Saatavissa: <http://euref-fin.fgi.fi/fgi/fi/paikannuspalvelu>. Luettu 22.9.2015

Pötrönen, Jani. 2013. *The Most Effective Solution for a Professional Inspection of Coastal Infrastructure*. Ocean News & Technology. May 2013. Volume 19. Issue 4. s. 24–25. Saatavissa: <http://www.teledyne-reson.com/wp-content/uploads/2013/05/meritaito.pdf>. Luettu 22.9.2015

RIEGL VZ-400. 2013. Terrestrial Scanning, Products, RIEGL. Verkkodokumentti. <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/5/>. Luettu 22.9.2015

RIEGL VZ-400 Datasheet. 2013. Verkkodokumentti. RIEGL. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/10_DataSheet_VZ-400_2014-09-19.pdf. Luettu 22.9.2015

VRS-järjestelmä. 2013. Verkkodokumentti. Tampereen kaupunki. <http://www.tampere.fi/kaavatjakiinteistot/kiinteistopalvelut/maastojageotekniikka/vrsjarjestelma.html>. Luettu 22.9.2015

Teledyne RESON Seabat 7125 product leaflet 13. 2015. Verkkodokumentti. Teledyne-Reson. <http://www.teledyne-reson.com/products/echo-sounder-seabat/multibeam-seabat-7125/>. Luettu 22.9.2015

Thies, Thomas. 2011. *A Vessel-Based Mobile Mapping System – From Sensor Integration to Multipurpose Products*. Master Thesis, HafenCity University Hamburg. Saatavissa: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxriegl/downloads/Thies_Thomas__2011_-_A_Vessel-Based_Mobile_Mapping_System__Master_Thesis__HafenCity_University_Hamburg__Germany_part1.pdf. Luettu 22.9.2015

Toivonen, Tuomas, Ylikoski, Juho. 2013. *Verkko-RTK-mittaus*. Insinööriyö, Metropolia ammattikorkeakoulu. Saatavissa: http://theseus.fi/bitstream/handle/10024/57475/Toivonen_Tuomas_Ylikoski_Juho.pdf?sequence=1. Luettu 22.9.2015

Vermeer, Martin. 2015. *Navigoinnin menetelmät*. Aalto-yliopisto. Saatavissa: http://users.tkk.fi/mvermeer/nav_fi.pdf. Luettu 22.9.2015