



TEKNIikka JA LIIKENNE

Rakennustekniikka

Ympäristörakentaminen

INSINÖÖRITYÖ

LASERKEILAUKSEN HYÖDYNTÄMINEN INFRARAKENTAMISESSA

**Työn tekijä: Katri Ilvonen
Työn ohjaaja: Hannu Hyyppä**

Työ hyväksytty: ____ . ____ . 2008

**Mika Lindholm
lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinööriyö tehtiin Teknillisen korkeakoulun Maanmittaustieteiden laitokselle Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutissa. Haluan kiittää kaikkia projektissa mukana olleita ihania ihmisiä! Kiitokset myös kotiväelle.

Helsingissä 23.11.2008

Katri Ilvonen

TIIVISTELMÄ

Työn tekijä: Katri Ilvonen	
Työn nimi: Laserkeilauksen hyödyntäminen infrarakentamisessa	
Päivämäärä: 23.11.2008	Sivumäärä: 47 s. + 2 liitettä
Koulutusohjelma: Rakennustekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Ympäristörakentaminen
Työn ohjaaja: Lehtori, TkL Mika Lindholm, Metropolia Työn ohjaaja: TkT Hannu Hyyppä, TKK	
<p>Laserkeilaustekniikkaa on sovellettu 1990-luvun lopulta lähtien erityisesti maastomallituo- tannossa, metsäntutkimuksen välineenä ja ympäristön mallintamisessa.</p> <p>Rakentamisessa laserkeilaustekniikoiden hyödyntäminen on vielä melko vähäistä. Sitä on kuitenkin jo hyödynnetty varsinkin erilaisten tilojen mallintamiseen, maastomallien tekemi- seen ja siltojen mittaamiseen.</p> <p>Insinööriyön tavoitteena oli selvittää, kuinka laserkeilausta on jo hyödynnetty infraraken- tamisessa ja minkälaisia uusia käyttömahdollisuuksia sillä voisi olla. Tavoitteena oli myös selvittää käyttäjien kokemia ongelmia ja puutteita laserkeilausteknologian soveltamisessa ja hyödyntämisessä sekä kerätä parannusehdotuksia. Yhtenä tavoitteena oli myös laser- keilauksen popularisointi ja tuominen ihmisten tietoisuuteen.</p> <p>Insinööriyön aikana kirjallisuuden kautta perehdyttiin laserkeilaintekniikkaan ja sovellus- alueisiin. Haastatteluin hankittiin lisää tietoa eri osapuolilta: laitevalmistajilta ja maahan- tuojilta, ohjelmistotaloilta, tutkijoilta ja käytännön soveltajilta. Käytännön koetyötä tehtiin ilmalaserkeilausaineiston käsittelystä.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena saatiin selville monia mahdollisuuksia hyödyntää laserkeilausta infrarakentamisessa suunnittelusta toteutukseen. Samalla saatiin kartoitettua suurimpia ongelmia ja kurkistettua tulevaisuuteen.</p>	
Avainsanat: Laserkeilaus, infrarakentaminen, pistepilvi, rakentaminen	

ABSTRACT

Name: Katri Ilvonen	
Title: Applicability of laser scanning techniques in infrastructure construction	
Date: 23 Nov 2008	Number of pages: 47
Department: Civil Engineering	Study Programme: Environmental Construction Engineering
Instructor: Senior lecturer Mika Lindholm	
Supervisor: D.Sc. Hannu Hyyppä, TKK	
<p>Since the late 1990s, laser scanning techniques have been used particularly for creating terrain and environmental models, and as methods in forest research. However, in recent years, the equipment and software have improved considerably, and nowadays they can be used for a number of other commercial purposes.</p> <p>The use of laser scanning in construction projects has been scarce. Nevertheless, the techniques have been used for modelling spaces, creating terrain models, and measuring bridges, for example.</p> <p>The purpose of this thesis is to explore how laser scanning can be used in infrastructure construction. The idea is to find out what problems users have had in using these techniques and how the techniques could be improved. A further aim of the thesis is to spread knowledge about laser scanning techniques among the wider public.</p> <p>The basics and applications of laser scanning techniques were studied through research literature. Interviews with experts representing different parties were conducted to gain more information about the different ways laser scanners are used in infrastructure construction as well as to reveal possible problems in using laser scanning and to find out about new applications. The work also included experiments on processing airborne laser data.</p> <p>The findings of the study include a number of solutions on how to effectively use laser scanning in infrastructure construction. The study reveals some of the biggest problems in using laser scanning and suggests improvements to the techniques.</p>	
Keywords: Laser scanning, infrastructure construction, point clouds, construction	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen taustat ja tavoitteet	1
1.2	Infrarakentaminen	2
1.3	Tutkimusmenetelmät	3
2	LASERKEILAUS	4
2.1	Mittaaminen laserilla	4
2.2	Laserkeilaimen toimintaperiaatteet	5
2.2.1	<i>Pulssilaser</i>	6
2.2.2	<i>Vaihe-erolaser</i>	6
2.2.3	<i>Optiseen kolmiomittaukseen perustuva laser</i>	6
2.3	Laserkeilaintyytit	7
2.3.1	<i>Ilmalaserkeilaus</i>	7
2.3.2	<i>Maalaserkeilaus</i>	11
2.3.3	<i>Teollisuuslaserkeilaus</i>	13
3	LASERKEILAUSOHJELMISTOT	15
3.1	Ilmalaserkeilausaineistojen käsittely	15
3.1.1	<i>Esimerkki ilmalaserkeilausaineiston käsittelystä</i>	16
3.2	Maalaserkeilaus- ja teollisuuskeilausaineistojen käsittely	21
4	LASERKEILAUSMENETELMÄT INFRARAKENTAMISESSA	25
4.1	Kirjallisuustutkimus laserkeilauksen käyttämisestä infrarakentamisessa	25
4.2	Laserkeilaus infrarakentamisessa haastatteluiden perusteella	34
4.2.1	<i>Laserkeilauksen käyttömahdollisuudet</i>	34
4.2.2	<i>Laserkeilauksen ongelmia</i>	37
4.2.3	<i>Laserkeilauksen kehitys</i>	40
4.3	Johtopäätökset	43
5	YHTEENVETO	46
	LÄHDELUETTELO	48

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustat ja tavoitteet

Laserkeilaustekniikkaa on kehitetty alun perin maanpuolustuksen tarpeisiin mm. Ruotsissa ja Yhdysvalloissa. 1990-luvun lopulta lähtien sitä on päästy kehittämään ja hyödyntämään myös muihin tarkoituksiin. Erityisesti metsien inventoinnin välineenä laserkeilausta on tutkittu paljon. Nykyään sekä laserkeilauslaitteistot että mittaustietoa käsittelevät ohjelmistot ovat kehittyneet ja laitteita ja ohjelmia käyttävät ihmiset hankkineet tarpeeksi käytännön kokemusta ja tietoa, jotta laserkeilaustekniikkaa pystytään tehokkaasti hyödyntämään myös kaupallisesti.

Rakentamisessa laserkeilaustekniikoiden hyödyntäminen on vielä melko vähäistä ja menetelmät ovat suurelle osalle rakennusalan ammattilaisia tuntemattomia.

Insinööriä tehdään Teknillisen korkeakoulun Maanmittaustieteiden laitoksella Rakennetun ympäristön mittauksen ja mallinnuksen instituutissa.

Insinööriön tavoitteena on selvittää, kuinka laserkeilausta on jo hyödynnetty infrarakentamisessa ja minkälaisia uusia käyttömahdollisuuksia sillä voisi olla. Tavoitteena on myös selvittää käyttäjien kokemia ongelmia ja puutteita laserkeilausteknologian soveltamisessa ja hyödyntämisessä sekä kerätä parannusehdotuksia. Lisäksi tällä työllä pyritään laserkeilauksen popularisointiin ja tuomiseen ihmisten tietoisuuteen.

Insinööriön aikana perehdytään kirjallisuuden kautta laserkeilaintekniikkaan, ohjelmistoihin ja sovellusalueisiin. Teemahaastattelut aiheesta toteutetaan räätälöitynä eri kohdeosapuolille: ohjelmistotaloille, keilainvalmistajille tai jälleenmyyjille ja käytännön soveltajille sekä tutkijoille. Käytännön koetyönä on ilmakeilaimen laseraineiston käsittelyä maailman johtavalla Terra-laserkeilausohjelmistolla.

1.2 Infrarakentaminen

Infrastrukturi tarkoittaa yhteiskunnan toiminnalle välttämättömiä palveluja, jotka ovat tuotannon ja taloudellisen kehityksen perusehtoja. Infrastrukturiin kuuluu sekä yhteiskunnan rakennettu ympäristö että sähköiset ohjelmistot ja palvelut.¹

Tekninen infrastrukturi sisältää liikenneyhteydet, vesihuollon, energiahuollon, jätehuollon, tietoliikenneyhteydet ja muut järjestelyt, jotka mahdollistavat yhteiskunnan toiminnan.²

Infrarakentaminen on siten teknisen infrastruktuurin tekemistä, korjaamista ja parantamista. Usein hankkeet ovat suuria, kalliita ja pitkäkestoisia ja vaikuttavat voimakkaasti ympäristöön. Tyypillistä infrarakentamista on muun muassa²:

- Teiden, katujen ja rautateiden rakentaminen
- Siltojen rakentaminen
- Vesiväylien rakentaminen
- Satamien rakentaminen
- Tulvasuojelurakenteiden rakentaminen
- Patojen rakentaminen
- Lentokenttien rakentaminen
- Vesihuoltoverkostojen ja -laitosten rakentaminen
- Energiaverkostojen ja -laitosten rakentaminen
- Tietoliikenneverkostojen rakentaminen
- Tunneleiden rakentaminen
- Kalliotilojen rakentaminen
- Ympäristön rakentaminen.

Suomen koko infrastruktuurin pääoma-arvon lasketaan nousevan noin 52 miljardiin euroon (vuoden 2000 tilanne). Tästä tieverkoston osuus on noin neljäsosa ja katuverkoston viidesosa. Loppu koostuu muun muassa raide-, tietoliikenne ja energiaverkostoista.³ Infrastrukturi muodostaakin merkittävän osan Suomen kansallisvarallisuudesta. Vuotuisen tuotannon arvo on yli 4 miljardia euroa⁴.

¹ www.wikipedia.fi, viitattu 10.11.2008

² Kankainen, Jouko ym. 2000. Infraprojektin osittelu, s. 7-8

³ Repo, Harri. 24.2.2006. Tekniikka ja talous

⁴ Tietoyhteys 2(2006). Tierakentaminen uusille urille, s. 2

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa hyödynnettiin kirjallisuutta ja Internetiä perustietojen hankkimiseen.

Alan asiantuntijoille tehtiin teemahaastattelu laserkeilauksen hyödyntämismahdollisuuksien, ongelmien ja tulevaisuuden selvittämiseksi.

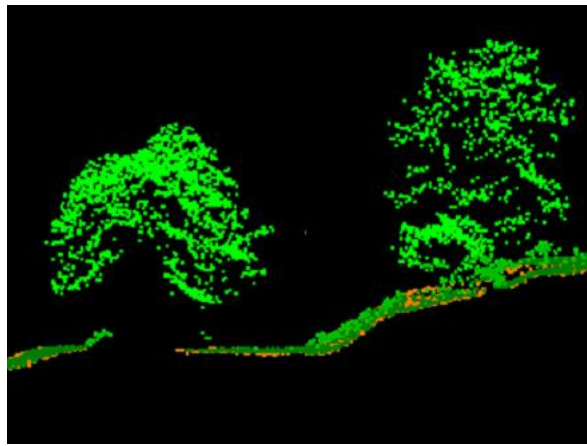
Haastatteluiden lisäksi lähetettiin sähköpostitse kysely aiheesta alan asiantuntijoille. Kyselyn kysymykset poikkesivat hieman toisistaan riippuen kohde-ryhmästä, mutta tutkimuksen kannalta pääaiheet pysyivät samoina. Sekä kyselyiden että haastatteluiden kysymykset on esitelty liitteissä 1 ja 2.

Laserkeilausaineiston käyttöön tutustuttiin tekemällä ilmalaserkeilausaineiston käsittelyyn liittyvä maastomallityö.

2 LASERKEILAUS

2.1 Mittaaminen laserilla

Laserkeilauksella tarkoitetaan mittausmenetelmää, jossa etäisyyden mittaus perustuu laserkeilaimesta lähtevän lasersäteen kulkuun laitteesta kohteeseen ja takaisin. Lähettämällä lasersäteitä eri suuntiin saadaan muodostettua kolmiulotteinen näkemä ympäristöstä, niin sanottu pistepilvi (kuva 1). Pistepilvessä on tuhansia tai jopa miljoonia pisteitä, joilla jokaisella on x-, y- ja z-koordinaatit.¹ Laserkeilaimella mitattaessa ei tarvitse koskea itse mitattavaan kohteeseen, jolloin vaarallistenkin kohteiden mittaus onnistuu turvallisesti kauempaa².



Kuva 1. Laserkeilauspistepilvi. Lähde: © Hannu Hyyppä 2004

Mittausten tarkkuuteen vaikuttavat näkyvyyttä heikentävät asiat, kuten lumi- ja vesisade sekä pöly. Virheellisiä tuloksia saadaan, jos lasersäteet heijastuvat ennenaikaisesti pois, absorboituvat tai poikkeutuvat. Tällaisissa olosuhteissa laserkeilauksen tekeminen voi käydä mahdottomaksi.² Mittausten onnistumiseen vaikuttavat myös mitattavan kohteen muoto, väri, pintamateriaali ja asento suhteessa keilaimen. Mittaaminen kohti valonlähdettä on ongelmallista.³

Laserkeilaimet pystyvät tallentamaan takaisin palaavan lasersäteiden intensiteetin. Intensiteetin perusteella jokainen piste saa sävyarvon, mikä helpottaa aineiston tulkintaa. Intensiteettiin vaikuttaa muun muassa kohteen väri, ma-

¹ Kukko, Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin, s.7.

² Koski, Jarkko. Maankäyttö 4 (2001), s. 24.

³ Järvinen, Jaakko. 2007. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen, s. 20-24.

teriaali, pinnan tasaisuus ja säteen osumiskulma. Jos mitattavan kohteen pinnassa ei ole juurikaan korkeuseroja, intensiteettitiedon avulla siitä saadaan erottumaan esimerkiksi mahdolliset kuviot.¹

Laserkeilaimissa on usein lisävarusteena digitaalikamera, jolla mittausten yhteydessä otetaan kuvia. Digitaalikuvat voidaan liittää pistepilviaineistoon, jolloin pinnoista saadaan teksturoitua luonnollisemman näköisiä. Pistepilviin voidaan liittää myös eri aikaan otettuja kuvia tai satelliittikuvia. Yhdistetyn mittausjärjestelmän etu kuitenkin on, että laserpisteille voidaan määrittää yksilölliset väriarvot digitaalikuvien pohjalta. Väriarvojen myötä pistepilvistä saadaan havainnollisempia.²



Kuva 2. Pistepilveen on saatu oikeat värit liittämällä siihen digitaalikuva. Lähde: www.leica.fi.

Laserkeilainjärjestelmät voidaan jaotella karkeasti kolmeen pääryhmään: ilmalaserkeilaimiin, maalaserkeilaimiin (terrestriaaliset keilaimet) ja teollisuuslaserkeilaimiin (esineskannerit)³.

2.2 Laserkeilaimen toimintaperiaatteet

Laserkeilain koostuu lasertykistä, joka tuottaa lasersäteen, keilainosasta, joka poikkeuttaa lasersädettä ja ilmaisinosasta, joka tulkitsee vastaanotetun signaalin ja määrittää sen perusteella etäisyyden kohteeseen. Etäisyyden määrittäminen perustuu valon kulku-aikaan, vaihe-eroon, näiden yhdistel-

¹ Koski, Jarkko. 2001. Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen, s. 25.

² Järvinen, Jaakko. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen, s. 21.

³ Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

mään tai kolmiomittaukseen laitetyypistä riippuen.¹ Mittaustieto tallentuu keilaimen sisäiseen muistiin tai suoraan tietokoneelle.²

2.2.1 Pulssilaser

Pulssilaser lähettää katkonaista lasersädettä, jonka edestakainen kulku-aika mitataan laitteen ja kohteen välillä. Tämän jälkeen kohteen etäisyys voidaan määrittää pulssin kulkuajan ja valonnopeuden avulla.³

Pulssilasereilla voidaan mitata etäisyyksiä suurella vaihteluvälillä. Laitteen etäisyys kohteesta voi olla muutamasta metrillä yli kilometriin, tyypillisesti satoja metrejä. Mittausetäisyyteen vaikuttavat lähetetyn pulssin teho ja toistotaajuuden määräämä enimmäiskulku-aika. Pulssilaserin käytön rajoituksena on vain muutaman tuhannen havainnon toistotaajuus. Toistotaajuudella tarkoitetaan mittaushavaintojen määrää sekunnissa.⁴

2.2.2 Vaihe-erolaser

Vaihe-erolaser lähettää jatkuvaa signaalia, jonka intensiteettiä moduloidaan siniaalloilla tai useampia eri kanta-aallonpituuksia sisältävällä signaalilla. Laserkeilain määrittää lähetetyn ja kohteesta heijastuneen ja vastaanotetun signaalien välisen vaihe-eron. Kanta-aalto voidaan ratkaista useamman aallonpituuden moduloinnilla. Etäisyshavainto saadaan ratkaistua vaihe-eron ja kokonaislukutuntemattoman avulla.³

Vaihe-erolaserilla saadaan tyypillisesti jopa 250 000 mittausta sekunnissa (250 kHz taajuus). Suurin mittausetäisyys on pääsääntöisesti alle 100 m. Mittausetäisyyteen vaikuttaa sekä lähetysteho että kanta-aallon modulaatio.⁴

2.2.3 Optiseen kolmiomittaukseen perustuva laser

Optiseen kolmiomittaukseen perustuvat laserkeilaimet tuottavat valopisteen, joka suunnataan mitattavan kohteen pintaan. Kohteesta takaisin heijastuva valopiste kulkee linssin lävitse sensorin pinnalle, jossa sen sijainti rekisteröidään. Kohteen etäisyys lasketaan valonlähteen ja sensorin välisen etäisyyden ja havaittavan valon saapumiskulman perusteella. Tähän menetelmään perustuvia laserkeilaimia käytetään erityisesti vaativissa teollisuusmittauk-

¹ Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

² Joala, Vahur. 2007. Terrestriallinen laserkeilaus.

³ Järvinen, Jaakko. 2007. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen, s. 12-13.

⁴ Kukko, Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin, s.7-14.

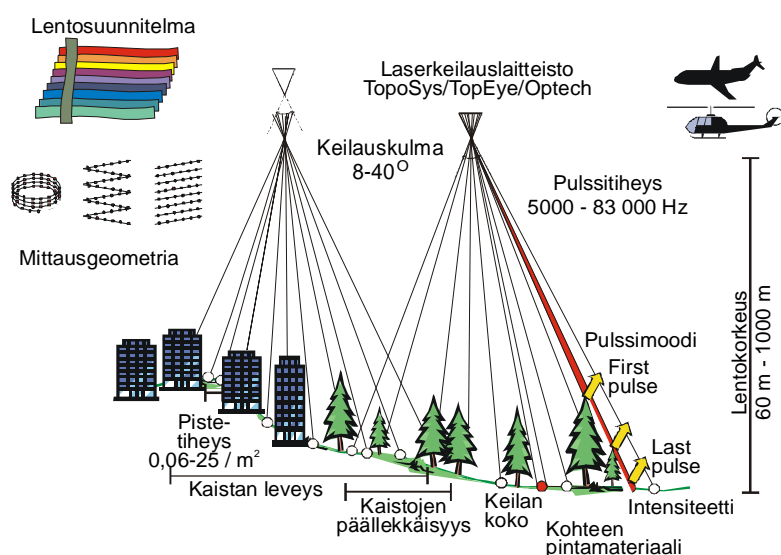
sisä, joissa mittaustarkkuuden on oltava hyvä. Laitteen käytön rajoituksena on lyhyt mittausetäisyys ja suuret katvealueet¹.

2.3 Laserkeilaintyytit

2.3.1 Ilmalaserkeilaus

Ilmalaserkeilausta tehdään helikopterista tai lentokoneesta. Laserkeilaimen lisäksi järjestelmään kuuluu paikannuslaitteisto (GPS) ja koneen asentoa seuraava inertiajärjestelmä (IMU). Yhdistämällä laitteiden tuottama tieto saadaan selville etäisyydet ja pisteiden sijainti valitussa koordinaattijärjestelmässä. Lasermittauslaitteisto tallentaa lennon aikana saadut tiedot myöhempää käsittelyä varten.²

Kuvassa 3 on esitetty ilmalaserkeilaimen parametreja. Mitattavasta kohteesta riippuen lentokorkeus on yleensä 60 - 1 500 m. Mittaukset tehdään nauhamaisina lentolinjoina, joiden leveys voi olla jopa pari sataa metriä. Vierekkäiset lentolinjat suunnitellaan niin, että linjoissa on hieman päällekkäisyyttä. Pulssitiheys on 7 000 - 125 000 mittausta sekunnissa ja pistetiheys tyypillisesti 0,06 - 25 pistettä neliömetrillä. Pistetiheys vaikuttaa siihen, mitä pisteistä on mahdollista määrittää ja havaita. Kun pisteitä on paljon neliömetrillä, saadaan hyvä erotuskyky, jolloin on mahdollista mitata yksittäisten kohteiden ominaisuuksia.²



Kuva 3. Ilmalaserkeilaimen tyypilliset parametrit. © Hannu Hyypä, 2007

¹ Järvinen, Jaakko. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen, s. 14-15.

² Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

Laserkeilan koko maanpinnalla on suurempi kuin pelkkä piste, jolloin on mahdollista, että se osuu moniin kohteisiin. Monet laserkeilaimet pystyvät vastaanottamaan useamman kaiun yhdestä havainnosta. Yleensä tallennetaan ensimmäinen kaiku, joka kuvaa lähinnä laitetta olevaa kohdetta, ja viimeinen kaiku, joka kuvaa kauimpana sijaitsevaa kohdetta. Näin ensimmäinen kaiku voidaan saada vaikka puun latvasta ja viimeinen maanpinnasta.¹



Kuva 4. Kun tallennetaan sekä ensimmäinen että viimeinen kaiku, voidaan saada tietoa esimerkiksi puiden korkeudesta ja maanpinnasta. Lähde: Jussi Silvennoinen, Laserkeilaus suunnistuskartoituksessa -luentomateriaali.

Ilmalaserkeilauksella voidaan saavuttaa jopa parempi kuin 10 cm:n tarkkuus.² Tarkkuuteen vaikuttaa muun muassa lentokorkeus ja -nopeus, pulssitiheys, keilauskulma, laserkeilan leviäminen, sijainnin ja asennon määrittämisen tarkkuus ja mitattavan kohteen ominaisuudet.¹

Ilmalaserkeilaukseen yhdistetään usein kohteen digitaalikuvaus. Maanpinnan muotojen ja korkeusvaihteluiden lisäksi pistepilvistä tuotettavissa maaleissa halutaan usein kuvata myös jo olemassa olevia yksilöllisiä kohteita ja piirteitä, kuten puita, siltoja ja taloja.³

Paras ajankohta mittausten tekemiseen on kevät tai syksy, kun puissa ei ole vielä lehtiä, aluskasvillisuutta on vähän eikä lunta ole maassa. Maanpinnan mittaaminen onnistuu kuitenkin peitteisiltäkin alueilta kuten metsistä, koska usein lasersäteestä edes joku osa pääsee kulkemaan puuston läpi.⁴

¹ Haggren, Henrik - Rönholm Petri. 2004. Optinen 3D-mittaus ja laserkeilaus.

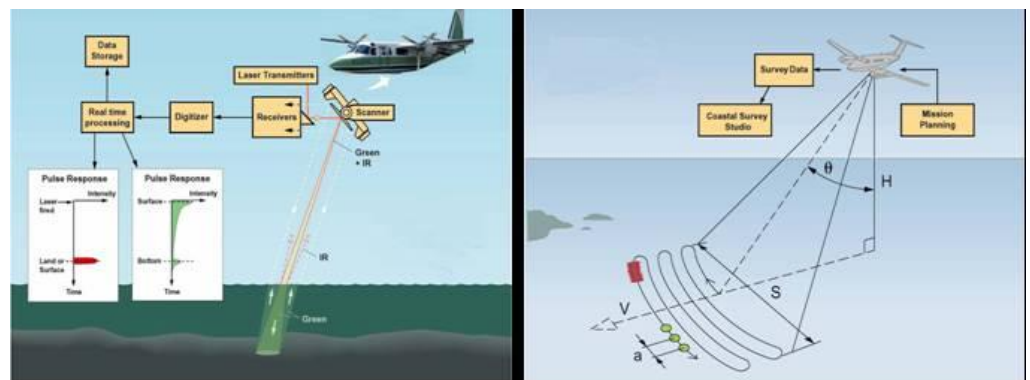
² Joala, Vahur. 2007. Terrestriaalinen laserkeilaus.

³ Ahlavuo, Marika - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus on tulevaisuuden tarkkaa 4D-paikkatietoa, s. 50-51.

⁴ Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

Useimmiten ilmalaserkeilaamalla mitataan maanpintaa ja maanpinnalla olevia kohteita. Erikoistapaus on vedenalainen kartoitus laserkeilaamalla. Tavallisessa ilmalaserkeilauksessa lasersäteen aallonpituus on punainen eikä mittaustietoa saada vedenpinnan alapuolelta, mutta erityisesti vedenalaisia kohteita mitatessa käytetään lisäksi vihreää aallonpituutta. Järjestelmä lähettää vuoronperään punaisen ja vihreän laserin ennalta määrätyllä mittauskuvilla. Vedenalaisessa mittauksessa voidaan käyttää tehokkaampaa laseria, jolloin mittaustuloksia saadaan syvemmältä.^{1,2}

Esimerkiksi Hawk Eye II -järjestelmä mittaa samanaikaisesti 4 000 syvyystietoa sekunnissa ja 64 000 topografista maanpinnan korkeustietoa sekunnissa. Lentonopeus on tyypillisesti 275 km/h.^{2,3} Kuvassa 5 on havainnollistettu Hawk Eye II:n kokoonpano ja toimintatapa.



Kuva 5. Hawk Eye II -järjestelmän kokoonpano ja toimintatapa. © BLOM Aerofilms

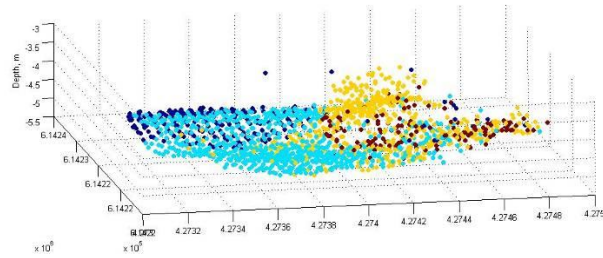
Lentolinjojen leveys vaihtelee 110 m:stä 270 m:iin lentokorkeuden ollessa vastaavasti 250-500 m. Päällekkäisyyttä lentolinjoissa on noin 20-25 m. Linjoja suunniteltaessa on huomioitava, että suorat lentolinjat ovat parhaita. Turhat käännökset vievät aikaa ja rahaa. Myös sääolosuhteet on huomioitava mittauksissa. Mittausten onnistumiseen vaikuttavat muun muassa veden sameus, tila, heijastuvuus, virtaukset ja lentokorkeus.³

Vedenalainen aineisto luokitellaan käyttämällä pulssin korkeutta ja leveyttä sekä heijastumaa. Hiekka-alueet ovat usein tasaisia ja kivet voidaan erottaa merenpinnan muodoista tulkitsemalla aineistoa (kuva 6).³

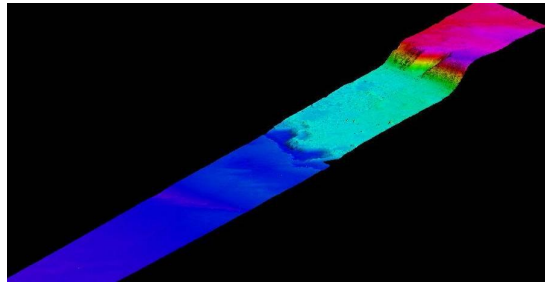
¹ Blom Oy. 2008. Vedenalaista kartoitusta laserilla.

² Hyypä, Hannu - Ahlavo, Marika. 2008. Vihreä laser - Vedenalaista kartoitusta laserilla.

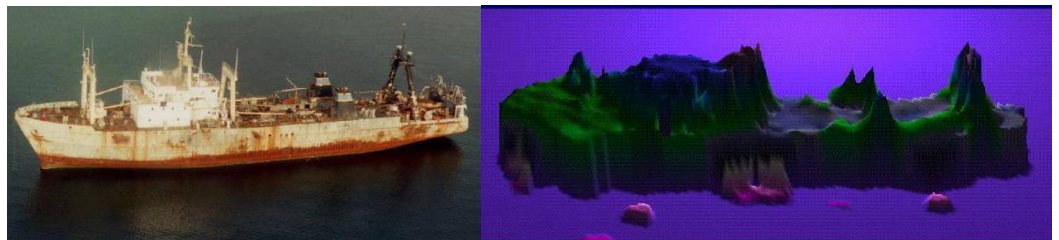
³ Blom Oy. 2008. Vedenalaista kartoitusta laserilla.



Kuva 6. Vedenalaisen aineiston luokittelua. © BLOM Aerofilms.



Kuva 7. Maastomallia meren pohjasta. © BLOM Aerofilms.



Kuva 8. 20 m:n syvyydessä oleva laivan hylky. © BLOM Aerofilms.

Suomessa laserkeilaus veden läpi on ongelmallista, koska vedet ovat sameita, jolloin lasersäteen tunkeutumissyvyys on pieni. Esimerkiksi Bahamalla voidaan tuottaa hyvää pohjamallia jopa 20 metrin syvyydestä.¹

Aluevesien merenmittaustiedon ja -aineistojen sekä näistä tehtyjen syvyysmallien ja muiden tuotteiden saatavuus on rajoitettua ja luvanvaraista. Merikarttatuotteilla (painetut merikartat ja elektroniset merikartta-aineistot) esitetty syvyysinformaatio on kuitenkin yleisesti saatavilla.²

Kotimaisilla laserkeilausta tarjoavilla yrityksillä ja organisaatioilla (mm. Destia, TopTerra Oy ja FM-Kartta Oy) ei ole omaa ilmalaserkeilainta. Silti ne tarjoavat ilmalaserkeilauspalveluja ruotsalaisten (mm. TopEye), norjalaisten (mm. Fotonor) ja saksalaisten (mm. Toposys) laserkeilausyritysten avulla.³

¹ Rönholm, Petri. Haastattelu 14.2.2008.

² Vertanen, Antti ym. 2006. Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja vaihtoehdot, s. 10.

³ Hyypä, Juha. Haastattelu 14.2.2008.

2.3.2 Maalaserkeilaus

Maalaserkeilaimella mittaus tapahtuu maanpinnalta. Usein mittaus suoritetaan paikallaan olevalla laitteella, mutta keilain voidaan kiinnittää myös liikkuvaan ajoneuvoon kuten autoon tai veneeseen. Tällöin voidaan puhua liikkuvasta kartoituksesta.¹



Kuva 9. Maalaserkeilausta rakennetussa ympäristössä Leica- ja iSite-keilaimilla.
© Hannu Hyyppä 2008.

Maalaserkeilausjärjestelmä koostuu keilaimesta, pakkokeskitysalustasta ja jalustasta, virtalähteestä (akku tai verkkovirta) ja tietokoneesta. Joissakin järjestelmissä tietokonetta ei tarvita vielä mittauspaikalla, vaan tieto tallentuu laserkeilaimen sisäiseen muistiin. Tietokoneella voidaan laserkeilauksen aikana valvoa ja ohjata mittaustapahtumaa.^{2,3}

Maalaserkeilain mittaa pisteitä säännölliseen ruudukkoon. Lähellä keilainta pisteitä saadaan tiheämmin ja kauempana ne harvenevat. Laitteesta riippuen ruudukon tiheyttä voidaan säätää.⁴ Maalaserkeilaimilla voidaan toimintaperiaatteesta riippuen saavuttaa jopa useiden satojen tuhansien pisteiden mittaussnopeus (500 000 pistettä sekunnissa, kun mitataan pelkkää poikkeileikkausta).⁴

Mittausetäisyys vaihtelee laitteesta riippuen metristä useisiin satoihin metreihin. Maalaserkeilainten tarkkuus on parhaimmillaan alle 1 cm.¹

¹ Ahlavo, Marika - Hyyppä, Hannu. 2007. Laserkeilaus on tulevaisuuden tarkkaa 4D-paikkatietoa, s. 50-51.

² Joala, Vahur. 2007. Terrestriaalinen laserkeilaus.

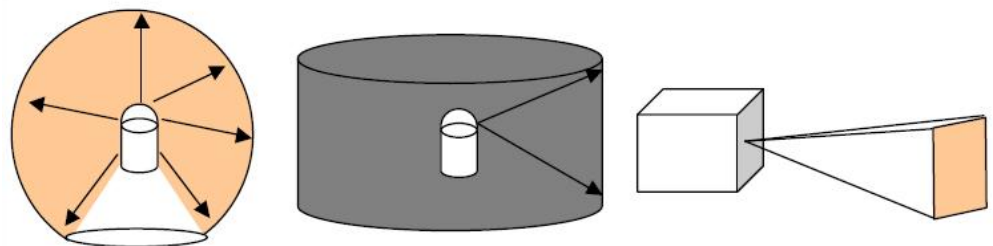
³ Koski, Jarkko. 2001. Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen, s. 25.

⁴ Joala, Vahur. 2007. Terrestriaalinen laserkeilaus.

Laserkeilaimen tekniset ominaisuudet määrittävät mihin se soveltuu. Soveltuvuutta voidaan arvioida esimerkiksi mittausetäisyyden, kulmaresoluution, lasersäteen divergenssin (säteen hajoamiskulman) ja keilauskulman perusteella. Kulmaresoluutio määrää keilaimen kyvyn toistaa kohteen yksityiskoh-
tia. Mitä hienompi laitteen keilauskulman jako on, sitä tiheämmin pisteitä saadaan ja sitä paremmin pienetkin kohteet erottuvat. Keilauskulma vaikuttaa mittausprosessin läpivientiaikaan merkittäväällä tavalla, koska kapealla näkemällä varustetulla keilaimella mittaaminen lisää työmäärää keilaimen siirtelyn ja kääntelyn vuoksi.¹

Kohteesta riippuen mittauspisteitä tarvitaan useita. Laitetta siirretään sopiviin paikkoihin, jotta kohde saadaan mitattua joka puolelta eikä katvealueita jää. Maalaserkeilain tallentaa pisteet omaan sisäiseen koordinaatistoonsa. Jos pistepilvet halutaan johonkin tiettyyn koordinaattijärjestelmään, täytyy apuna käyttää tähyksiä ja takymetrimittauksia. Tähykset ovat usein pallon muotoisia ja niitä sijoitetaan mitattavalle alueelle useita siten, että eri mittauksilla saadaan tuloksia myös muutamasta samasta tähyksestä. Tähysten keskipisteet mitataan takymetrillä, jolloin laserkeilaimen tuottamat pistepilvet voidaan myöhemmin muuntaa haluttuun koordinaatistoon.^{2,3}

Maalaserkeilaimet voidaan toimintaperiaatteen mukaan jakaa neljään eri tyyppiin: kupolimaisesti, panoraamisesti tai keilamaisesti mittaaviin ja optiseen kolmiomittaukseen perustuviin laitteisiin. Kuvassa 10 on esitetty näistä kolmen ensimmäisen mittaustapa. Yleisin mittaustapa on kupolimainen, jolloin ainoastaan pieni alue laitteen alapuolella jää mittaamatta.⁴



Kuva 10. Kupolimainen, panoraaminen ja keilamainen mittaustapa. Lähde: www.leica.fi

¹ Kukko, Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin, s.9-10.

² Heiska, Nina. Haastattelu 14.2.2008.

³ Koski, Jarkko. 2001. Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen, s. 25.

⁴ Joala, Vahur. 2006. Laserkeilauksen perusteita.

Maalaserkeilauksen uutuus on niin sanottu liikkuva kartoitus (*mobile mapping*), jolloin maanpinnallakin saadaan mitattua nopeasti laajoja alueita. Menetelmä on vasta äskettäin tullut kaupalliseen käyttöön.¹

Menetelmässä ajoneuvoon on kiinnitetty yksi tai useampi laserkeilain ja paikannuslaitteisto. Lisälaitteena voi olla digitaalikamera. Autoa ajetaan samalla, kun mittauslaitteisto tekee työtään. Mobiilimittaukset ovat erityisen käteviä esimerkiksi tiealueiden kartoittamiseen ja mallintamiseen. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa mittausten tarkkuus on ollut noin 5 cm.¹



Kuva 11. Liikkuvaa kartoitusta tieympäristössä. © Hannu Hyypä & Antero Kukko 2008.

2.3.3 Teollisuuslaserkeilaus

Teollisuuslaserkeilainkin on periaatteessa maalaserkeilain, mutta se on tarkoitettu erityisesti pienien kohteiden erittäin tarkkaan mittaamiseen.² Teollisuuskeilaimen eli niin sanotun 3D-esineskannerin yleisin toimintaperiaate on pyyhkäistä lasersäteellä kohdetta ja ohjata heijastunut valo objektiivin kautta sensoreille, jolloin muodostetaan pistepilvi.³ Esineskannerin toiminta perustuu siten optiseen kolmiomittaukseen.

Esineskannerin mittaustarkkuus voi olla jopa alle 1 mm. Mittaus tapahtuu maksimissaan alle 30 m:n etäisyydeltä.⁴ Laitteet soveltuvat esimerkiksi me-

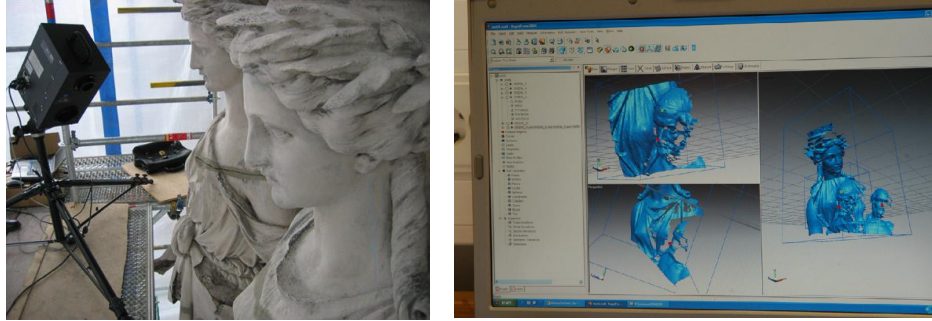
¹ Kukko, Antero. Haastattelu 14.2.2008.

² Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

³ Ahlavo, Marika - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus on tulevaisuuden tarkkaa 4D-paikkatietoa, s. 50-51.

⁴ Joala, Vahur. 2006. Laserkeilauksen perusteita.

talliteollisuuden pienten objektien mittaamiseen, lääketieteen tarpeisiin, arkeologian sovelluksiin sekä useilla muillakin aloilla erilaisten pintojen ja muotojen muutosten seuraamiseen^{1,2}



Kuva 12. Teollisuuslaserkeilain ja julkisivun mallinnusta. © Hannu Hyyppä ja Peter Korhonen Mitaten Oy 2006.

¹ Koski, Jarkko. 2001. Laserkeilaus – uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen, s. 25.

² Hyyppä, Hannu. 2007. Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa.

3 LASERKEILAUSOHJELMISTOT

3.1 Ilmalaserkeilausaineistojen käsittely

Suomessa ei ole yritysten omistuksessa omaa ilmalaserkeilainta, mutta myös suomalaiset yritykset ja organisaatiot (mm. Destia, Blom Kartta, Sito) tarjoavat laserkeilauspalveluja ulkomaisten laserkeilausyritysten avulla. Yleisimpiä Pohjoismaissa käytettyjä laserkeilaimia ovat Optechin ALTM-sarja, TopoSys ja TopEye. Suomessa yleisimmin käytetty laserkeilausjärjestelmä on ollut helikopteriin asennettu TopEye-keilain. Ilmalaserkeilaintoimittajat käyttävät yleisesti keilainten omia esikäsittelyohjelmistoja laseraineiston toimittamiseksi tilaajille. Yleisimpiä laserkeilausaineiston käsittelyalgoritmeja löytyy useimmista kaukokartoitus- ja paikkatieto-ohjelmista ja laserkeilaukseen keskittyneistä ohjelmista. Käytettyjä ohjelmistoja ovat mm. Terra-ohjelmistot, PCI Geomatics Geomatica (LidarEngine), ErMapper, GeoCue REALM, SCOP++ ja Pointools.^{1,2}

Laserkeilauspalveluja ja -laitteistoja tuottavista organisaatioista muun muassa TopEye ja Blom-konserni käyttävät pääsääntöisesti TerraScan-ohjelmistoa laserdatan tulkintaan. Lisäksi käyttäjäkuntaan kuuluvat myös heidän aineistojensa loppukäyttäjät. Insinööriyön tiimoilta tutustuttiin tarkemmin suomalaiseen Terrasolid Oy:n ohjelmistoon, jota käytettiin ilmalaserkeilausaineiston käsittelyyn. TerraScan-ohjelmisto on kiistatta alansa markkinajohtaja maailmassa.¹

Terrasolidin ohjelmistojen nykyisillä ominaisuuksilla voidaan laserkeilauksen tuottamasta pistejoukosta tuottaa²:

- Maanpinnan pintamalli, tyypillisesti hajapisteistä rakentuva kolmioverkko
- Vektorit maaston selkeille taiteviivoille (tämä vaatii, että taiteviivan molemmilla puolilla on isohko pinta, jonka muoto on saatavissa suuresta määrästä laserpisteitä)
- Kolmiulotteinen vektorimalli rakennuksista, joiden katot koostuvat tasopinnoista
- Kolmiulotteinen malli puista
- Animaatio, niin sanottu flythru-movie kohteesta.

¹ Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

² Hyypä, Hannu. Haastattelu 11.11.2008.

Terra-ohjelmat ovat erillisiä ohjelmia, jotka toimivat MicroStation-ympäristössä.¹

3.1.1 Esimerkki ilmalaserkeilausaineiston käsittelystä

Tyypillisesti ilmalaserkeilausaineiston käsittelyyn kuuluvat seuraavat työvaiheet²:

- Laserpistepilven tuominen ohjelmaan
- Maanpinnan luokittelu pistepilvestä
- Eri lentojonojen yhteensovittaminen maanpinnan avulla
- Pinnan korkeusmallin luominen ja visualisointi.

Laserpistepilven tuominen ohjelmaan²

Aluksi perustetaan TerraScan-ohjelmassa uusi projekti ja määritetään sen tiedot. Tässä vaiheessa olisi mahdollista jakaa aineisto pienempiin osaluoksiin (esim. 500m x 500m), jos se olisi tarpeellista. Käsiteltävässä aineistossa on kuitenkin kyseessä kohtuullinen määrä pisteitä, joten ei ole pelkoa tietokoneen muistin loppumisesta.

Kaikkien neljän lentolinjan pistetiedostot tuodaan ohjelmaan, joka yhdistää ne yhdeksi tiedostoksi. Pistetiedosto avataan, jolloin tiedot saadaan käyttöön ja pisteet näkyviin näytölle. MicroStation-ohjelmassa on mahdollista pitää useampia ikkunoita avoinna samaan aikaan. Yhdessä ikkunassa kannattaa kuitenkin pitää koko aineisto näkyvässä ja toisia ikkunoita käyttää muissa aineiston tarkasteluissa.

Maanpinnan luokittelu pistepilvestä²

Jotta lentolinjojen yhteensovittaminen myöhemmin onnistuu, täytyy ensin pisteistä löytää maanpintaa kuvaavat pisteet. Tämä tehdään sen takia, että ohjelma käyttää yhteensovittamiseen pintoja. Maanpinnan lisäksi olisi mahdollista käyttää myös rakennuksia, mutta käytettävässä aineistossa ei satu niitä olemaan.

Alkutilanteessa kaikki pisteet ovat samassa luokassa. Koska aineistoja ei ole vielä rekisteröity, luokitteluun käytetään makroa. Tässä vaiheessa aineistosta pyritään suodattamaan yksittäiset liian matalat pisteet pois (ns.

¹ www.terrasolid.fi, viitattu 15.11.2008.

² Rönholm, Petri. 2008. Ilmalaserkeilausaineiston käsitteleminen.

maalaiset pisteet, jotka yleensä johtuvat virheestä), löytämään maanpintaa kuvaavat pisteet, suodattamaan maanpintapisteistä lisää ja pehmentämään maanpintaa (tämä vähentää kohinan eli hajonnan vaikutusta). Parametreille annetaan sopivat alkuarvot, jotta lopputulos olisi mahdollisimman oikea. Makro ajetaan erikseen jokaisen lentolinjan tiedoista. Luokittelun jälkeen on mahdollista katsoa tilastoja luokittelusta.

Toinen vaihtoehto luokitteluun olisi avata lentolinjojen pistetiedostot yksi kerrallaan, tehdä luokittelu ja vasta lopuksi yhdistää tiedostot. Makron avulla luokittelu on kuitenkin nopea tehdä kerralla koko aineistolle.

Eri lentolinjojen yhteensovittaminen¹

Lentolinjojen yhteensovittamisen tarkoituksena on saada eri lentojonot samaan koordinaatistoon ja korjata GPS:n ja IMU:n epätarkkuudet.

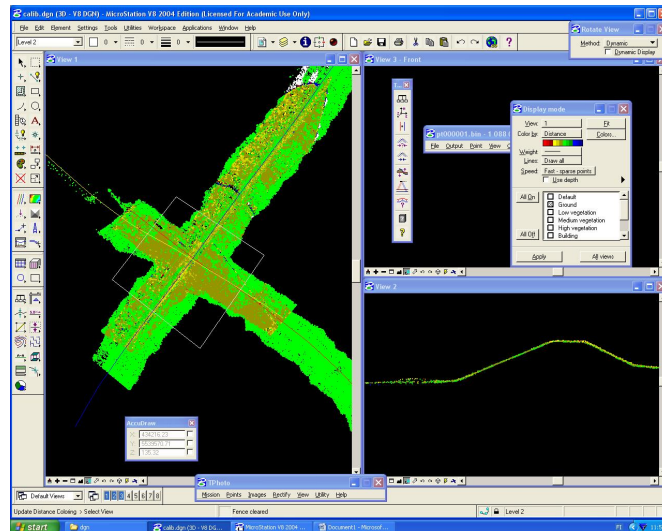
Ensin määritetään TerraScan-ohjelmassa oikea, mittauksissa käytetty koordinaatistojärjestelmä. Seuraavaksi ohjelmaan tuodaan GPS- ja inertiatiedot, jotta pystytään etsimään ja korjaamaan lennon aikana tapahtuneita virheitä. Laserpisteet ja lentotiedot sidotaan yhteen ajan perusteella. Tämä onnistuu, koska GPS-datan aikatieidot ovat uniikkeja, kuten yleensäkin.

Eri lentolinjojen pisteet kannattaa määrittää erivärisiksi, jotta aineiston tarkastelu olisi mahdollista.

Lentolinjojen yhteensovittaminen eli rekisteröinti tapahtuu TerraMatch-ohjelmalla. Erilaisten parametrien avulla yritetään parantaa rekisteröinnin tarkkuutta ja pienentää laserdatan sisäisiä virheitä. Tämä on haastavaa, sillä sopivien parametrien löytäminen on projektikohtaista ja vaatii tietoa aineiston luonteesta, esimerkiksi keilaimen tyypistä, mittausolosuhteista ja niin edelleen.

Aineistosta tehtävien poikkileikkauksien avulla pystyy tarkastelemaan, kuinka hyvin rekisteröinti onnistui. Mitä lähemmäksi toisiaan eriväriset maanpinnan pisteet asettuvat, sitä paremmin rekisteröinti on onnistunut (kuva 13).

¹ Rönholm, Petri. 2008. Ilmalaserkeilausaineiston käsitteleminen.



Kuva 13. Poikkileikkauksesta näkee, kuinka hyvin eri lentolinjojen pisteet asettuvat.

Muiden kohteiden luokittelu¹

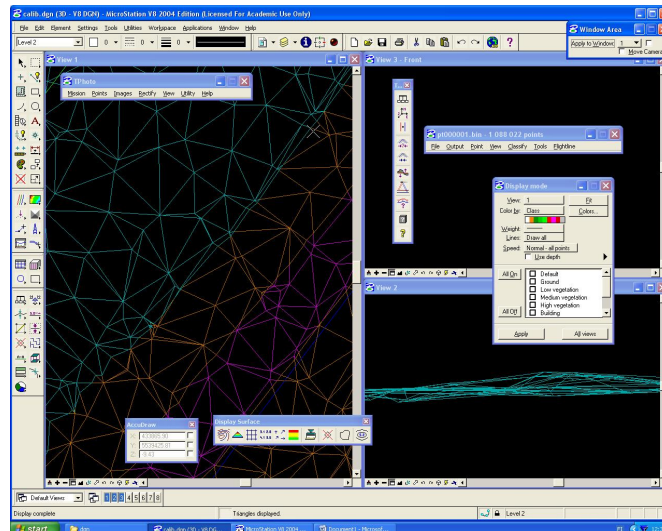
Koska lentolinjat ovat nyt yhteisessä koordinaatistossa, onnistuu myös muiden kuin maanpinnan ja virhepisteiden luokittelu. Luokittelut voidaan kohdistaa kaikkiin lentolinjoihin samanaikaisesti.

Aineistosta määritetään TerraScan-ohjelmalla vielä matala kasvillisuus, keskikokoinen kasvillisuus ja korkea kasvillisuus. Luokittelu perustuu raja-arvojen antamiseen, joita verrataan maanpintaan. Esimerkiksi korkea kasvillisuus määritellään 3 - 45 m maanpinnasta.

Pinnan korkeusmalli ja visualisointi¹

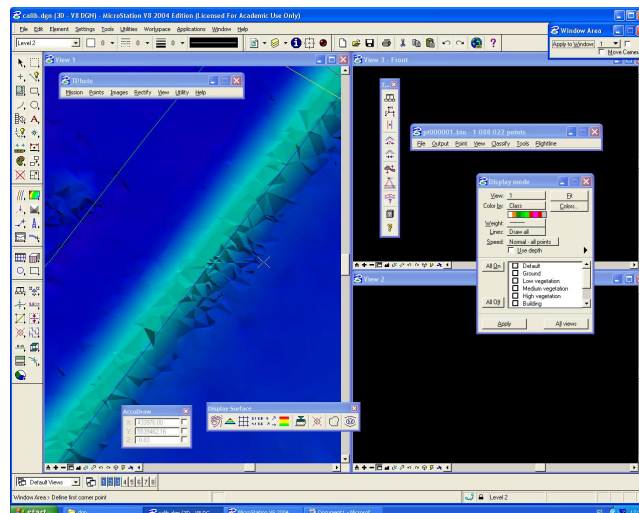
Korkeusmallin ja visualisoinnin tekemiseen käytetään TerraModeller-ohjelmaa. Maanpinnan pisteistä muodostetaan kolmioverkko (kuva 14), jonka perusteella havainnollistamiset tehdään. Alkuperäiset laserpisteet voidaan piilottaa, jolloin mallista tulee paremman näköinen.

¹ Rönholm, Petri. 2008. Iimalaserkeilausaineiston käsitteleminen.



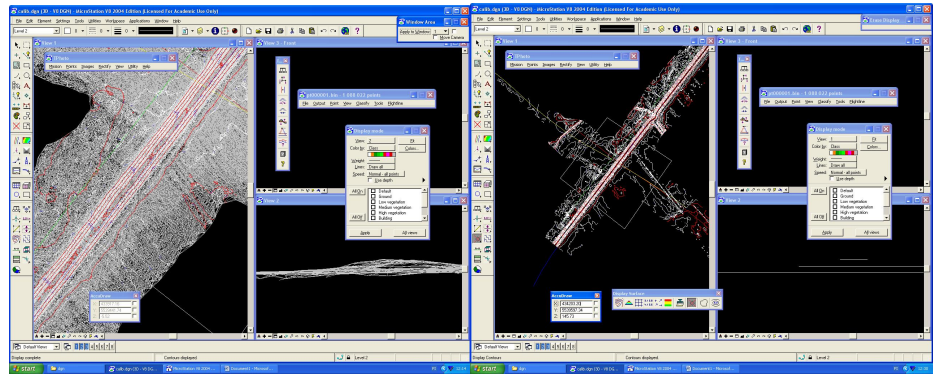
Kuva 14. Kolmioverkkoa.

Visualisoinnin tueksi kokeillaan monia eri vaihtoehtoja tehdä mallista havainnollinen. Työssä tehdään esimerkiksi korkeuskäyrät, ruutukorkeusmalli ja värjätty ja varjostettu pinta (kuva 15). Mallien tekeminen on helppoa, se onnistuu lähes nappia painamalla.



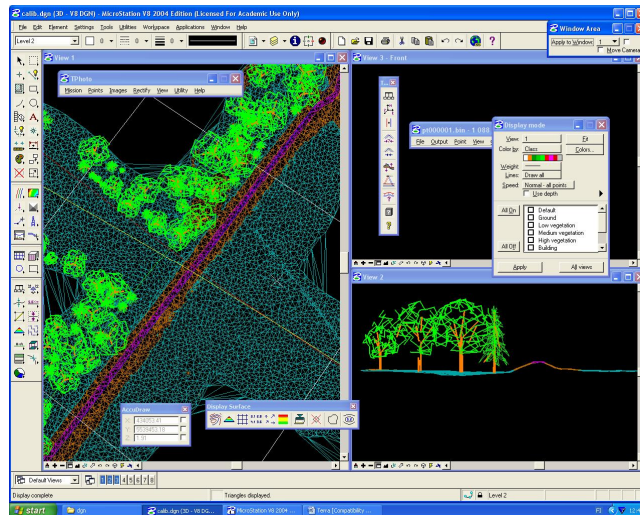
Kuva 15. Värjätty ja varjostettu pinta.

Kaikkia pisteitä ei kannata käyttää eikä aina edes voikaan käyttää pintamallin muodostamisessa. TerraScan-ohjelmassa voi käydä tekemässä erillisen harvennetun pisteistön. Esimerkkiaineiston pisteistöä harvennetaan siten, että pisteitä on viiden metrin välein (kuva 16).



Kuva 16. Kuvaparissa on esitetty harventamattomasta aineistosta ja harvennetusta aineistosta tehdyt mallit.

Puiden mallintaminen havainnollisuuden lisäämiseksi on mahdollista, sillä TerraScan-ohjelma tunnistaa puita automaattisesti. Ohjelma ei kuitenkaan pysty välttämättä löytämään kaikkia puita. Niin sanotun rautalankamallin (kuva 17) lisäksi puun voi esittää realistisen näköisenä virtuaalimallina.



Kuva 17. Mallinnettuja puita.

Lopuksi työn tuloksia voi vielä tarkastella yllentoanimaation avulla.

3.2 Maalaserkeilaus- ja teollisuuskeilausaineistojen käsittely

Maalaserkeilaimia on Suomessa muutamia kymmeniä yritysten, tutkimuslaitosten ja yliopistojen omistuksessa. Päinvastoin kuin ilmalaserkeilausohjelmistojen kohdalla, yksikään maalaserkeilausohjelmisto ei ole saavuttanut kiistatonta markkinajohtajuutta. Maalaserkeilainaineiston käsittely vaatii yleensä useamman sovellusohjelman, koska kohdetta keilattaessa maalaserkeilaimella tarvitaan useita eri suunnista keilattuja pistepilviä. Maalaserkeilausaineistot ja teollisuuskeilausaineistot käsitellään yleensä ensin keilaimen laitevalmistajan omalla ohjelmistolla, jonka jälkeen pistepilveä voidaan mallintaa keilausta varten suunnitelluilla ohjelmistoilla.¹

Käytetyimmät ohjelmistot ovat Cyclone, Cloudworx, RealWorks Survey, Teraramodel, 3Dipsos, SceneVision-3D, JRC 3D Reconstructor, Faro Record/Scene/Scout, RadidForm, PolyWorks, Slim, Geomagic Studio/Qualify, I-Site Studio, PRISM 3D, ScanWorks ja LFM Modeller sekä Terra-ohjelmisto.²

Maalaserkeilainohjelmistot ja teollisuuskeilainohjelmistot sisältävät useita toimintoja, joista tärkeimmät ovat:^{2,3,4}

- Pistepilvien suodatus (kohina ja väärät pisteet poistetaan)
- Pistepilvien yhdistäminen eli rekisteröinti (tähyshallojen, tähyksien, mittausten tai objektien avulla)
- Siirto haluttuun koordinaatistoon (georeferointi)
- Pistepilvien tulkitseminen (reunojen irrotus, tasojen etsiminen, rautalan-kamallit)
- Pinnan kolmiointi
- Mallin yksinkertaistaminen
- Pinnan teksturointi
- 3D-mallinnus
- Tiedonsiirto jatkojalostukseen.

Ensimmäinen toimenpide kunkin keilatun 3D-pistepilven rekisteröimisen yhteydessä on pisteaineiston suodattaminen. Pistepilven suodatuksessa poistetaan aineistosta väärin rekisteröityneet pisteet ja kohinaa. Eli pistepilvet

¹ Hyypä, Hannu. Haastattelu 14.11.2008.

² Rönnholm, Petri. 2008. Laserkeilaus-opintojakso luennot.

³ Järvinen, Jaakko. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen.

⁴ Erving, Anna. 2008. Maalaserkeilausaineiston käsittely.

”siivotaan” kaikista ylimääräisistä kohteista, jotka ovat jääneet pistepilveen ja jotka muuten vääristäisivät kohteen todellista muotoa. Perussuodatuksia ovat muun muassa hajapisteiden poisto ja kohinan poisto intensiteetin perusteella.^{1,2,3}

Kun pisteaineiston alustava suodatus on saatu suoritettua, seuraava työvaihe on täysin turhien pisteiden rajaaminen pois käsiteltävästä aineistosta. Tämän toimenpiteen tarkoituksena on vähentää käsittelyn kohteena olevan aineiston määrää mahdollisimman pieneksi, jolloin sen käsittely on helpompaa.^{1,3}

Maalaserkeilauksen yhteydessä rekisteröinnillä tarkoitetaan samasta kohteesta eri suunnista keilattujen laseraineistojen yhdistämistä suhteessa kohteeseen ja toisiinsa. Tämä toimenpide voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, joista tunnetuin ja käytetyin lienee pintojen yhteensovitus käyttäen ICP-menetelmää (Iterative Closest Point), jonka perusajatuksena on etsiä kahden likimääräisesti lähekkäin kohdistetun kolmiulotteisen pinnan mahdollisimman pientä sijainnillista eroa iteratiivisen laskentaprosessin avulla.¹

Käytännössä ICP-menetelmä toimii siten, että toiselta pinnalta valitaan joukko pisteitä, joiden sijaintia verrataan likimääräisesti lähelle kohdistetulla toisella pinnalla sijaitseviin oletettuihin vastinpisteisiin. Tämän jälkeen vastinpisteiden väliset etäisyydet mitataan ja lasketaan yhteen etäisyyksien neliösumma. Seuraavaksi pintojen välistä keskinäistä asentoa muutetaan hieman ja vastinpisteiden etäisyyksien laskenta suoritetaan uudelleen. Iteraatiokierrosten tarkoituksena on päästä vastinpisteiden etäisyyksien pienempää neliösummaa ja samalla pintojen keskinäisen sijainnin parempaa vastaavuutta kohti.¹

Vaihtoehtoinen lähestymistapa pistepilvien keskinäiseen kohdistamiseen on LS3D-menetelmä (Least Squares 3D Surface Matching). Menetelmän ajatuksena on käyttää pintojen yhteensovitukseen perustuvien menetelmien sijaan aitojen 3D-pistepilvien yhteensovitusta.¹

Toinen tapa laseraineistojen rekisteröintiin on erityisten muodoltaan ja kooltaan tunnettujen tähysten (mm. pallo tai taso) käyttäminen. Yleisimmät la-

¹ Järvinen, Jaakko. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen.

² Leica Keilausuutiset – 2/2005. Saatavissa: www.leica.fi.

³ Erving, Anna. 2008. Maalaserkeilausaineiston käsittely.

serkeilauksessa käytettävät tähykset ovat joko tasomaisia tai pallomaisia. Tällöin pistepilvissä tulee olla vähintään kolme yhteistä tähyistä, jotta ne voidaan yhdistää samaan koordinaatistoon. Tähyksinä voidaan käyttää myös mittaustilassa erilaisia rakenteita, kuten tiilenpäitä seinissä tai ikkunan pieliä. Tähysten käyttö onkin varsin yleinen ja varma tapa rekisteröidä pistepilvet onnistuneesti. Jotkut ohjelmistot osaavat yhdistää pistepilviä täysin automaattisesti käyttäen keilauksen aikana määriteltyjä tähyksiä.^{1,2}

Tähykset voidaan myös mitata takymetrillä todelliseen koordinaatistoon, jolloin koko työ voidaan siirtää haluttuun koordinaattijärjestelmään. Tämän jälkeen yhdistetty pistepilvi voidaan georeferoida syöttämällä ohjelmalle tähysten paikkojen takymetrillä mitatut koordinaatit.^{1,2}

Jos laserkeilauksen yhteydessä on otettu digitaalikuvia, niiden perusteella voidaan pisteille antaa todelliset värit.³

Pistepilvestä voidaan tehdä kolmioverkko ja pintamalleja. Toisinaan pistepilvet sisältävät pisteitä turhan tiheästi, jolloin aineiston käsittely vaikeutuu. Pisteistön tiheyttä voidaan säätää erilaisilla harvennustoiminnoilla ilman, että mallin muoto kärsii. Joskus pintamalliin jää aukkoja, joita voidaan täyttää ja poistaa ohjelmistojen toiminnoilla.^{3,4}

Pistepilvet tai valmiit mallit voidaan edelleen siirtää muihin suunnitteluohjelmistoihin.⁵

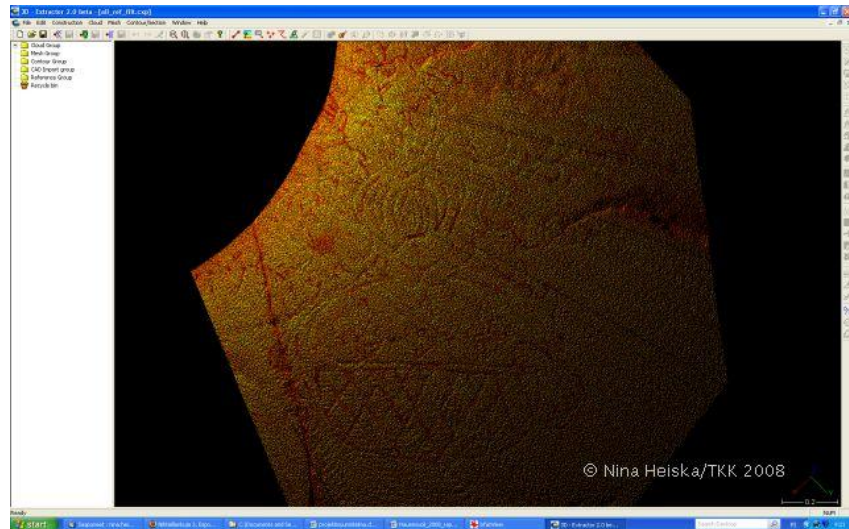
¹ Järvinen, Jaakko. Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen.

² Ruohonen, Sanna. 2007. FARO LS 880 -laserkeilain vapaan keilainaseman menetelmässä.

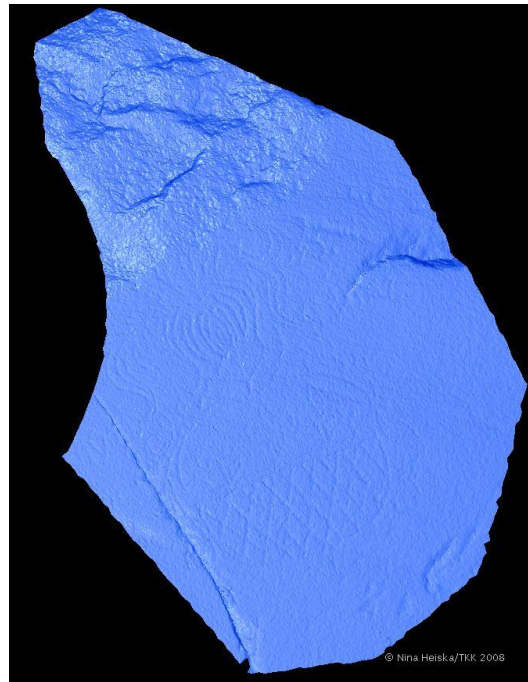
³ Erving, Anna. 2008. Maalaserkeilausaineiston käsittely.

⁴ Leica Keilausuutiset – 2/2005. Saatavissa: www.leica.fi.

⁵ Joala, Vahur. 2007. Terrestriallinen laserkeilaus.



Kuva 18. Yksityiskohta pistepilvestä, jossa näkyy kalliopirroksia. © Nina Heiska 2008.



Kuva 19. Sama kohta kuin kuvassa 18, mutta pistepilvestä on kolmioitu pintamalli. © Nina Heiska 2008.

4 LASERKEILAUSMENETELMÄT INFRARAKENTAMISESSA

4.1 Kirjallisuustutkimus laserkeilauksen käyttämisestä infrarakentamisessa

Laserkeilausta voidaan soveltaa kaikessa kolmiulotteisen tiedon hankinnassa ja käsittelyssä. Laserin erotuskyky asettaa rajat kohteen yksityiskohtaisuuden toistolle, mutta teknisten käyttöominaisuuksien kehittyessä sovelluksia tulee koko ajan lisää.¹

Korkeusmalli

Varsinkin ilmalaserkeilausaineistosta tuotetaan usein maanpintaa kuvaileva korkeusmalli. Korkeusmallia pystytään hyödyntämään rakentamisessa maankäytön suunnittelusta (kaavoituksesta) lähtien. Korkeusmallin ja myös muiden pintamallien avulla voidaan tarkastella ja analysoida erilaisia asioita. Maankäytön suunnittelussa korkeusmallin perusteella voidaan tehdä mm. rakennettavuuskarttoja ja -selvityksiä.²

Suomesta on vuonna 2008 aloitettu maan kattavan korkeusmallin uudistaminen, joka tehdään lentokoneesta laserkeilaamalla. Aikaisempina vuosina tehtyjen koekeilausten perusteella mallin korkeustarkkuus on noin 20 cm, mikä on tällaiseen tarkoitukseen erinomainen.³ Vuonna 2008 aineistoa saatiin kerättyä 2,1 miljoonaa hehtaaria.⁴

¹ Kukko, Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin, s.4.

² Vertanen, Antti ym. 2006. Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja vaihtoehdot, s. 12-31.

³ Silvennoinen, Jussi. 2008. Laserkeilaus suunnistuskartoituksessa.

⁴ www.maanmittauslaitos.fi, viitattu 15.11.2008.

Valtakunnallisen korkeusmallin ja korkeusmallia varten hankitusta laserkeilausaineistosta johdettujen muiden sovellusten käyttökohteita voivat olla esimerkiksi¹:

- Maankäytön suunnittelu, kaavoitus
- Näkyvyysanalyysit
- Melumallinnus
- Radiolinkkisuunnittelu
- Tietoliikenteen verkkosuunnittelu
- Tienpito
- Maastotietokanta
- Valtakunnallinen maastomalli
- Yhdyskuntatekniikan suunnittelun lähtötiedot
- Ympäristövaikutusten arviointi
- Karttojen ja paikkatietoaineiston päivitys ja seuranta
- Korkeussuhteiden muutosten seuranta säännöllisesti päivitetystä korkeusmallista (maanottoalueet, kaatopaikat, kaivokset, suot)
- Tulvakartat, tulvasuojelu
- Jokien valuma-alueiden määrittäminen
- Vesistöjen rehevöitymisen estäminen (veden pinnan nosto)
- Metsien inventointi
- Virtuaalitodellisuus
- Kaupunkimallit.

Maastomalli

Maastomalli poikkeaa korkeusmallista siten, että paljaan maanpinnan korkeuden lisäksi tietoa voi olla esimerkiksi maaston taitelinoista, maa- ja kallioperän ominaisuuksista ja maan pinnalla olevista kohteista, kuten rakennuksista.¹

¹ Vertanen, Antti ym. 2006. Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja vaihtoehdot, s.12 - 69.



Kuva 20. Kolmiverkkona esitetty maastomalli (maanpinta) Lähde: Erno Puupponen, Tiesuunnittelussa käytettävien kartta- ja malliaineistojen tuottaminen.

Monet infrahankkeet suunnitellaan maastomalliin (kuva 20) perustuen. Esimerkiksi tiensuunnittelussa maastomallia tarvitaan muun muassa vaaka- ja pystygeometrioiden suunnitteluun, tierakenteen mallintamiseen, kuivatuksen suunnitteluun, tilavuuslaskentoihin, lopullisten rakenteiden suunnitteluun ja määrälaskentoihin.¹

Laserkeilausaineiston tuottamat maastomallit ovat olleet tutkimuksen kohteena 2000-luvulla. Laserkeilaus on nähty vaihtoehtona perinteiselle ilmakuvaukselle, vaikka se onkin tiensuunnittelun osalta tällä hetkellä koettava osittain täydentäväksi maastotietojen hankintamenetelmäksi. Maastomallien tarkkuutta on tutkittu useissa maastomalliprojekteissa. Tarkkuus on vaihdellut 5 - 15 cm:n välillä. Tulokseen on vaikuttanut pinnan muoto ja peitteisyys, kaltevuus, käytetty laserkeilauslaitteisto, lentokorkeus ja niin edelleen.²

Kaupunkimallinnus, kaavoitus ja virtuaalimallit

Viime aikoina kolmiulotteisen tiedon tarve on lisääntynyt myös kaupunki- ja taajama-alueilta. Tietoa tarvitaan erilaisiin sovelluksiin muun muassa infra- ja kaupunkisuunnitteluun. Nämä sovellukset vaativat 3D-kaupunkimalleja ja 3D-mallien laatuvaatimukset vaihtelevat sovelluksittain. Yleisesti kolmiulotteista tietoa kaupunkialueista ei ole saatavissa vaan lähes kaikki tieto on

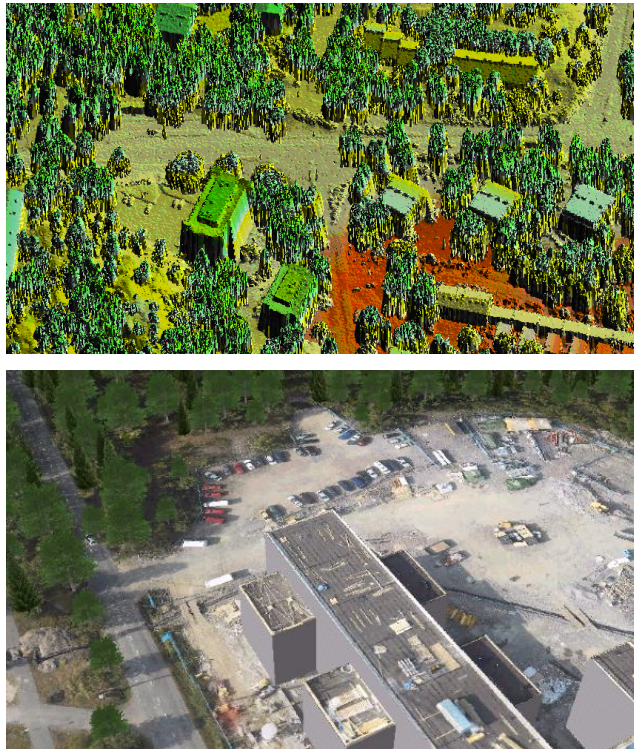
¹ Puupponen, Erno. 2005. Tiesuunnittelussa käytettävien kartta- ja malliaineistojen tuottaminen, s.15.

² Hyypä, Hannu ym. 2008. Laserkeilaus ja infrarakentaminen.

kaksiulotteista - karttoja ja kuvia. Mahdollisia lähteitä kolmiulotteisen tiedon hankintaan ovat maanmittaustoimenpiteet, ilmakuvaus ja laserkeilaus.¹

Useat Euroopan suurkaupungit on laserkeilattu kaupunkimallien muodostamiseksi ja tietoliikenneverkkojen optimoimiseksi. Suomessa muun muassa Helsinki ja Ylivieska ovat teettäneet koko kaupungista 3D-mallin laserkeilauksella, kustannusten ollessa pienimmillään alle 15 euroa hehtaaria kohti. Tarkan kolmiulotteisen mallin käyttösovellukset ovat lähes rajattomat ulottuen kaupunkitasolla maankäytön, teiden sekä vesi-, viemäri- ja tietoliikenneverkkojen suunnittelusta rakenteiden kunnossapitoon. Lisäksi laserkeilaus vauhdittaa maanrakentamisen automatisointia.²

Kolmiulotteisia malleja voidaan jalostaa virtuaalikaupungeiksi (kuva 21), tosin virtuaalimalleja leimaa kautta linjan vielä keskeneräisyys ja kokeilu. Useimmiten malleja on tehty vain tekniikan visualisoimiseksi. Parhaiten virtuaalikaupungit palvelevat yhteiskuntaa infra- ja kaupunkisuunnittelun alueella.³



Kuva 21. Kaupunkimalli ja virtuaalimalli. Lähde: Hannu Hyypä, Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa.

¹ Hyypä, Hannu. 2007. Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa.

² Heilä, Sampsa. Tekniikka ja Talous 9.12.2005.

³ Hyypä, Hannu. 2007. Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa.

Tiensuunnittelu

Laserkeilauksen käyttöä on tutkittu tiensuunnittelussa viime vuosina lähinnä sen kyvystä tuottaa maastomalli. Lisäksi on tutkittu taiteviivojen irrottamista, koska laserkeilaus tuottaa hajapisteitä ja tiensuunnittelun tarpeisiin taiteviivat ovat elintärkeitä. Kapeiden kohteiden kuten ojien saaminen maastomallista on tärkeää. Myös maastomallin käyttöä tien kuivatusanalyseissä on tutkittu. Muita sovelluksia ovat olleet metsäteiden suunnittelu ja tiegeometrian irrottaminen laserkeilausaineistosta.¹ Tarkempi kuvaus käyttökohteista on esitetty raportissa: Hyypä, Hannu; Ilvonen, Katri; Ahlavuo, Marika ja Lindholm, Mika: Laserkeilaus ja infrarakentaminen, TKK, julkaisematon käsikirjoitus, 2008. Voidaan sanoa, että laserkeilaus on parhaimmillaan esisuunnittelussa ja tiensuunnittelun alkuvaiheessa linjausvaihtoehtojen muodostamisessa.²

Destia on soveltanut ilmasta tapahtuvaa laserkeilausta tieprojekteissa jo usean vuoden ajan. Esimerkkikohteina voidaan mainita lähes kaikki viimeaikaiset tiehankkeet muun muassa Helsinki-Turku moottoritiehanke.³

Vesialueet ja vedenalaisten kohteiden suunnittelu

Vesialueiden laserkeilausta on tutkittu jo 1990-luvun puolella.⁴ Toisaalta vesiväylien suunnittelussa ja muutosten seurannassa laserkeilausta on käytetty melko vähän. Laserkeilaamalla vihreällä aallonpituudella saadaan ilmasta kartoitettua kolmiulotteisesti esimerkiksi joen pohjaa. Vihreä laserkeilaus soveltuu hyvin kirkasvetisiin jokiympäristöihin, mutta sameavetisemmissä jokiympäristöissä lasersäde voi sirota siten, että siitä ei saada informaatiota joen pohjasta.⁵ Käytännössä Blom Kartta toteutti vasta marraskuussa 2008 ensimmäisen vihreän laserin koelennon Vaasan seudulla.⁶

¹ Hyypä, Hannu ym. 2008. Laserkeilaus ja infrarakentaminen.

² Hyypä, Juha – Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

³ Hyypä, Juha – Hyypä, Hannu. 2007. Laserkeilaus.

⁴ Ahlavuo, Marika. Haastattelu 14.11.2008.

⁵ Alho, Petteri, ym. 2008. Laserkeilaamalla maastomallit tulvakartoitukseen, s. 11-14.

⁶ Hyypä, Hannu. Haastattelu 14.11.2008.

Ympäristösuunnittelu

Ympäristösuunnittelussa laserkeilausta on käytetty runsaasti puistojen ja puuston mallintamiseen sekä maiseman visualisointiin.¹

Laserkeilaus apuna tarjouslaskentavaiheessa

Laserkeilaamalla voidaan hankkia oikeat ja tarkat tiedot nykytilanteesta, jolloin tarjousvaiheessa on mahdollista laskea kustannukset tarkemmin ja luotettavammin. Näin päästään varmemmin hyvään lopputulokseen ja saadaan selville mahdolliset riskit urakan kustannusten ja aikataulun suhteen.²

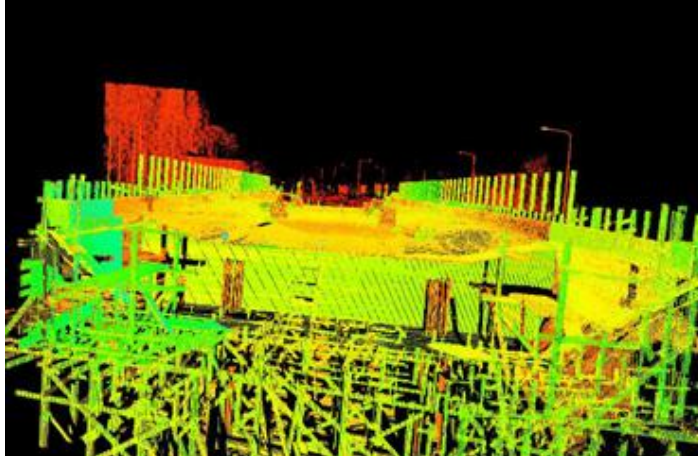
Siltojen mittaus

Vuosina 2001-2004 toteutetun Älykäs silta -projektin tarkoitus oli kehittää teräsbetonisiltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosesseja. Yhtenä mittaustekniikkana projektissa käytettiin maalaserkeilausta, jolla mitattiin muottipintoja ja valmista betonipintaa (kuvat 22 ja 23). Projektin tulokseksi laserkeilainten osalta saatiin, että menetelmä vaikuttaa soveltuvan erinomaisesti siltatyömaan tuotantoa ohjaaviin ja tarkastaviin mittauksiin. Laserkeilausmateriaalista voidaan etsiä ja tarkastella pintojen sijainti-, mitta- ja muotopoikkeamia vertaamalla toteutunutta suunnitelmaa malliin. Laserkeilausaineiston käsittelyyn tarkoitetuilla ohjelmilla voidaan tuottaa havainnollisia kuvia ja tulosteita mittaustuloksista (kuva 24).³

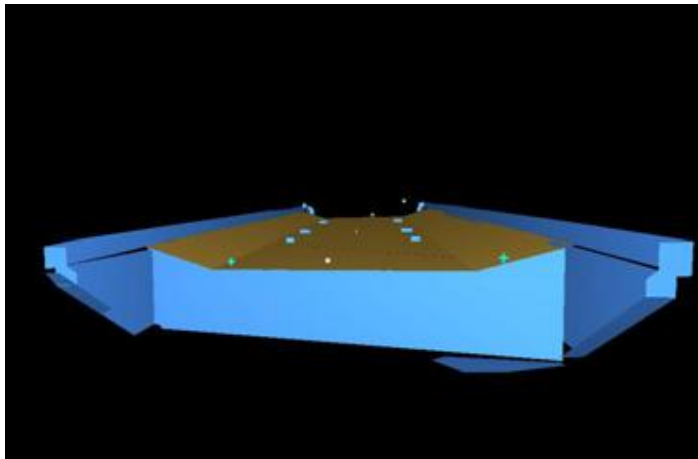
¹ Hyypä, Hannu. 2007. Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa.

² Greaves, Tom – Jenkins Bruce. 2004. Laser Scanning Changes the Rules.

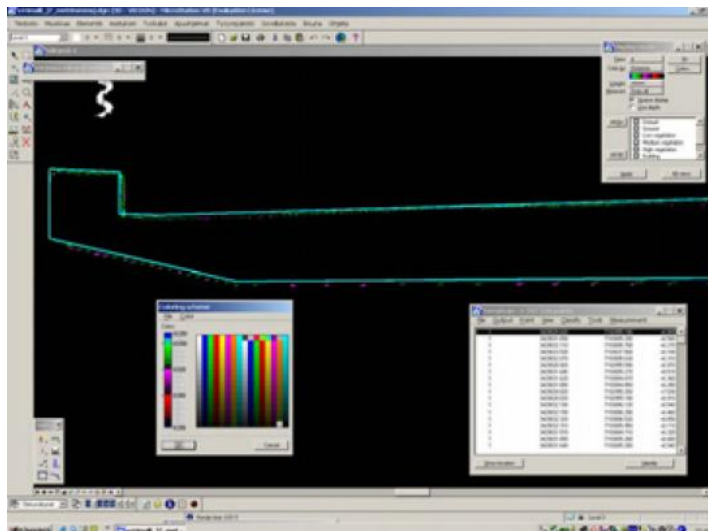
³ Heikkilä, Rauno, ym. 2005. Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto, s.4-56.



Kuva 22. Käsittelemätön pistepilvi. Lähde: Rauno Heikkilä ym., Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto.



Kuva 23. Mallinnettu pistepilvi. Lähde: Rauno Heikkilä ym., Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto.



Kuva 24. Mittausaineistoa voidaan suoraan verrata suunniteltuun geometriamalliin. Värikoodilla ilmaistaan pisteen etäisyys mallista, esim. violetti väri tarkoittaa, että piste on alle 3 cm:n etäisyydellä mallista. Lähde: Rauno Heikkilä ym., Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto.

Jotta esimerkiksi silta pystytään mittaamaan kattavasti laserkeilaamalla, tarvitaan useita mittauspisteitä ja riittäviä näkymiä. Muun muassa tiheä telineviidakko tai virtaava joki voi estää kannen alapuolen mittaamisen. Sillan kokonaisvaltaisen muodon mittaamiseen kuluu noin 4 - 6 tuntia, lisäksi aineiston analysoimiseen menee parisen tuntia.¹

Kalliorakentaminen

Laserkeilausta on käytetty kalliorakentamisessa muun muassa toteutuman seurantaan, massa- ja määrälaskentaan, geologiseen kartoitukseen ja kallio-tilojen mallintamiseen.²

Kalliorakentamisessa lopputulos ei yleensä vastaa alkuperäisiä suunnitelmia edes vastavalmistuneessa kohteessa, joten pelkkiin vanhoihin suunnitelmiin ei voida muutostöiden suunnittelussa nojata. Laserkeilaamalla saadaan tuotettua malli todellisesta tilanteesta. 3D-toteumamallin etuina voidaan mainita muun muassa se, että mallin avulla on helppo ottaa lähtötietoina huomioon olemassa olevat osat ja rakenteet. Lisäksi toteumamalli mahdollistaa olemassa olevien ja lisättävien osien törmäystarkastelut. 3D-toteumamalli on erityisen tarpeellinen geometrisesti ja mittausteknisesti vaativissa kohteissa, kuten tunnelit, kuorirakenteet ja putkistot. Laserkeilaimella voidaan mitata myös louhintatulos ja määrittää sen perusteella kiintotilavuus ja irtotilavuus, tarvittavat alustäytöt ja vierustäytöt sekä kallistukset ja kaadot.³

Laserkeilaus apuna työmaan hallinnassa

Laserkeilauksia voidaan hyödyntää työmaan hallinnassa. Laserkeilausten avulla voidaan osaltaan pitää työmaa aikataulussa tarkkailemalla töiden etenemistä. Lisäksi töiden etenemisen perusteella urakoitsijoille maksetaan urakkahintaa erissä, jolloin laserkeilaamalla saadaan tehdyt määrät tarkasti selville ja maksut voidaan suorittaa oikeaan aikaan. Erilaisten asennustöiden ajoitusta voidaan suunnitella ja tehdä erilaisia analyyseja aikataulumuutoksista ja kustannuksista. Laserkeilauksilla voidaan myös lisätä rakentamista

¹ Heikkilä, Rauno, ym. 2005. Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto, s.32, 52.

² Mikkonen, Martti. 2006. Laserkeilaus kalliorakentamisessa.

³ Suominen, Antti. 2007. Nykyaikaisia 3D-mittausmenetelmiä talonrakentamisen laadun parantamisen apuna.

kerralla oikein. Mahdollista myöhempää tarvetta varten rakennusolosuhteet ja -vaiheet voidaan taltioida luotettavasti ja tarkasti.¹

Seurantamittaukset

Pistepilvet kuvaavat aina olemassa olevaa tilannetta mittaushetkellä. Sen vuoksi ne soveltuvat erilaisten muutosten seuraamiseen, kun laserkeilauksia tehdään halutuun määrään.

Esimerkiksi maanpinnan muutoksia seurattaessa aineistoista tehtyjä pintamalleja verrataan toisiinsa, jolloin muutokset pystytään laskemaan niiden erotuksesta. Mittausten perusteella voidaan tehdä muun muassa painuma-seuranta sekä laskea tilavuus- ja massamuutoksia. Kaatopaikan täyttymistä ja toisaalta painumista voidaan tarkkailla ja näin hallita sinne sijoitettavia määriä.²

Muutosten seurannassa on oleellista, että mallien tarkkuus on parempi kuin pienin tarkasteltava muutos. Tähän vaikuttaa sekä yksittäisen mittauksen tarkkuus että mallinnuksen tarkkuus. Mittaukset tulee tehdä joka kerta samalla tavalla ja aineistoa pitää käsitellä samoin kuin aiemminkin, jotta saadaan verrattavissa olevaa materiaalia. Koska mittausolosuhteet vaikuttavat jonkin verran laserkeilauksen tuloksiin, olisi hyvä että nekin olisivat mahdollisimman samankaltaiset mittausten aikana.²

Tienpito

Laserkeilaamalla voidaan selvittää teiden alkuperäinen kunto ja seurata muutoksia ajan kuluessa. Muun muassa painumat ja päällysteen kunto voidaan saada selville.³

¹ Greaves, Tom – Jenkins Bruce. 2004. Laser Scanning Changes the Rules.

² Mononen, Jyrki. 2005. Laserkeilaus pintojen muutosten mittaamisessa.

³ www.hansaluftbild.de, viitattu 25.2.2008.

4.2 Laserkeilaus infrarakentamisessa haastatteluiden perusteella

Tulokset perustuvat seuraavien henkilöiden haastatteluihin ja kyselyihin:

- Professori Juha Hyyppä, Geodeettinen laitos
- DI Anttoni Jaakkola, Geodeettinen laitos
- Dosentti Sanna Kaasalainen, Geodeettinen laitos
- DI Antero Kukko, Geodeettinen laitos
- FM Henri Niittymäki, Geodeettinen laitos
- Koordinaattori Marika Ahlavuo, TKK
- DI Anna Erving, TKK
- FM Nina Heiska, TKK
- TkT Hannu Hyyppä, TKK
- TkL Petri Rönholm, TKK
- DI Tauno Suominen, Destia
- FT Richard Hudd, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos
- PhD Vahur Joala, Leica Nilomark Oy
- Rakennuspäällikkö Tomi Ylifranti, NCC Oy
- Projekti-insinööri Teemu Mielonen, Finnmap Oy
- FT Petteri Alho, Turun yliopisto
- FM Tanja Ratilainen, Turun yliopisto
- Toimitusjohtaja, DI, Juha Heikkinen, Neopoint Oy.

4.2.1 Laserkeilauksen käyttömahdollisuudet

Laserkeilainten käyttömahdollisuudet ovat laajat infrarakentamisen eri vaiheissa, koska niitä pystytään hyödyntämään kaikessa mittaamisessa, jossa tarvitaan kolmiulotteista tietoa kohteesta.

Ilmalaserkeilausta hyödynnetään erityisesti erilaisten infrahankkeiden suunnittelussa lähtötietojen hankkimiseen. Korkeusmallien ja maastomallien tuottamiseen se onkin ylivoimainen tekniikka, koska tietoa saadaan nopeasti suuresta alueesta. Laserkeilaamalla hankittua tietoa joudutaan tosin vielä täydentämään maastossa tehtävillä mittauksilla. Maastomittauksilla määritetään esimerkiksi kallioiden rajauksia ja ojien ja muiden vesialueiden pohjia. Suurin haaste laserkeilauksella on taiteviivojen tuottaminen. Laserkeilaus perustuu hajapisteisiin, joista taiteviivojen tuottaminen maastomallia varten

vaatii avukseen usein digitaalista kuva-aineistoa. Laserkeilausaineistoa voidaan käyttää muun muassa seuraavien hankkeiden suunnitteluun:

- Tiehankkeet
- Kaupunkihankkeet
- Tulvahankkeet (tulvakartat, tulvasuojelurakenteet)
- Patohankkeet
- Sähkölinjahankkeet
- Satamahankkeet
- Lentokenttähankkeet
- Kaatopaikkahankkeet.

Laserkeilaustekniikat soveltuvat hyvin yksityiskohtaisen kolmiulotteisen maasto- ja kohdemallin tekemiseen myös jokialueilta. Silloin ilma- ja maa-laserkeilausta voidaan hyödyntää tulva-alueiden kartoituksessa ja nykyisten tulvasuojelurakenteiden kunnon, korkeuden ynnä muun mittaamisessa. Maanmittauslaitoksen kansallinen ilmalaserkeilaus Suomesta toteutetaan suhteellisen harvana kustannussyistä. Jo tälläkin pistetiheydellä saavutetaan 15-30 cm korkeustarkkuus. Maanpinnalla tehtävillä laserkeilauksilla eli maa-laserkeilauksilla voidaan täydentää ilmalaserkeilausaineistoa erityisesti jo-kiympäristöissä. Maalaserkeilauksen tarkkuus on parhaimmillaan noin 1-5 cm, jolloin saadaan tarkkaa maanpinta- ja kasvillisuustietoa niin jokisärkistä, törmistä kuin tulvatasangoilta. Maalaserkeilausta voidaan suorittaa kiinteästi kolmijalalta useasta eri paikasta tai liikkuvan kartoituksen keinoin laserkeilaimen sijaitessa veneessä (mobiili kartoitus). Näillä lähestymistavoilla saadaan joen veden pinnan yläpuolisesta topografiasta kerättyä nopeasti tarkkaa kartoitusaineistoa, jota ei millään muulla kartoitustavalla voitaisi kerätä.

Liikkuvan kartoituksen menetelmin saadaan mittaustuloksia lähes kaikkialta, minne ajoneuvolla pääsee. Infrarakentamisessa käyttökohteita voivat olla esimerkiksi:

- Tie- (ja rata-) ympäristön kartoitus ja mallintaminen
- Tieinfran inventoiminen
- Tienpinnan mittaaminen
- Tien ylläpitoa varten tehtävät mittaamiset
- Tunnelisovellukset.

Eri laserkeilausmenetelmillä hankittua tietoa voidaan hyödyntää paitsi täysin uusien kohteiden suunnitteluun myös vanhojen kohteiden saneeraamisen ja laajentamisen suunnitteluun. Laserkeilaamalla voidaan hankkia puuttuvia lähtötietoja, jos vanhoja suunnitelmia ei enää ole tallessa tai halutaan täydentää olemassa olevia suunnitelmia. Laseraineistoa mallintamalla ja liittämällä siihen suunniteltua aineistoa voidaan kolmiulotteisesti tarkastella rakennusosien sijoittamista, esimerkiksi laitoksia laajennettaessa putkilinjojen mahdollistamista vanhojen rakenteiden sekaan, ja näin varmistaa, että yhteen törmäyksiä ei tule. Suunnitelmaa on helpompi muuttaa ajoissa ennen varsinaista rakentamista, kuin vasta sitten kun työmaalla konkreettisesti törmätään esteisiin.

Menetelmillä voidaan inventoida ja dokumentoida erilaisia asioita, muun muassa kaasuputkia, sähkölinjoja, laitoksia, teitä ja ratoja. Pistetiheydestä riippuen laseraineistosta on mahdollista havaita erilaisia detaljeja.

Laserkeilausaineistoista voidaan laskea massoja ja määriä tarkasti, esimerkiksi maaleikkausten ja louhintojen määrät, maa-aineskasojen tilavuudet ja niin edelleen (kuva 25). Tarkat määrät helpottavat myös kustannusten laskemista.



Kuva 25. Laserkeilaus mahdollistaa myös massojen laskua kasoista. © Petri Rönholm ja Hannu Hyyppä 2006.

Rakennushankkeen aikana työmaan etenemistä voidaan tarkkailla laserkeilausaineiston perusteella ja laserkeilauksilla saadaan taltioitua rakennushankkeen eri vaiheita mahdollista myöhempää tarvetta varten. Menetelmällä voidaan dokumentoida rakennusosien sijaintia ja sitä miten ne on tehty. Infra-rakentamisessa työn tulos jää usein suureksi osaksi maan alle näkymättömiin, jolloin keilaukset pitää pystyä tekemään ennen seuraavaa työvaihetta tai rakennusosien lopullista peittämistä. Erityisesti mobiilimittauksilla tietoa

pystyy keräämään nopeasti tieympäristöstä, rataympäristöstä tai tunnelista. Menetelmällä voidaan myös dokumentoida putkia ja johtoja ennen niiden peittämistä.

Laseraineistoista pystytään tekemään erilaisia vertailuja helposti. Tätä voidaan hyödyntää laadunvalvonnassa ja rakenteiden suunnittelussa tekemällä vertailuja toteutuneen ja suunnitelmamallin välillä. Jos poikkeamia havaitaan, niitä voidaan yrittää korjata ajoissa suunnittelemalla seuraava rakennusvaihe todellisen tilanteen perusteella (esimerkiksi muutetaan elementtien kokoa sopivaksi). Laaduntarkkailussa erilaisten pintojen tasaisuuden ja kaltevuuden havainnoiminen voi myös olla oleellista.

Erlaisia muutoksia pystytään havaitsemaan ja seuraamaan keilaamalla sama kohde tietyin väliajoin. Seurantamittauksia voidaan tehdä jonkin kohteen, esimerkiksi tunnelin tai sillan, koko elinkaaren ajan. Jo rakentamisvaiheessa voidaan dokumentoida eri työvaiheita ja kohteen valmistumisen jälkeen voidaan keilata ja mallintaa koko kohde. Tietyin väliajoin tehtävien seurantakeilausten avulla voidaan tarkkailla muutoksia muun muassa kohteen muodossa, pinnassa ja mahdollisissa halkeamissa. Säännöllisen seurannan perusteella korjaustarvetta voidaan arvioida ja korjaustoimenpiteitä voidaan suunnitella etukäteen.

Laserkeilausaineistosta tuotettu malli voisi toimia myös käyttöliittymänä rakennuksen tai muun kohteen käytölle, huollolle ja elinkaaren dokumentoinnille.

4.2.2 Laserkeilauksen ongelmia

Menetelmä on vielä tuntematon

Laserkeilausmenetelmät ja varsinkaan niiden sovellusmahdollisuudet eivät vielä ole kovin laajalti tiedossa. Tekniikka tuskin tulee yleistymään ennen kuin tietoa aiheesta on hyvin kaikkien saatavilla. Tietoa tulisi levittää erityisesti siitä, mihin kaikkeen laserkeilausta voidaan käyttää.

Osaamista ei ole tarpeeksi

Suomessa ei ole kovinkaan monia tahoja, jotka pystyvät viemään laserkeilausprojektit loppuun asti. Alan ammattitaitoisia tekijöitä on vielä vähän ja kattavaa koulutusta aiheesta ei ole tarjolla. Laittevalmistajat, maahantuojat ja

ohjelmistoyritykset järjestävät kyllä koulutusta omista tuotteistaan, mutta usein koulutukset ovat lyhytkestoisia verrattuna siihen kuinka paljon asioista tulisi tietää. Jotta mittausprojektit onnistuvat hyvin, tarvitaan tietoa ja osaamista muun muassa maanmittauksen perusteista, laitteiden ominaisuuksista, ohjelmistojen ominaisuuksista, ja olosuhteiden vaikutuksesta mittauksiin. Monet nykyisin laserkeilausta tekevistä ovat lähes itseoppineita.

Kalleus

Maalaserkeilain on kallis hankinta, varsinkin jos laitteelle ei ole paljoa käyttöä. Hyvä laite maksaa 75 000 - 150 000 €, jonka lisäksi ohjelmiston hankkiminen maksaa 10 000 - 30 000 €. Myös laserkeilausmittausten ostaminen muualta maksaa.

Pistepilvien käsittelyssä on haasteita

Laserkeilaus eri menetelmin on nopeaa ja pistepilvet sisältävät valtavat määrät tietoa. Aineistojen koko aiheuttaa ongelmia, koska valtavan kokoisten tiedostojen käsittely on mahdotonta. Pistepilvien käsittelyyn tarkoitetuissa ohjelmissa on kuitenkin ratkaisuja pienentää kerralla käsiteltävän aineiston kokoa. Pisteistöä voidaan esimerkiksi harventaa automaattisesti tai aineisto voidaan jakaa pienempiin kerralla käsiteltäviin alueisiin.

Aikaa kuluu paljon pistepilvien jalostamiseen. Voidaan sanoa, että esimerkiksi tunti ilmalaserkeilausta vaatii 20 tuntia aineiston käsittelyä. Automaation kehittyminen aineistojen käsittelyssä nopeuttaisi prosessia huomattavasti.

Hitaus pistepilvien muokkauksessa pienentää laitteiden käyttökapasiteettia, jos työvoimaa ei ole tarpeeksi aineiston käsittelyyn. Laserkeilausmittauksia ostaneet asiakkaat haluavat useimmiten valmiita tuotteita, koska heillä ei monesti ole tarvittavaa taitoa ja muita mahdollisuuksia raaka-datan käsitteilyyn. Automaation kehittyminen, ohjelmistojen tekeminen helppokäyttöisemmiksi ja niiden hintojen aleneminen sekä koulutus auttaisivat eri tahoja itse tekemään pistepilvistä haluamiaan tuotteita. Näin mahdollistettaisiin myös laitteiden tehokkaampi käyttö.

Käytännössä tietynmerkkisen laitteen tuottamaa aineistoa kannattaa käsitellä laitevalmistajan omalla ohjelmistolla. Jokaisella valmistajalla on oma tiedostoformaatti, joka ei ole yhteensopiva muiden valmistajien tuotteiden

kanssa. Tiedostot pystyy muuntamaan ASCII-muotoon, jolloin pistetiedostot saadaan siirrettyä myös muihin ohjelmiin. Prosessissa tiedostojen koko kuitenkin kasvaa entisestään ja joitakin tietoja voidaan menettää. Tarvittaisiinkin yleinen standardoitu ja avoin tiedostoformaatti, jota eri laitevalmistajat myös tukisivat.

Laitteiden käytössä on rajoituksia

Olosuhteet, joissa mittauksia tehdään, rajoittavat laserkeilainten käyttömahdollisuuksia. Monesti säätökijät vaikuttavat mittauksiin tai estävät ne kokonaan. Sade ja sumu huonontavat mittaustuloksia, sillä vesipisarot aiheuttavat kohinaa ja epätarkkuutta aineistoon. Kaikki keilaimet eivät siedä pakkasta ja liian kuumatkin olosuhteet ovat ongelma. Ilmalaserkeilauksia tehdessä pilvet eivät saa olla liian alhaalla ja parhaat tulokset saadaan, kun lennot tehdään joko keväällä tai syksyllä, jolloin kasvillisuutta on vähemmän eikä lunta ole maassa.

Suomessa suuri este maalaserkeilaimien hyödyntämiselle infrarakennushankkeissa on se, ettei täällä vielä ole kuin yksi varta vasten maastomittauksiin tarkoitettu laite. Maastossa tehtävissä mittauksissa on tärkeää, että laite on suojattu pölyltä, sateelta ja muilta ulkoisilta rasituksilta, se toimii myös pakkasella ja mittauksia voidaan tehdä myös etäältä.

Tummat ja kiiltävät pinnat (lasi, vesi, peilit) sekä liian kirkas valo voivat aiheuttaa myös ongelmia.

Ohjelmistot ovat vaikeita käyttää

Koska laserkeilaus on menetelmänä melko uusi, ohjelmistot ovat usein vielä kehitysasteella. Lisäksi ohjelmistoja tehdään ammattilaisten käyttöön, minkä vuoksi ne voivat olla vaativia käyttää.

Ongelmat työmaolosuhteissa

Olosuhteet rajoittavat ulkona tehtäviä keilauksia työmaalla. Lisäksi maalaserkeilaus vie aina jonkin verran aikaa ja työmaasta riippuen saattaa pysäyttää työt keilauksen ajaksi. Mitä tarkempaa tietoa tarvitaan, sitä hitaampaa keilaus on. Toisaalta liikkuvat ihmiset ja koneet eivät ole laserkeilauksen kannalta niin haitallisia kuin paikallaan olevat. Paikallaan olevien, mittauksen kannalta turhien kohteiden takaa ei saada mitään tuloksia.

Joissakin laitteissa mittaustieto siirretään jo mittauksen aikana tietokoneelle ja aineistonkäsittelyohjelmistoon, jolloin se on heti käytettävissä. Toisissa laitteissa aineisto siirretään keilaimelta tietokoneelle erikseen mittauksen päätyttyä, jolloin aikaa kuluu 15 - 20 min, mikä lisää mittauksiin menevää aikaa entisestään.

Pistepilvien muokkaaminen, muun muassa ylimääräisten asioiden, kuten telien, ihmisten ja autojen poistaminen aineistosta, vie aikaa. Tämän vuoksi erilaisia vertailuja ja tarkasteluja ei päästä tekemään heti mittausten jälkeen, vaan joudutaan palaamaan toimistolle pöydän ääreen aineistoa käsittelemään.

Koska rakennusyriyksillä ei vielä ole palveluksessaan sellaisia henkilöitä, jotka pystyisivät viemään koko laserkeilausprosessin loppuun asti, mittaukset joudutaan ostamaan muualta. Tällöin laitetta ei välttämättä pystytä hyödyntämään monipuolisesti, koska se ei ole koko ajan käytettävissä. Jos työmaalla ei ole laserkeilaukseen tai edes laserkeilausaineiston käsittelyyn perehtynyttä henkilökuntaa, ei menetelmän hyödyntäminen työmaan tarpeisiin liene järkevää.

Ihannetilanne laserkeilauksen hyödyntämiseen työmaan tarpeissa olisi (jos tekniikka on hallussa) se, että käytössä olisi nopea ja tarkka keilain, tiedon siirto tapahtuisi välittömästi keilaimelta tietokoneelle, aineistonkäsittelyohjelmassa olisi kattava valikoima erilaisia mittaustyökaluja kohteiden välisten mittojen ja kulmien määrittämiseen sekä kyky verrata mitattua suunnitelmalliin reaaliaikaisesti. Toteutumamallin tekemistä varten tarvittaisiin myös nopea ja automaattinen mallinnus.

4.2.3 Laserkeilauksen kehitys

Hyperspektrilaserkeilain

Tutkimuksen ja kehitystyön alla on intensiteettitiedon ja spektroskopiadatan käyttö ja yhdistäminen laserkeilaukseen. Spektrometri mittaa spektrejä eli sitä miten valo hajoaa, kun eri valon aallonpituudet ovat törmäyksessä. Tämän avulla voidaan tunnistaa eri kohteita, koska esimerkiksi eri kasveilla on eri spektrit. Kalibroitu kirkkaustieto yhdistettynä paikkatietoon tehostaa kohteiden luokittelua. Jos kirkkaustieto saadaan monikanavaisena tai jatkuvana

spektrinä, saadaan paikkatiedon lisäksi spektroskopiaa tai värikuvia samalla laitteella eikä tarvitse käyttää erillistä kameraa kuvien tuottamiseen.

Pelkän laserkeilaimen tuottamaa intensiteettitietoa on jo jonkin verran hyödynnetty pisteiden luokittelussa, mutta sen kalibrointi on ollut lähes mahdotonta.

Hyperspektrilaserkeilaimessa eli niin sanotussa superjatkumokeilaimessa laserkeilain ja spektrometri on yhdistetty. Laserlaitteesta tulee jatkumona yhtä aallonpituutta, joka johdetaan valokuituun. Valokuidussa lasersäde hajoaa, jolloin saadaan useita aallonpituuksia.

Liikkuva kartoitus

Kiivaan kehitystyön kohteena on tällä hetkellä laserkeilaimiin perustuva liikkuva kartoitus, niin sanottu mobile mapping, siihen sopivat laitteistot ja aineistonkäsittelymenetelmät. Liikkuva kartoitus tarkoittaa käytännössä sitä, että yleensä autoon on kiinnitetty yksi tai useampi laserkeilain, paikannuslaitteisto ja mahdollisesti myös kamera. Mittausta tehdään auton liikkuesssa.

Geodeettisella laitoksella on ensimmäinen ja ainoa suomalainen sovellus mobiilimittausjärjestelmästä. Maailmalla on toistaiseksi vain pari muuta vastaavaan käyttöön soveltuvaa kaupallista laitteistoa, joita ei ole myyty vielä kuin muutamia kappaleita (Lynx ja Street Mapper).

Mahdollisia sovellusalueita kartoitetaan, mutta infrarakentamisen näkökulmasta menetelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi tienrakentamisessa. Se soveltuu tieympäristön kartoittamiseen, tiealueen inventoimiseen, tie- ja rataympäristön mallintamiseen, tienpinnan mittauksiin ja tunnelimittauksiin.

Arvioidaan, että kuluu vielä kymmenisen vuotta ennen kuin liikkuvan kartoituksen sovellukset ovat ilmalaserkeilauksen tasolla.

Ohjelmistojen kehitys

Laserkeilausmenetelmien kehityksen painopiste on nyt ohjelmistojen kehityksessä. Automaation kehittäminen on yksi suurimmista haasteista. Laserkeilaimilla pystytään tuottamaan nopeasti valtavat määrät tietoa, mutta väliin käsitellä sitä tietoa tehokkaasti puuttuvat vielä. Automaation avulla pis-

teiden luokittelu ja kohteiden mallinnus nopeutuu ja helpottuu. Ohjelmistoista tehdään myös helppokäyttöisempiä.

Erilaisten pintamallien tekeminen pistepilvistä perustuu usein kolmioverkon tekemiseen halutusta pinnasta. Kolmioverkkojen käsittely vaatii lisää kehitystyötä. Esimerkiksi maastomallien tekemisessä menetelmä toimii vielä hyvin, mutta muun muassa rakennuksien tai tunneleiden kolmioinnissa on ongelmia. Kolmiointi on liian monimutkaista eikä tarpeeksi tarkkaa ja osa tiedosta häviää väliltä. Kolmioverkkopinta on epätasainen eikä siten kuvaa pintaa aidosti. Solid-mallien eli tilavuusmallien käyttäminen olisi monessa tapauksessa parempi.

Myös muiden kuin laserkeilausohjelmistojen kehitystä tarvitaan. Kaikkiin suunnitteluohjelmistoihin ei voi suoraan viedä pistepilviä, vaan ne täytyy ensin mallintaa valmiiksi.

Laitteiden kehitys

Laserkeilaimista on saatu jo melkoisen tehokkaita ja nopeita ja erityyppisiä laitteita on kehitetty erilaisiin tarpeisiin. Tällä hetkellä oleellista on aineiston käsittelyn kehittyminen yhtä hyvälle tasolle. Laitteista tulee kuitenkin yhä tehokkaampia, jolloin saadaan nykyistä enemmän ja tarkempaa dataa mitattavista kohteista. Laserkeilainten värien käsittely paranee. Maalaserkeilaimista tulee myös pienempiä ja kevyempiä ja niiden pakkasenkestävyyttä parannetaan.

Hybriditekniikkaa, jossa pulssi- ja vaihe-erotoiminnot yhdistetään, kehitetään. Tällöin saavutetaan molempien tekniikoiden edut, pitkä mittausetaisyys ja hyvä tarkkuus.

Prosessin hallintamallit

Prosessin hallintamalleja kehitetään. Laserkeilaamalla voidaan tuottaa malli halutusta asiasta, vaikka paperitehtaasta. Malliin voidaan liittää parametreina erilaisia asioita kuten putkissa virtaavat aineet, lämpötilat, venttiilien asennot ja niin edelleen. Putkea osoittamalla ohjelma kertoo, mitä siellä on. Ohjelman avulla voidaan selvittää prosesseissa ilmaantuvien ongelmien syyt, esimerkiksi venttiilin jumiutuminen väärään asentoon.

4.3 Johtopäätökset

Haastatteluiden ja kirjallisuuden perusteella voidaan päätellä, että laserkeilausmenetelmät soveltuvat infrarakentamisen erilaisiin mittaustarpeisiin suunnittelusta toteutukseen, vaikka laitteissa ja ohjelmistoissa vielä onkin kehitettävää. Laserkeilausmenetelmien etu muihin mittaustarpeisiin verrattuna on sen nopeus, tarkkuus, turvallisuus ja valtava tietomäärä mitattavasta kohteesta. Laserkeilaus vaatii kuitenkin erityistä osaamista, jotta mittaukset saadaan suoritettua luotettavasti ja aineiston jatkokäsittely onnistuu. Menetelmän käyttöä rajoittaa myös jossain määrin sen kalleus.

Rakennushankkeiden eri vaiheissa on erilaisia mittaustarpeita. Mittausmenetelmää valitessa tulisikin määrittää mikä on työn tavoite ja millä välineillä päästään parhaaseen lopputulokseen ottaen huomioon myös kustannukset ja ajankäyttö.

Vaikka laserkeilausta ei vielä ole kovin paljon hyödynnetty työmaaoiloissa, tulee se kehityksen ja tiedon leviämisen myötä yleistymään myös siellä. Laserkeilainten ja laseraineistojen käyttäjiä tulee enemmän, jolloin saadaan enemmän käytännön kokemusta laitteiden hyödyntämismahdollisuuksista.

Suunnittelun lähtötietojen hankkiminen sekä uudiskohteiden rakentamiseen että vanhojen kohteiden saneeraukseen tai laajentamiseen onnistuu nopeasti laserkeilaustekniikoilla. Laajat alueet saadaan kartoitettua ilmalaserkeilauksella ja pienemmät ja mahdollisesti monimutkaiset tilat saadaan mallinnettua maalaserkeilauksella. Ilmalaserkeilauksella tuotetaan erityisesti maastomalleja infrarakentamisenkin tarpeisiin. Nopeus on monesti valttia, koska rakennushankkeet toteutetaan usein tiukalla aikataululla.

Korkeusmallista ja pintamalleista voidaan edelleen tehdä erilaisia analyyskejä ja arvioita, joita voidaan käyttää suunnittelun apuna. Mallien perusteella voidaan esimerkiksi tehdä melumallinnusta, mallintaa vesien valumista ja tulvia ja ohjata rakentamista turvallisiin paikkoihin.

Monimutkaisten sähköasemien tai muiden laitosten laajennuksia suunniteltaessa on hyödyllistä voida tarkastella sekä olemassa olevaa että suunniteltua kolmiulotteisesti, jolloin on helpompi hahmottaa kokonaisuus ja varmistaa, että eri osat eivät törmää toisiinsa ja kaikki osat mahtuvat niille suunnitelluille paikoille.

Jo suunnitteluvaiheessa on hyödyllistä pystyä laskemaan määriä mahdollisimman tarkasti, jolloin hankkeen kustannuksia voidaan arvioida tarkemmin ja niihin voidaan vielä vaikuttaa. Perinteisistä asemapiirustuksista, poikki- ja pituusleikkauksista laskettaessa määrät ovat enemmän arvioita, koska kaikkea tietoa ei voida esittää joka kohdasta. Esimerkiksi tien poikkileikkaukset on usein esitetty 20 m:n välein, jolloin tieto välillä olevasta alueesta ei ole laskennassa käytettävissä. Tulevat rakennekerrokset ovat tuolla välillä melko varmasti samoja, mutta nykyisen maanpinnan ja kallionpinnan korkeus voi vaihdella äkkiäkin. Olisi mielenkiintoista tietää, kuinka paljon määrät eroavat toisistaan, kun lasketaan paperikuvista "käsin" tai kolmiulotteisista suunnitelmista tietokoneavusteisesti.

Kun suunnitelmien eri vaihtoehtoja puntaroidaan ja suunnitelmia esitellään eri kohderyhmille, niiden havainnollisuus on tärkeää. Laserkeilauksilla voidaan tuottaa realistisen näköistä materiaalia olemassa olevasta tilanteesta ja malliin voidaan istuttaa suunnitellut asiat. Kohdetta voidaan tarkastella joka puolelta.

Laserkeilausaineistosta on mahdollista tarkastella pistetiheydestä riippuen paljon muutakin kuin maanpintaa. Aineiston perusteella voidaan tehdä muun muassa erilaisia inventointeja. Käytössä oleva ohjelmisto vaikuttaa siihen, kuinka helposti aineistosta saadaan erilaisia asioita mitattua. Jollain ohjelmalla riittää, että pistepilvestä osoittaa kohteen ja kertoo sen muodon, jolloin ohjelma etsii koko aineistosta kyseisen asian, esimerkiksi reunakivet tai putket. Ohjelmistojen erilaisilla mittaustyökaluilla voidaan mitata muitakin haluttuja asioita suoraan pistepilvistä. Tästä on hyötyä sekä suunnittelun että rakentamisen aikana, kun toimistosta ei ole pakko lähteä maastoon tai työmaalle tarkastamaan ja mittaamaan tarvitsemiaan asioita.

Rakentamisvaiheessa työn etenemistä voidaan seurata ja dokumentoida laserkeilaamalla. Laserkeilaus on "lahjomaton" menetelmä kuvata olemassa olevaa tilannetta. Täytyy myös päättää, mitkä asiat halutaan dokumentoida ja millä tarkkuudella. Ei ole järkevää hidastaa koko työmaan toimintaa ehkä tarpeettomilla laserkeilausmittauksilla, jos sama tieto saadaan muilla menetelmillä riittävän tarkasti ja nopeammin.

Keilausten perusteella voidaan rakentamisvaiheessakin laskea määriä. Esimerkiksi louhintojen, maaleikkauksien ja täyttöjen määrät voidaan mitata tar-

kasti ja suunnitella massojen sijoittelua. Materiaalien menekit voidaan laskea tarkemmin, jolloin hukkaan menee vähemmän ja voidaan tilata kerralla oikeita määriä.

Laadunvalvonnan kannalta laserkeilauksilla saadaan vertailumateriaalia toteutuneesta tilanteesta suunniteltuun, voidaan tarkastaa onko lopputulos suunnitelmien mukainen. Aineiston perusteella voidaan määrittää sijainti-, mitta- ja muotoepöikkeamia. Lisäksi voidaan tarkastella erilaisten pintojen taysaisuutta ja kaltevuutta.

Myöhemmin, kohteen jo valmistuttua, voidaan laserkeilaamalla suorittaa seurantamittauksia. Pistepilvet kuvaavat aina olemassa olevaa tilannetta mittaushetkellä. Sen vuoksi ne soveltuvat erilaisten muutosten seuraamiseen, kun laserkeilauksia tehdään halutuin määraajoin. Esimerkiksi takuuajana ilmestyneet muutokset voidaan tarkasti havaita ja niitä voidaan verrata kohteen luovutustilanteeseen. Aikojen kuluessa seurantamittauksilla saadaan tietoa vaurioista ja niiden etenemisestä, jolloin korjaustoimenpiteet voidaan suunnitella etukäteen ja ajoittaa hyvin.

Koska laserkeilaimet tuottavat kolmiulotteista tietoa, suuremman hyödyn saavuttamiseksi tulisi panostaa myös muun muassa kolmiulotteiseen suunnitteluun, kolmiulotteisen tiedon toimittamiseen hankkeen eri osapuolille, kolmiulotteiseen työmaan hallintaan ja ohjaukseen sekä tiedon tallentamiseen kolmiulotteisessa muodossa. Malliin voisi liittää enemmän paikkatietoa, esimerkiksi siltamalliin materiaalitietoja ja korjaustoimenpiteitä. Tiemallissa myös voisi olla materiaalitietoja, havaittuja ja korjaamista odottavia vikoja, korjaus- ja parantamistoimenpiteitä, kunnossapitäjien yhteystietoja tieosuuk-sittain ja niin edelleen.

Koska laserkeilausmenetelmät ovat vielä uusia, myös alan ammattilaiset jossain määrin vasta kartoittavat ja kokeilevat erilaisia hyödyntämismahdollisuuksia.

5 YHTEENVETO

Tässä insinööriyössä selvitettiin laserkeilauksen hyödyntämistä infrarakentamisen näkökulmasta haastatteluin ja kirjallisuudesta. Samalla kartoitettiin menetelmän ongelmia ja rajoituksia ja selvitettiin tulossa olevia uusia ominaisuuksia ja muita parannuksia.

Laserkeilaus perustuu etäisyyden mittaamiseen lasersäteen avulla. Lasersädettä lähetetään eri suuntiin, jolloin ympäristöstä saadaan valtavat määrät mittauspisteitä, niin sanottu pistepilvi. Jokaisella pisteellä on x-, y- ja z-koordinaatit. Pisteitä on niin tiheässä, että niiden perusteella voidaan luoda todenmukainen kolmiulotteinen malli mitattavasta kohteesta.

Lisätietoa pisteiden tulkitsemiseen ja havainnollistamiseen saadaan intensiteettitiedoista ja pistepilviin liitetystä digitaalikuvista, joiden perusteella pisteille voidaan määrittää väri.

Laserkeilausta voidaan tehdä joko maanpinnalta tai ilmasta. Ilmalaserkeilausta tehdään helikopterista tai lentokoneesta, jolloin laserkeilaimeen on liitetty myös paikannus- ja inertialaitteistot. Maalaserkeilauksessa laite on paikallaan tai kiinnitetty ajoneuvoon paikannuslaitteiston kanssa, jolloin puhutaan liikkuvasta kartoituksesta.

Ilmalaserkeilauksella saadaan nopeasti tietoa laajoista alueista ja maalaserkeilauksella saadaan tarkempaa tietoa pienemmistä kohteista.

Laserkeilausaineistojen käsittelyä varten on olemassa omat ohjelmistonsa. Ohjelmistojen avulla eri pistepilvet voidaan yhdistää ja niitä voidaan muokata muun muassa poistamalla turhia ja virheellisiä pisteitä. Pisteitä lisäksi luokitellaan eri ryhmiin, esimerkiksi maanpintapisteisiin ja kasvillisuuden pisteisiin. Pistepilviä voidaan harventaa tarpeen mukaan ja niistä voidaan tehdä erilaisia malleja, esimerkiksi korkeusmalleja ja pintamalleja. Laserkeilausaineistojen käsittelyohjelmista pistepilvet tai valmiit mallit voidaan siirtää muihin suunnittelu- ja mallinnusohjelmiin.

Infrarakentamisessa laserkeilausta voidaan hyödyntää suunnittelusta toteutukseen. Esimerkiksi maastomallien tuottaminen ilmalaserkeilausaineistosta suunnittelun lähtötiedoksi on jo yleistä. Maastomalleja käytetään lähes kaikessa infrarakentamisessa suunnittelun perustana, muun muassa liikenne-

väyliä suunniteltaessa. Muita käyttökohteita laserkeilauksella on olemassa olevan tilanteen taltiointi suunnittelua, dokumentointia, vertailuja, laadunvalvontaa ja muutosten mittaamista varten. Laserkeilausaineistosta voidaan myös laskea määriä.

Tällä hetkellä laserkeilauksen suurimpia ongelmia ja menetelmän yleistymistä estäviä tekijöitä ovat tiedon ja koulutuksen puute, laitteiden ja ohjelmistojen kalleus, riittämättömät välineet käsitellä laserkeilaimilla tuotettua tietoa tehokkaasti ja helposti (aikaa vievää), maastokäyttöön sopivien laitteiden puute ja toimintavarmuus.

Tulevaisuudessa laitteista tulee pienempiä ja tehokkaampia. Tietoa saadaan enemmän ja nopeammin. Ohjelmistoista tehdään helppokäyttöisempiä ja aineiston käsittelystä ja mallintamisesta tehdään automaattisempaa, mikä lisää käsittelyn nopeutta. Menetelmien yleistyessä myös laitteiden ja ohjelmistojen hinnat alenevat.

Hienoista, uusista menetelmistä huolimatta tulisi aina muistaa mikä on mitausten tavoite ja valita menetelmä sen mukaan. Laserkeilaus tullee kuitenkin helpottamaan ja nopeuttamaan myös työmaamittausten suorittamista.

LÄHDELUETTELO

Ahlavuo, Marika - Hyypä, Hannu, *Laserkeilaus on tulevaisuuden tarkkaa 4D-paikkatietoa*. Maankäyttö 4 (2007), s. 50-51.

Alho, Petteri - Hyypä, Hannu - Hyypä, Juha, *Laserkeilaamalla maastomalit tulvakartoitukseen*. Positio 3 (2008), s. 11-14.

Erving, Anna, *Maalaserkeilausaineiston käsittely*. TKK, Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen tutkimusryhmä. 2008.

Greaves, Tom - Jenkins, Bruce, *Laser Scanning Changes the Rules*. The American Surveyor May/June (2004).

Haggrén, Henrik - Rönholm, Petri, *Optinen 3D-mittaus ja laserkeilaus*. Luentomateriaali. Saatavissa www.foto.hut.fi/opetus301_10_2004.pdf. [viitattu 7.4.2008].

Heikkilä, Rauno ym., *Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönotto* (Älykäs Silta). Tiehallinnon selvityksiä 12 (2005).

Heilä, Sampsa. Tekniikka ja Talous 9.12.2005.

Heiska, Nina. Haastattelu 14.2.2008.

Hyypä, Hannu. Haastattelu 11.11.2008.

Hyypä, Hannu, *Kaukokartoitusaineistojen käyttö ja soveltaminen rakennus- ja ympäristötekniikassa*. TKK. 2007.

Hyypä, Hannu - Ahlavuo, Marika, *Vihreä laser - Vedenalaista kartoitusta laserilla*. TKK. 2008. 5s. Julkaisematon muistio.

Hyypä, Hannu - Ilvonen, Katri - Ahlavuo, Marika - Lindholm, Mika, *Laserkeilaus ja infrarakentaminen*. Julkaisematon käsikirjoitus. TKK. 2008.

Hyypä, Juha - Hyypä, Hannu, *Laserkeilaus*. Geodeettinen laitos. 2007.

Hyypä, Juha. Haastattelu 14.2.2008.

Joala, Vahur, *Laserkeilauksen perusteita*. Luentomoniste. 30.11.2006. [viitattu 7.4.2008] Saatavissa www.leica.fi.

Joala, Vahur, *Terrestriaalinen laserkeilaus*. Luentomoniste. 2007.

Järvinen, Jaakko, *Laserkeilaimilla tuotettujen keilausaineistojen yhdistäminen*. Diplomityö. TKK. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. 2007.

Kankainen, Jouko - Lindholm, Mika - Erke, Juhani, *Infraprojektin osittelu*. Lahti: SML:n Maanrakentajapalvelu. 2000.

Koski, Jarkko, *Laserkeilaus - uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen*. Maankäyttö 4 (2001), s. 24 - 26.

Kukko, Antero, *Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetriin mittaustehtäviin*. Erikoistyö. TKK. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. 2005.

Leica Keilausuutiset 2 (2005). Leica Nilomark Oy. Saatavissa: www.leica.fi

Mikkonen, Martti, *Laserkeilaus kalliorakentamisessa*. Laserkeilauksen soveltaminen rakentamiseen Seminaari. Oulu. 24.4.2006.

Mononen, Jyrki, *Laserkeilaus pintojen muutosten mittaamisessa*. Luentomateriaalia. 24.1.2005. [viitattu 25.2.2008].

Puupponen, Erno, *Tiesuunnittelussa käytettävien kartta- ja malliaineistojen tuottaminen*. Erikoistyö. TKK. Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen laboratorio. 2005.

Repo, Harri, Tekniikka ja Talous. 24.2.2006

Ruohonen, Sanna, *FARO LS 880 -laserkeilain vapaan keilainaseman menetelmässä*. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Yhdyskuntatekniikka. Tampere. 2007

Rönholm, Petri. Haastattelu 14.2.2008.

Rönholm, Petri, *Ilmalaserkeilausaineiston käsitteleminen*. Toimintaohjeet. TKK.

Rönholm, Petri, *Laserkeilaus-opintojakso luennot*. TKK. Maanmittaustieteiden laitos. 2008.

Silvennoinen, Jussi, *Laserkeilaus suunnistuskartoituksessa*. Luentomateriaali. 16.2.2008.

Suominen, Antti. *Nykyaikaisia 3D-mittausmenetelmiä talonrakentamisen laadun parantamisen apuna*. Diplomityö. TKK. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo. 2007.

Tierakentaminen uusille urille, Tietoyhteys 2 (2006), s. 2.

Vedenalaista kartoitusta laserilla, Blom Oy. Teemapäivän materiaalia 28.4.2008.

Vertanen, Antti ym., *Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja vaihtoehdot*. Työryhmämuistio. Helsinki. 2006.

www.hansaluftbild.de, Internet-sivusto [viitattu 25.2.2008]

www.leica.fi, Internet-sivusto [viitattu 13.11.2008]

www.maanmittauslaitos.fi, Internet-sivusto [viitattu 13.11.2008]

www.terrasolid.fi, Internet-sivusto [viitattu 13.11.2008]

www.wikipedia.fi, Internet-sivusto [viitattu 10.11.2008]

Teemahaastatteluiden kysymykset

1. Mitä itse teet laserkeilaimiin liittyen?
2. Minkälaisissa mittauksissa laserkeilain on hyvä ja miksi?
3. Mitkä tekijät rajoittavat laserkeilainten käyttöä?
4. Mitä ongelmia tai kehitettävää on laserkeilaimissa tai ohjelmistoissa?
5. Minkälainen on laitteiden ja ohjelmistojen käytettävyys?
6. Miten eri laserkeilausmenetelmiä voisi hyödyntää infrarakentamisessa?
7. Mitä uutta on tulossa laserkeilaimiin liittyen?

Kysely ohjelmistojen toimittajille

1. Miten laserkeilaimia voitaisiin hyödyntää infrarakentamisessa? (suunnittelu, rakentaminen, kunnossapito)
2. Minkälaisia ohjelmistoja on tarjolla laserkeilausmateriaalin hyödyntämiseen? Mitä niistä saadaan "irti"? Mitä laseraineistolle täytyy tehdä ennen kuin se on hyödynnettävissä? Mitä eri tuotteita pystytään tekemään laseraineistoista?
3. Minkälainen on ohjelmien käytettävyys? Täytyykö olla alan erikoisasiantuntija, että pystyy käsittelemään ja hyödyntämään laserkeilauksella saatua aineistoa? Onko jo olemassa ohjelmia, joita pystyisi käyttämään työmaaolosuhteissa avustamassa jokapäiväisissä töissä?
4. Mitkä ovat suurimpia ongelmia laserkeilausaineiston hyödyntämisessä tällä hetkellä? Mitä pitäisi kehittää sekä itse laitteissa että ohjelmistoissa? Onko jo jotain uutta tulossa?
5. Mikä tällä hetkellä on esteenä laserkeilauksen yleistymiselle?
6. Millaista koulutusta laserkeilaukseen liittyen on asiakkaille tarjolla? Millaista koulutustarvetta on ilmennyt? Jos saisitte päättää ketä koulutetaan ja miten, ketkä kouluttaisivat ja keitä? Miksi? Oman tiedon päivitys?
7. Minkälaisille tahoille omat tuotteenne ja palvelunne on suunnattu? Esim. onko rakennusurakoitsijoilla kiinnostusta/tarvetta laserkeilaimille ja ohjelmille?

Kysely konsulteille/suunnittelijoille

1. Oletteko hyödyntäneet hankkeissanne laserkeilausta? Miten olette hankkineet aineiston, oma laite vai onko palvelu ostettu?
2. Käsittelettekö materiaalin itse vai tilaatteko valmiita tuotteita?
3. Miten olette hyödyntäneet laserkeilausaineistoa? Minkälaisissa hankkeissa? Miksi päädyitte laserkeilausmenetelmään?
4. Miten laserkeilausmenetelmiä voitaisiin hyödyntää muuten infrarakentamisessa (suunnittelu, rakentaminen, kunnossapito)?
5. Mitä hyviä ja huonoja puolia on laserkeilauksessa ja sen tuottamassa aineistossa? Mitä ongelmia on?
6. Mitä kehitettävää olisi laserkeilainjärjestelmissä ja ohjelmistoissa tai jossain muussa laserkeilaukseen liittyvässä asiassa?
7. Kuinka yleistä laserkeilauksen hyödyntäminen on?
8. Mitä ohjelmistoja käytätte pistepilvien käsittelyyn tai mallintamiseen?
9. Onko yrityksessä riittävästi asiantuntijoita laserkeilaustekniikasta ja sen soveltuvuudesta?
10. Pitäisikö järjestää alaan liittyvää tiedotusta, koulutusta tai teknistä neuvontaa tai opastusta? Minkälaista?
11. Minkälaista koulutusta laserkeilaukseen liittyen olette saaneet? Minkälaista koulutustarvetta teillä on ilmennyt? Jos saisitte päättää ketä koulutetaan ja miten, ketkä kouluttaisivat ja keitä? Miksi?

Kysely rakennusyrityksille

1. Oletteko hyödyntäneet laserkeilausta rakennushankkeissanne? Jos olette, miten olette hankkineet aineiston? Oma laite vai palvelu ostettu muualta?
2. Jos teillä on oma laite, minkälaisia ovat käyttökokemukset? Helpo-
poa/vaikeaa/mitä ongelmia on? Mitkä tekijät rajoittavat laserkeilaimen käyttöä?
3. Jos ostate laserkeilauksen muualta, ostateko pelkät pistepilvet, valmiit tuotteet
vai molemmat? Onko teillä valmiuksia käsitellä pistepilviä itse? Minkälaisia val-
miita tuotteita ostate?
4. Miten olette hyödyntäneet laserkeilausmenetelmiä? Referenssejä ja käyttökoh-
teita toteutuneista hankkeista. Miksi valitsitte laserkeilauksen mittaumenetel-
mäksi?
5. Miten muuten laserkeilausta voitaisiin hyödyntää infrarakentamisessa (suunnit-
telu, rakentaminen, kunnossapito)?
6. Mihin erityiskohteisiin haluaisitte laserkeilaustekniikan tarjoavan kustannuste-
hokkaita ratkaisuja?
7. Mitä ovat laserkeilausmenetelmien hyvät ja huonot puolet? Entä ongelmat? Mitä
kehitettävää on laserkeilainjärjestelmissä ja ohjelmistoissa tai jossain muussa
laserkeilaukseen liittyvässä asiassa?
8. Mitä ohjelmistoja käytätte laserkeilattujen pistepilvien käsittelyyn tai mallintami-
seen?
9. Onko yrityksessä riittävästi asiantuntijoita laserkeilaintekniikasta ja sen soveltu-
vuudesta?
10. Minkälaista koulutusta laserkeilaukseen liittyen olette saaneet? Minkälaista kou-
lutustarvetta on ilmennyt? Jos saisitte päättää ketä koulutetaan ja miten, ketkä
kouluttaisivat ja keitä? Miksi?

Kysely tutkijoille

1. Miten olette hyödyntäneet laserkeilaustekniikoita omissa hankkeissa? Onko teil-
lä oma laite vai ostateko palvelun? Miksi päädyitte laserkeilausmenetelmään?
2. Käsittelettekö aineiston itse? Mitä ohjelmistoja käytätte pistepilvien käsittelyyn
tai mallintamiseen?
3. Miten laserkeilausmenetelmiä (ilma-, maa-) voitaisiin hyödyntää infrarakentami-
sessa (suunnittelu, rakentaminen, kunnossapito)?
4. Mitä hyviä ja huonoja puolia on laserkeilauksessa ja sen tuottamassa aineistos-
sa? Entä ongelmia? Mitkä tekijät rajoittavat laserkeilauksen käyttöä?
5. Mitä kehitettävää olisi laserkeilainjärjestelmissä ja ohjelmistoissa tai jossain
muussa laserkeilaukseen liittyvässä asiassa?
6. Minkälaista koulutusta laserkeilaukseen liittyen olette saaneet? Minkälaista kou-
lutustarvetta teillä on ilmennyt? Jos saisitte päättää ketä koulutetaan ja miten,
ketkä kouluttaisivat ja keitä? Miksi?

