

Janne Järvenpää

# Ilmalaseraineiston korkeuden vertaaminen olemassa olevaan kiintopisteverkkoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

18.9.2014

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Janne Järvenpää Ilmalaseraineiston korkeuden vertaaminen olemassa olevaan kiintopisteverkkoon</p> <p>24 sivua + 2 liitettä 18.9.2014</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>insinööri (AMK)</p>
<p>Tutkinto-ohjelma</p>	<p>maanmittaustekniikka</p>
<p>Ohjaajat</p>	<p>paikkatietoinsinööri Vesa Posio lehtori Jussi Laari</p>
<p>Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin ilmasta suoritettu laserkeilaus onnistui. Onnistumista pyrittiin arvioimaan vertaamalla paikallisen kiintopisteverkon ja laserkeilauksen korkeuseroa. Ilmalaserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttavien tekijöiden selvittäminen oli iso osa työtä.</p> <p>Varsinainen vertailu suoritettiin mittaamalla korkeuspisteitä tasaisille pinnoille keilausalueella. Korkeuksia verrattiin tämän jälkeen keilattuun materiaaliin korkeuserojen selvittämiseksi. Jotta keilauksen onnistumisesta saataisiin parempi kuva, tuloksia verrattiin vielä laserkeilauksen arvioituun tarkkuuteen.</p> <p>Suoritettuihin vertailuihin perustuen keilauksen korkeustarkkuus osoittautui hyväksi. Horisontaalista tarkkuutta ei mitattu, mutta se arvioitiin keilausmateriaalin käyttötarkoitukseen sopivaksi.</p> <p>Tutkimus osoitti, että monet tekijät vaikuttavat ilmalaserkeilauksen tarkkuuteen ja siksi tarkkuuden arviointi voi olla vaikeaa.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>ilmalaserkeilaus, tarkkuus, vertailu</p>

Author Title	Janne Järvenpää Comparison of the height data from airborne laser scanning to local control points
Number of Pages Date	24 pages + 2 appendices 18 Sep 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Vesa Posio, Spatial Information Engineer Jussi Laari, Senior Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to establish the success of a town center wide aerial laser scanning. This was done by comparing the height difference of the laser scanning data to local control points. A major part of the study considered matters that affect the accuracy of airborne laser scanning.</p> <p>The comparison was done in the field by measuring the elevation of flat surfaces inside the scanned area. The measurements were then compared to the laser scanned point cloud to find out the elevation difference. To understand the results, the height differences were then compared to estimate the accuracy values of the laser scanning.</p> <p>The vertical accuracy of the scan turned out to be good. The horizontal accuracy was not measured but it was estimated to be good enough for its purpose. The study showed that various issues can have an effect to the overall accuracy of airborne laser scanning, and therefore, it can be hard to estimate the accuracy.</p>	
Keywords	airborne, laser, scanning, accuracy, comparison

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laserkeilainten historiaa	1
3	Laserkeilainten toiminta	2
4	Ilmasta suoritettun laserkeilauksen hyödyt ja rajoitukset	7
5	Keilauksen suunnittelu	7
6	Virhelähteitä	8
6.1	Laserjalanjälki	9
6.2	Keilauskulma	9
6.3	Kohteiden heijastuskyky	10
6.4	Satelliittipaikannus- ja IMU-järjestelmä	11
6.5	Laserkeilain	13
7	Pisteiden luokittelu	15
8	Keilaus Raumalla	16
8.1	Vertailumittaukset	16
8.2	Tarkkuusarvio Rauman keilauksessa	20
9	Yhteenveto	22
10	Loppusanat	22
	Lähteet	23

### Liitteet

Liite 1. Laserkeilattujen pintojen vertailu 30 cm:n pisteresoluutiolla

Liite 2. Visuaalinen esitys pintojen korkeusvertailusta 30 cm:n pisteresoluutiolla

## Lyhenteet

ALS	Airborne Laser Scanning. Ilmalaserkeilaus.
CW	Continuous-wave. Mittaustekniikka, joka perustuu jatkuvan aaltomuotoisen lasersäteen vaihe-eromittaukseen.
DGNSS	Differential GNSS. Differentiaalimittaukseen perustuva GNSS.
DTM	Digital Terrain Model. Digitaalinen maastomalli.
FOV	Field of View. Keilauskulma.
GNSS	Global Navigation Satellite System. Satelliittipaikannusjärjestelmä, jossa hyödynnetään useiden eri järjestelmien satelliitteja.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
IMU	Inertial Measurement Unit. Kiihtyvyyttä ja kallistusta mittaava laite, jota käytetään paikannuksen apuna.
LIDAR	Light detection and ranging. Menetelmä, jossa mitataan kohteen etäisyys siitä heijastuvan valon avulla.
MTR	Multi Target Resolution. Laserkeilaimen kyky erottaa lähellä olevia kohteita toisistaan.
POS	Position and Orientation System. Paikannusjärjestelmä, joka muodostuu yleensä satelliittipaikantimesta ja IMU:sta.

## 1 Johdanto

Työn tavoitteena on selvittää konsulttiyhtiön Rauman kaupungille suorittaman laserkeilauksen onnistuminen. Onnistumista arvioidaan mittaamalla laserkeilauksen korkeusero kaupungin omaan kiintopisteverkkoon. Korkeusero selvitetään suorittamalla vertailumittauksia. Tuloksia pyritään arvioimaan selvittämällä ilmasta suoritettavan laserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttavat tekijät. Keilaus muodostuu kahdesta osasta. Keilauksista pienempi käsittää keskeisimmän osan Rauman kaupungin keskustaa sekä sen yhteydessä sijaitsevan historiallisesti arvokkaan puutaloalueen. Toinen keilauksista käsittää suurimman osan Rauman taajama-alueesta ja tässä työssä keskitytäänkin ensisijaisesti sen keilauksen tarkkuuteen. Keilausdatan ensisijainen käyttökohde on maanpintamallin täydentäminen.

## 2 Laserkeilainten historiaa

Laser keksittiin 1960-luvun alkupuolella. Ensimmäiset laseriin perustuvat etäisyysmittarit otettiin käyttöön vielä saman vuosikymmenen aikana. Lentokoneissa laseriin perustuvia korkeusmittareita testattiin jo 1965. Jatkuvasti suoritettua lentokorkeuksien mittausta pystyttiin muodostamaan maaston korkeusleikkaus eli profiili. Laserprofilointiin tarkoitettujen laitteiden kehitys jatkui tasaisena 1970- ja 1980-luvuilla. Seuraava tekninen edistysaskel otettiin vasta 1990-luvun alussa, kun toimiva keilausmekanismi saatiin kehitettyä. Laserkeilaus ja sen tarkkuus on sittemmin kehittynyt hurjaa vauhtia [Shan & Toth 2008: 2–3.]

Ensimmäiset full-waveform-keilaimet suunniteltiin 1980-luvulla veden syvyyden mittauksiin, mutta käyttöön ensimmäinen laite tuli vasta 1999. Ensimmäinen kaupallinen full-waveform-ilmalaserkeilauslaitteisto otettiin käyttöön 2004 [Chauve ym. 2007: 1.]

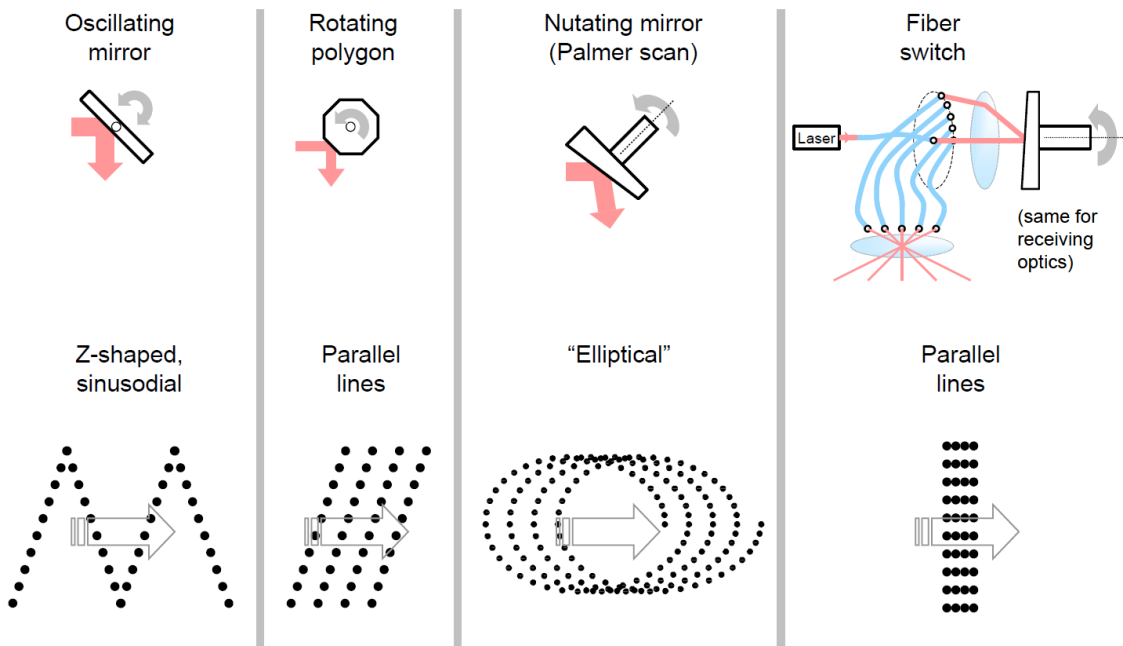
### 3 Laserkeilainten toiminta

Laserkeilaus on kaukokartoituksen menetelmä, joka perustuu LIDAR-tekniikkaan. LIDAR (Light detection and ranging) tarkoittaa menetelmää, jossa mitataan kohteen etäisyys siitä heijastuvan valon avulla. Laserkeilaus on aktiivinen tekniikka, sillä käytettävä laitteisto sisältää säteilylähteen eikä ole riippuvainen ulkoisista säteilylähteistä kuten auringosta.

Suurin osa laserkeilaimista käyttää lasereita, jotka toimivat lähi-infrapunataajuuksilla (1 064–1 550 nm). Lähi-infrataajuudet eivät ole haitallisia silmälle, ja myös auringon aiheuttama häiriö on vähäistä kyseisellä taajuudella. Lähi-infrapunalasereiden heikoin puoli on niiden huono vedenläpäisykyky, ja siksi vedenalaisten kohteiden keilauksissa käytetään paremmin vettä läpäiseviä vihreän aallonpituuden lasereita. [Werner 2008: 6.]

Laseretäisyysmittari muuttuu laserkeilaimeksi, kun siihen lisätään kääntyvä peili tai prisma, jonka avulla mittaustuloksia saadaan useammasta kuin yhdestä suunnasta [Shan & Toth 2008: 7.] Keilaus voi perustua pystysuunnassa kääntyvään peiliin tai peilipariin, monikulmaiseen pyörivään peiliin, vinottain pyörivään peiliin tai optisiin kuituihin. Käytetty keilausmenetelmä vaikuttaa syntyvään keilauskuvioon (kuva 1). Laserkeilaimen näkökentän leveyttä kutsutaan keilauskulmaksi ja useimmissa laitteissa sitä voidaan muuttaa käyttötarpeen mukaan.

Useimpien keilainten toiminta perustuu lyhyitä muutaman nanosekuntia pitkien laserpulssien lähettämiseen kohteeseen suurella taajuudella. Takaisin kimpoavista heijastuksista voidaan sitten määrittää kulku-aika kullekin pulssille. Kun keilain tallentaa laserpulssista niin lähtösuunnan kuin etäisyydenkin, saadaan laserpisteelle kolmiulotteiset x- y- ja z-koordinaatit. Keilauksen lopputuloksena kohteesta saadaan kolmiulotteisten pisteiden muodostama ryvä, jota kutsutaan pistepilveksi. Pistepilvessä voi olla miljoonia tai jopa miljardeja pisteitä.



Kuva 1. Laserkeilausmenetelmät ja niiden muodostamat keilauskuviot [Brenner 2008: 10].

Laserkeilaimet voidaan jakaa etäisyydenmittaustapansa mukaan kahteen luokkaan, kolmiointiin tai valon kulkuajaka-arviointiin. Kolmiointiin perustuvassa keilaimessa lasersäde ammutaan kohteeseen tunnetussa kulmassa ja takaisinheijastus mitataan lähetykskohdasta erillään sijaitsevalla sensorilla. Kulma ja takaisinheijastumiskohta tuntemalla voidaan laskea etäisyys, jolta lasersäde on heijastunut. Koska kolmiointiin perustuvan keilaimen tarkkuus laskee huomattavasti mittausetäisyyden kasvaessa, käytetään tätä tekniikkaa vain lyhyen matkan keilaimissa. [Vosselman & Maas 2010: 8–10.]

Kulkuajaka mittaava keilain voi perustua jatkuvan lasersäteen vaihe-ero mittaukseen tai yksittäisen pulssin kulkuajan mittaamiseen. Kulkuajasta voidaan laskea etäisyys, jolla kohde sijaitsee. Vaihe-erokeilaimissa verrataan lähetetyn ja vastaanotetun siniaal-tomuotoisen lasersäteen vaihe-eroa. Takaisin palaava säde on eri tahdissa kuin lähetetty ja tästä muutoksesta voidaan arvioida säteen kulkuajaka [Shan & Toth 2008: 5.] Vaihe-eroon perustuvilla laitteilla saavutetaan yleensä hyvin suuri keilausnopeus, mutta alle sataan metriin yltävä keilausetaisyys rajoittaa niiden käytön maanpäälliseen keilaukseen. Ilmalaserkeilauksessa käytetään yleisimmin keilaimia, jotka perustuvat yksittäisten laserpulsien kulkuajan mittaukseen, koska muut menetelmät eivät tarjoa riittävän pitkää keilausetaisyyttä.

Vanhanmalliset keilaimet pystyivät lähettämään ja vastaanottamaan vain yhtä laserpulsssia kerrallaan. Pulssin toistotaajuuksien kasvaessa ongelmaksi alkoi muodostua pulssin odotteluun kuluva aika, sillä nykyaikaiset laserkeilaimet pystyvät lähettämään ja mittaamaan satojatuhansia pulsseja sekunnissa. Pulssien toistotaajuudella (pulse repetition frequency) ja mittausetäisyydellä on yhteinen maksimi, jonka sanelee valonnopeus.

Maksimi pulssin toistotaajuus  $f_{\max}$  voidaan laskea kaavalla

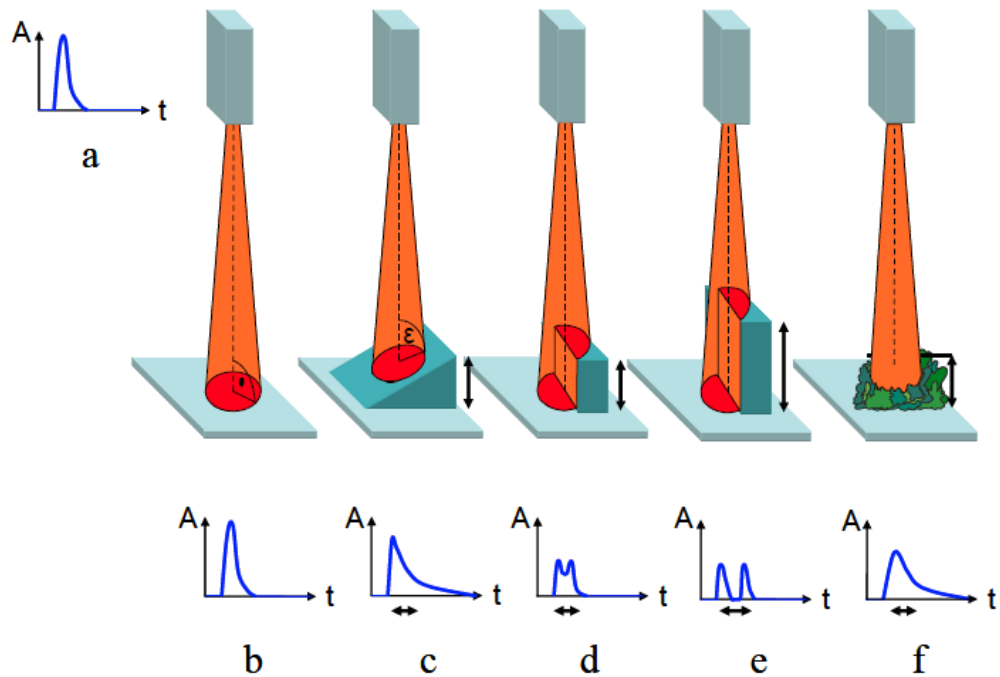
$$f_{\max} = \frac{c}{2R},$$

jossa  $c$  on valonnopeus ja  $R$  on mittausetäisyys, yksinkertaistaen lentokorkeus [Brenner 2008: 8.]

Modernit keilaimet pystyvät käsittelemään useampaa yhtäaikaista pulssia ilmassa, mikä mahdollistaa suurempien taajuuksien ja sitä myöten suurempien pistetiheyksien mittaamisen samoilta lentokorkeuksilta [Vosselman & Maas 2010: 27].

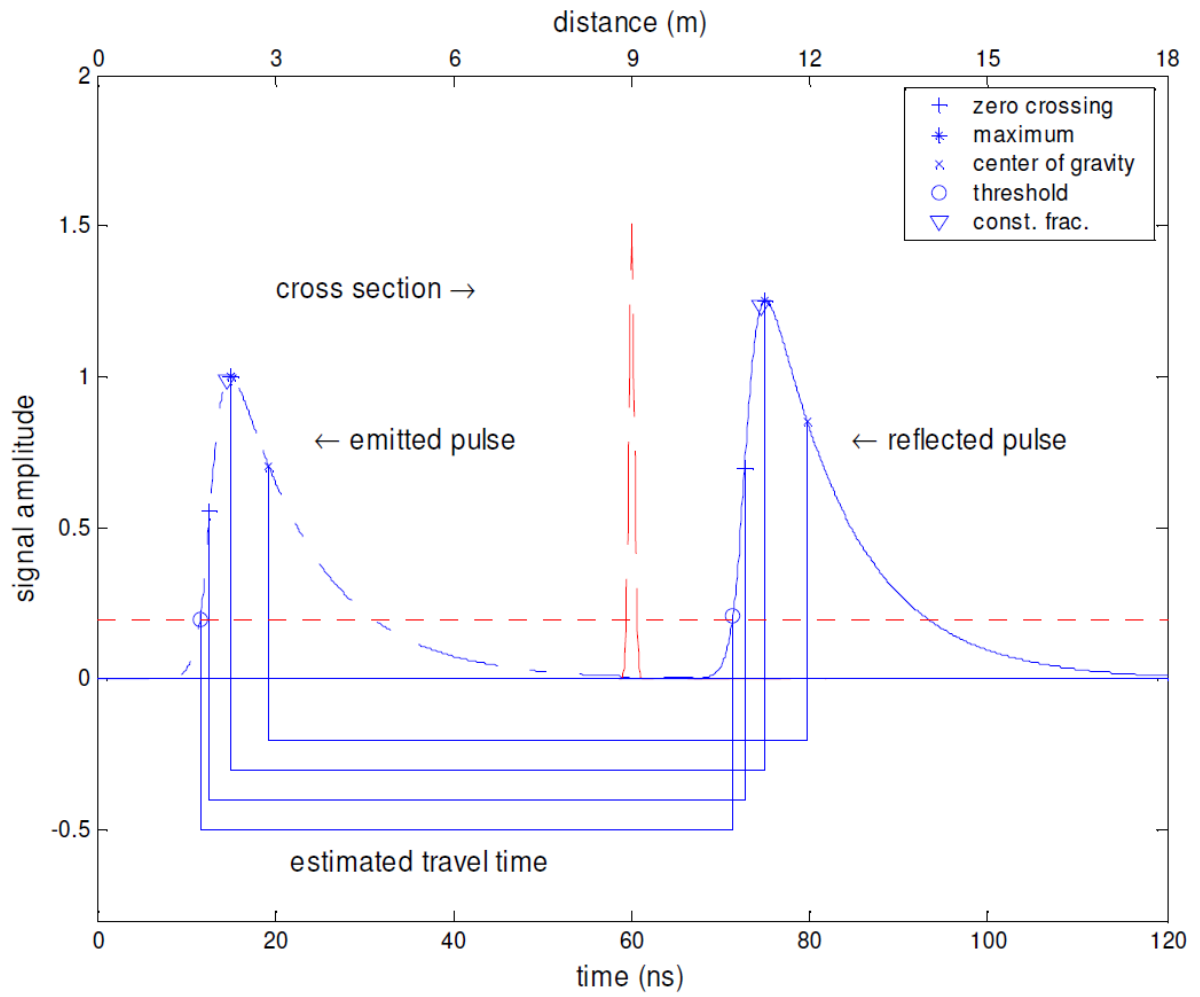
Lasersäteen hajaantumisesta johtuen jokaisesta lähetetystä pulssista voidaan vastaanottaa useampi paluupulssi (luku 5.1 Laserjalanjälki). Ilmalaserkeilauslaitteistot tallentavat vähintään ensimmäisen ja viimeisen pulssi, mutta useimmiten paluupulsseja voidaan tallentaa 4–5 kpl jokaista lähetettyä pulssia kohden. [Vosselman & Maas 2010: 3].

Keilaimet voivat tyypistä riippuen tallentaa paluusignaalin joko yksittäisenä pulssina (discrete echo) tai täydessä aaltomuodossa (full-waveform). Täyden aaltomuodon tallennus mahdollistaa paluupulssien tulkinnan jälkikäteen, sillä pulssin muoto pyritään tallentamaan yksittäisen etäisyysmittauksen sijasta. Paluupulssin muodosta voidaan arvioida esimerkiksi kohteen tasaisuutta ja kulmaa, jossa pulssi on osunut kohteeseen (kuva 2).



Kuva 2. Keilattavan kohteen vaikutus paluupulssin muotoon [Jutzi ym. 2006: 2].

Yksi pulssin lentoaikaa mittaavien keilainten tarkkuuteen vaikuttava tekijä on laitteen tapa mitata pulssin lentoaika. Aikaeromittaus suoritetaan lähtevän ja saapuvan pulssin välillä ennalta määrätystä pulssin kohdasta (kuva 3). Koska paluupulssin muoto poikkeaa lähetetystä, vaikuttaa mittauskohdan valinta kulkuajan mittaukseen. Yksi menetelmä valita mittauskohta on asettaa kynnyisarvo (threshold), jonka ylittävä pulssin kohta rekisteröidään. Muita menetelmiä ovat mm. paikallisen huippukohdan (local maxima), pulssin keskikohdan (centre of gravity) tai toisen derivaatan nollakohtien hyödyntäminen (zero-crossing). Jokaisella käytettävällä menetelmällä on heikkoutensa ja vahvuutensa, eikä yksikään menetelmä tuota virheetöntä tulosta. Tutkimuksissa on huomattu, että pulssin tulkintatapa vaikuttaa kohteen etäisyyden mittaamiseen jopa 40 % laserjalanjäljen halkaisijasta, kun pinta on 45 asteen kulmassa keilaimeen nähden [Wagner ym. 2004: 3–6.] Hyvänä kompromissina pidetään constant fraction -menetelmää, joka tuottaa havainnon pulssin amplitudin ylittäessä tiettyyn osuuteen maksimi arvostaan [Vosselman & Maas 2010: 5].



Kuva 3. Pulssin lentoajan määrittämiseksi käytettävät mittaustavat saattavat paluupulssin muodosta riippuen antaa eriäviä tuloksia [Wagner ym. 2004: 4].

## **4 Ilmasta suoritetun laserkeilauksen hyödyt ja rajoitukset**

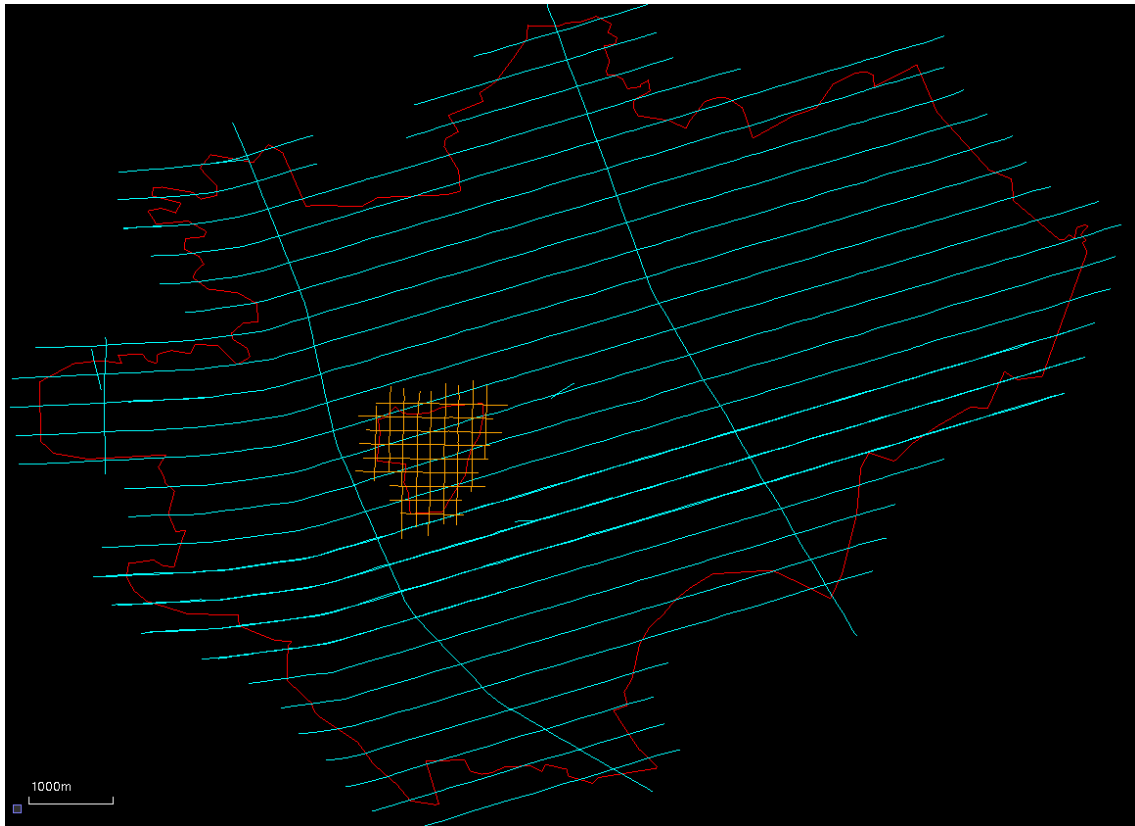
Ilmasta suoritetun laserkeilauksen suurin hyöty on sen tuottama suuri mittaustulosten määrä. Keilaus on myös nopea suorittaa ja vaadittavia maastotöitä on vähän, jos lainkaan. Ilmalaserkeilauksen tarkkuus on vertailukelpoinen muiden kartoitusmenetelmien kanssa ja mittaustuloksia saadaan myös kasvillisuuden peittämiltä alueilta [Vosselman & Maas 2010: 35.]

Suurimmat ilmalaserkeilauksen rajoitukset liittyvät keilausajankohtaan ja säähän. Vaikka laserkeilauksella on hyvä kasvillisuudenläpäisykyky, on keilaus paras suorittaa sellaisena vuoden aikana, jolloin puissa ei ole lehtiä. Käytettävien lasereiden huonon vedenläpäisykyvyn vuoksi myös pilvet ja sumu haittaavat keilausta. Märkien pintojen aiheuttamat kokonaisheijastukset voivat lisäksi johtaa aukkoihin keilauksessa [Vosselman & Maas 2010: 35.]

## **5 Keilauksen suunnittelu**

Keilauskulman valinta suoritetaan projektin tarpeiden mukaan. Rahansäästösyistä kulmaksi valitaan yleensä suurin mahdollinen, jolla projektin vaatimukset saadaan täytettyä. Leveä keilauskulma aiheuttaa keilausalueen reunoille varjoja, joten tiheää kasvillisuutta tai rakennuksia sisältävällä alueella kannattaa käyttää pienempää keilauskulmaa [Vosselman & Maas 2010: 30].

Lentosuunnitelmassa täytyy ottaa huomioon IMU-järjestelmän määrittelemä yhtäjaksoisen lentolinjan maksimipituus. Lentonopeudesta riippuen lentolinjan maksimipituus on esim. 30–40 km. Lentolinjojen suhteen vastakkaiset poikkileikkauslinjat auttavat lentolinjojen sisäisen tarkkuuden määrittämisessä. Yleisesti lentolinjat limittyvät noin 20 %, jotta voidaan välttää aukkojen muodostumista ja kompensoida mahdollisia lennon aikana ilmaantuneita lentolinjalla pysymisvaikeuksia. Varsinaisten lentolinjojen suuntaan poikittain lennetyillä linjoilla voidaan valvoa yhdistettyjen keilauslinjojen sisäistä tarkkuutta [Vosselman & Maas 2010: 30]. Raumalla suoritetun keilauksen toteutuneet lentolinjat on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Rauman keilauksen lentolinjat.

## 6 Virhelähteitä

Ilmasta suoritetun laserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm.

- satelliittipaikannuksen tarkkuus
- IMU-järjestelmän tarkkuus (kulkuvälineen kallistus, kierto, nopeus jne.)
- sää, tuuli, näkyvyys
- mitattavien kohteiden heijastuskyky
- laserpulssin jalanjäljen koko (miltä alalta pulssi heijastuu takaisin)
- keilauskulma (vaikuttaa jalanjäljen muotoon ja muodostuviin katvealueisiin)
- laserkeilain.

## 6.1 Laserjalanjälki

Vaikka lasersäde keilaimesta lähtiessään on pistemäinen, alkaa se edetessään hajaantua. Hajaantumista tapahtuu sitä enemmän, mitä pidempi mittausetäisyys on. Valon hajaantumista kutsutaan divergenssiksi ja sen voimakkuus ilmoitetaan kulman arvona. Ilmalaserkeilaimissa divergenssi on yleensä välillä 0,1–1 mrad. Laajentunutta mittauskohteeseen osuvaa laserpistettä kutsutaan laserjalanjäljeksi.

Laserjalanjäljen suuruudelle voidaan laskea arvio käyttäen yhtälöä

$$D = 2h \tan \left( \frac{\gamma}{2} \right)$$

jossa  $D$  on jalanjäljen halkaisija (m),  $h$  on lentokorkeus (m) ja  $\gamma$  on lasersäteen divergenssi (mrad). [Vosselman & Maas. 2010. s. 26].

Koska laserkeilain tallentaa lähettämänsä lasersäteen pistemäisenä, tallentuvat mitatut paluupulssit laserjalanjäljen keskikohtaan. Kohteen oikea sijainti voi todellisuudessa olla missä tahansa laserjalanjäljen alueella [Schaer ym. 2007: 3]. Maksimivirhe, jonka laserjalanjäljen koosta voi aiheutua pisteen XY-tarkkuuteen, on puolet jalanjäljen halkaisijasta. Keskimääräinen virhe on neljäsosa jalanjäljen halkaisijasta [Vosselman & Maas 2010: 104]. Huomioitavaa on myös se, että kohteen XY-tarkkuuteen tulevat virheet kasvattavat myös kohteen Z-tarkkuutta, mikäli kohteen pinta on kalteva.

## 6.2 Keilauskulma

Suoraa ylhäältäpäin tarkasteltuna maanpinnan kohteet, kuten rakennukset ja puut, luovat allensa keilausvarjon. Varjon suuruus kasvaa merkittävästi keilauskulmaa levennettäessä, ja tutkimuksissa on todettu, että jo 5 asteen keilauskulma kasvattaa kasvillisuuden aiheuttamaa varjostusta merkittävästi [Ahokas 2013: 24]. Myöhemmissä tutkimuksissa kuitenkin voitiin osoittaa, että keilauskulma vaikuttaa kasvillisuuden läpäisyyn vain vähän suhteessa kasvillisuuden määrään [Ahokas 2013: 31]. Keilauskulman kaventaminen kasvillisuudesta aiheutuvien varjojen vuoksi ei useimmissa tapauksissa ole tarpeellista.

Keilauskulmalla on todettu olevan vaikutusta keilauksen korkeustarkkuuteen [Ahokas 2013: 24]. Tämä johtuu siitä, että keilauskulma vaikuttaa laserjalanjäljen muotoon. Kun lasersäde osuu pintaan vinosti, muodostuu laserjalanjäljestä ellipsi. Mitä suurempi kulma säteen ja keilauspinnan välillä on, sitä pitkulaisempi ellipsistä muodostuu. Koska laserjalanjäljen koolla on vaikutusta kohteen horisontaaliseen tarkkuuteen, tarkoittaa jalanjäljen venyminen tarkkuuden huonontumista entisestään.

Keilausgeometriasta johtuvan virheen huomioimiseksi on esitetty ajatus pistekohtaisesta laatumerkinnästä [Schaer ym. 2007]. Laatumerkintä perustuisi laserjalanjäljen muodosta päätelyyn tarkkuuteen. Parhaimman arvosanan saisivat tasaisen alueen pisteet, jotka sijaitisivat kohtisuorassa keilaussuuntaan nähden. Epätasaisella pinnalla ja vinosti keilaussuuntaan nähden olevat pisteet saisivat huonoimman arvosanan. Laatumerkintää voitaisiin hyödyntää käytettävien pisteiden valitsemiseen, esimerkiksi keilauslinjojen risteyskohdissa, tilanteissa, joissa toisen keilauslinjan pisteiden geometria on selvästi toista parempi. Ehdotetun kaltaista laatumerkintää ei tietääkseni ole otettu käyttöön.

### 6.3 Kohteiden heijastuskyky

Keilattavan kohteen heijastuskyky vaikuttaa keilaustulokseen (taulukko 1). Materiaalista riippuen heijastus voi olla joko peilimäistä heijastusta, hajaheijastavaa heijastusta (Lambertian reflection) tai niiden sekoitusta. Materiaalin heijastuskyky vaihtelee melkein nollasta (musta kumi, hiilipöly) melkein sataan (lumi) [Vosselman & Maas 2010: 14–15.]

Taulukko 1. Materiaalien heijastusarvoja [Brenner 2008: 17].

MATERIAL	REFLECTIVITY @ $\lambda = 900 \text{ nm}$
Dimension lumber (pine, clean, dry)	94%
Snow	80-90%
White masonry	85%
Limestone, clay	up to 75%
Deciduous trees	typ. 60%
Coniferous trees	typ. 30%
Carbonate sand (dry)	57%
Carbonate sand (wet)	41%
Beach sands, bare areas in desert	typ. 50%
Rough wood pallet (clean)	25%
Concrete, smooth	24%
Asphalt with pebbles	17%
Lava	8%
Black rubber tire wall	2%

Huonosti heijastavasta kohteesta ei välttämättä rekisteröidä paluusignaalia lainkaan. Todella heijastuskykyisestä kohteesta saattaa syntyä peiliheijastus, jolloin etenkin vinosta pinnasta pulssi saattaa vaihtaa suuntaa ilman, että siitä heijastuu mitään takaisin päin. Peiliheijastunut pulssi saattaa kulkeutua mittauslaitteelle myös kiertotietä, minkä johdosta mittaukseen saattaa syntyä virhemittauksia eli artefakteja.

Huonosti heijastavasta pinnasta palaavalla kaiulla on pienempi amplitudi kuin hyvin heijastavasta pinnasta. Tästä syystä aikaeroon perustuvat keilaimet saattavat antaa huonosti heijastavalle kohteelle pidemmän etäisyyden kuin hyvin heijastavalle. Tämä voi näkyä esim. valkoisten tieviivojen ”leijumisena” mustan asfaltin yläpuolella, mikäli tarvittavia korjauksia ei tehdä [Vosselman & Maas 2010: 15.] Edistyneet keilaimet tallentavat myös laserpulssin heijastumisen voimakkuuden, mitä voidaan hyödyntää tulosten tulkinnassa ja heijastuseroista johtuvien etäisyserojen tasaamisessa.

#### 6.4 Satelliittipaikannus- ja IMU-järjestelmä

GPS-, GLONASS- ja Galileo-satelliittipaikannusjärjestelmien yhteiskäytöllä voidaan saavuttaa jopa alle 5 m paikannustarkkuus [Hofmann-Wellenhof ym. 2008: 432]. Jotta

satelliittipaikannuksella voidaan saavuttaa mittausteknisesti hyväksyttävä tarkkuus, täytyy käyttää tekniikkaa, josta käytetään nimeä differential GPS (DGPS). DGPS:n toiminta perustuu useamman yhtäaikaisen satelliittipaikantimen yhtäaikaiseen käyttöön. Yksi vastaanotin toimii paikallaanpysyvänä tukiasemana tunnetussa sijainnissa. Tukiaseman avulla voidaan reaaliajassa laskea toiselle vastaanottimelle etäisyyskorjaus, mikä parantaa mittaustarkkuutta [Hofmann-Wellenhof ym. 2008: 169.] DGPS:llä saavutetaan senttimetriluokan tarkkuus.

GPS-laitteistoissa käytetään kaksitaajuusantenneja, joilla satelliitin signaali saadaan vastaanotettua kahdella eri taajuudella samanaikaisesti. Kahden eri taajuuden yhtäaikainen käyttäminen mahdollistaa ilmakehän aiheuttaman viiveen poistamisen, mikä parantaa mittaustarkkuutta. Jotkin nykyaikaiset laitteistot voivat tallentaa GPS-signaalia jopa 100 Hz:n taajuudella, joskin 10 Hz on huomattavasti yleisempi tallennustiheys [Cracknell & Hayes 2007: 96–97.]

Jos GPS mittaa sijainnin 10 Hz:n taajuudella tarkoittaa tämä, että 70 m/s kulkevan lentokoneen sijainti tiedetään 7 m:n välein. IMU-järjestelmän tarkoituksena on paikata syntyviä ”aukkoja” lentokoneen sijainnin määrittelyssä. Järjestelmän toiminta perustuu useisiin kiihtyvyyssantureihin ja gyroskooppeihin, joiden avulla lentokoneen suunnan muutokset voidaan havaita erittäin tarkasti.

IMU-laitteisto tallentaa tyypillisesti kiihtyvyy- ja kallistustiedot 200 Hz:n taajuudella. GPS ja IMU yhdessä mahdollistavat lentolinjan sijainnin tuntemisen alle 10 cm:n tarkkuudella [Vosselman & Maas 2010: 23.]

IMU-systeemi kärsii kuitenkin jatkuvasti kasvavasta systemaattisesta virheestä (systematic drift effect), minkä johdosta IMU-dataa ei voi hyödyntää pitkää aikaa ilman että sen tarkkuus huonontuu liiaksi. Virheen vaikutukset poistetaan päivittämällä IMUn sijaintitiedot GPS:n sijaintitiedoilla [Vosselman & Maas 2010: 24].

Koska keilaus halutaan pitää tasaisena ja aukottomana, pyritään lennon aikana välttämään turhaa kääntymistä. Tasainen eteneminen saa kuitenkin aikaan sen, että IMU-järjestelmän gyroskoopit voivat ”nukahtaa”, mikäli niitä ei ”tönäistä” pitkään aikaan. IMU-järjestelmästä riippuen nukahtamisaika on esim. 10 min. Lentosuunnitelmat täytyy suunnitella niin, että IMU-järjestelmän herättäminen (esim. lentolinjan vaihto) tapahtuu ennen kuin gyroskoopin ”nukahtamisaika” tulee täyteen [Vosselman & Maas 2010: 25].

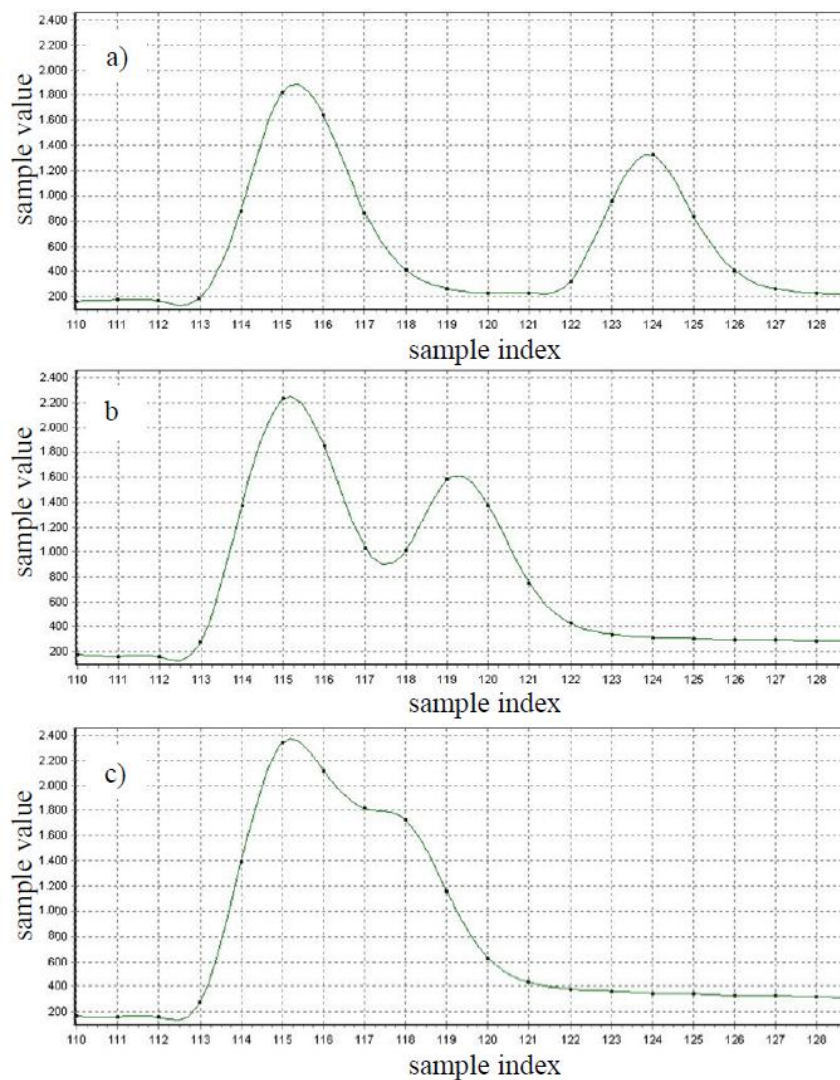
## 6.5 Laserkeilain

Pulssilaserkeilaimen etäisyydenmittaustarkkuus riippuu laitteen kyvystä mitata lähetetyn ja palaavan laserpulssin kulkuaikaa. Nykyisillä laitteilla mittaustarkkuus on muutamia senttimetrien verran hyvissä olosuhteissa. Alle senttimetrin tarkkuuteen pystytään tällä hetkellä vain CW-keilaimilla [Vosselman & Maas 2010: 103.]

Muut keilaimen tarkkuuteen vaikuttavat tekijät ovat kulmaresoluutio eli kulmaerotuskyky, ja kulmatarkkuus. Kulmaresoluutio määrittää, kuinka tarkasti kahden vierekkäisen lasersäteiden välinen kulma tiedetään. Kulmatarkkuus kertoo, kuinka tarkasti lasersäteiden lähtösuunta tiedetään. Kulmatarkkuus vaikuttaa sekä etäisyys- että pisteensijaintivirheeseen [Kukko 2005: 11–12.] Keilainten kulmaresoluutio on parhaimmillaan luokkaa  $0,001^\circ$  ja kulmatarkkuus välillä  $0,0024\text{--}0,01^\circ$  [Vosselman & Maas 2010: 104].

Koska jokaisesta lähtevästä pulssista voidaan tallentaa useampi paluusignaali, on laitteen kyky erottaa vastaanotettavat pulssit toisistaan tärkeässä roolissa. Laitteen kykyä erottaa lähekkäin olevia kohteita toisistaan kutsutaan nimellä multi-target resolution (MTR). Tarkkuutta rajoittavina tekijöinä toimivat laitteen lähettämän pulssin leveys sekä tallennusnopeus [Ullrich & Pfennigbauer 2011: 3]. Aallon muotoa tallentavissa vastaanottimissa tallennustiheys eli digitalisointi-intervalli on yleensä 0,5 ns. [Vosselman & Maas 2010: 29]. Kaksi vastaanotettua pulssia voidaan erottaa toisistaan vain, jos niiden välinen etäisyys on suurempi kuin puolet lähetetyt pulssin pituudesta. Tämä tarkoittaisi 5 ns pitkällä pulssilla, että laitteisto pystyisi erottelemaan vain kohteet, jotka ovat yli 0,75 m:n etäisyydellä toisistaan [Vosselman & Maas 2010: 4.]

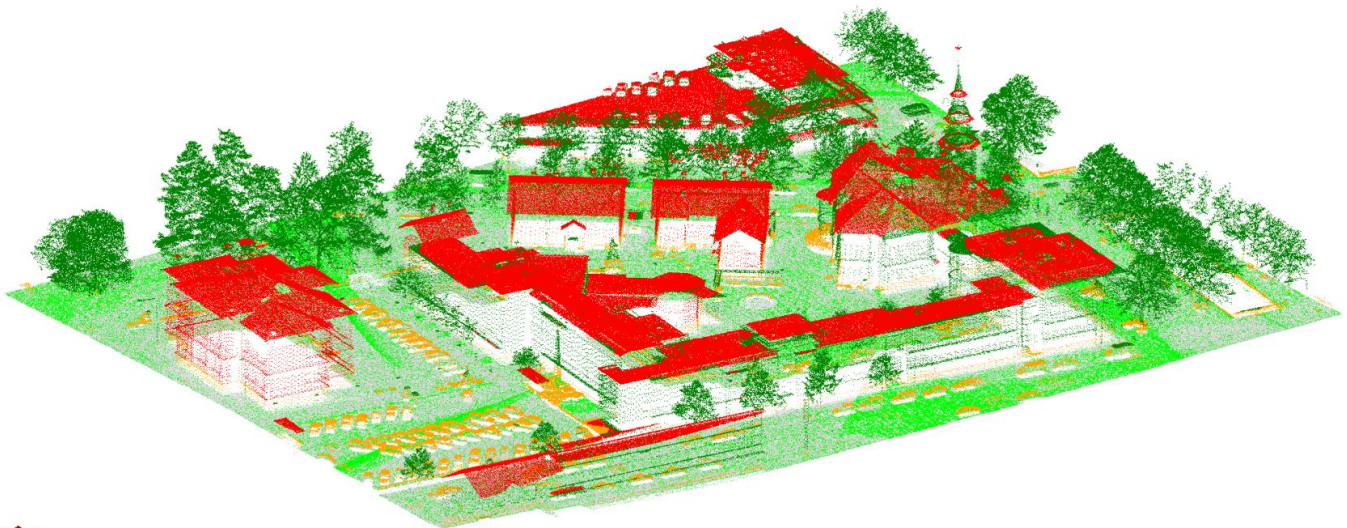
Kuvassa 5 on esitetty esimerkki kahdesta noin 4 ns leveän paluupulssin tulkinasta. Kohdassa a pulssit ovat erillään, sillä niiden välinen etäisyys on pulssin pituuden luokkaa. Tilanteessa b pulssit ovat sulautuneet yhteen, sillä pulssien välinen etäisyys on enää puolet pulssin pituudesta. Pulssien huippukohdat ovat kuitenkin erotettavissa ja siten pulssit voidaan havaita erillisiksi kohteiksi. Kohdassa c pulssien välinen etäisyys on jo niin pieni, että paluupulssseja on mahdotonta tulkita kahdeksi erilliseksi pulssiksi. Mustat pisteet edustavat kuvassa keilaimen tallentamia paluupulssin arvoja, joiden perusteella vihreällä piirretty pulssi on jälkikäteen rekonstruoitu.



Kuva 5. Pulssin pituuden ja tallennustiheyden merkitys tulkittavuuteen [Ullrich & Pfennigbauer 2011: 4].

## 7 Pisteiden luokittelu

Kun laserkeilaus on suoritettu ja pistepilvelle on tehty jälkilaskentana suoritettavat sijaintikorjaukset sekä keilauslinjojen yhdistäminen, jaetaan pisteet luokkiin. Luokittelun tarkoituksena on tuoda selkoa keilauksessa syntyneeseen valtavaan pistejoukkoon. Tärkeimmät luokittelun luokat ovat maanpinta, rakennukset sekä kasvillisuus. Luokkien määrää rajoittaa lähinnä käytettävissä olevat luokittelutekniikat. Suurista datamääristä johtuen pistepilven luokittelussa käytetään aina jonkinlaisia automatisoituja luokittelutyökaluja. Automaattisella luokittelulla pistepilviaineisto luokitellaan käyttäen matemaattisia malleja. Mallit ratkaisevat pisteen luokan, pisteiden korkeuden, intensiteetit, keskinäisen sijainnin tai muodostuvien kolmiulotteisten kappaleiden mukaan. Automaattinen luokittelu ei takaa virheetöntä lopputulosta, mutta useimmissa tapauksissa sillä löytyy kohtuullisella tarkkuudella ainakin maanpinta, rakennuksien kattopinnat sekä räikeimmät virheet. Pisteet joilla ei ole omaa luokkaa, luokituvat virheellisesti johonkin muuhun ryhmään, mikäli niitä ei poisteta. Näin on kuvassa 6 käynyt autoille ja kaikille taloja matalammille rakenteille, jotka on luokiteltu matalaksi kasvillisuudeksi. Kuvan tilanteessa myös iso osa talojen seinistä on luokiteltu korkeaksi kasvillisuudeksi.



Kuva 6. Näyte Rauman keskustan automaattiluokittelusta.

## 8 Keilaus Raumalla

Rauman kaupungille tilattiin Blom Kartta Oy:n suorittama ilmalaserkeilaus. Keilaus suoritettiin toukokuussa 2013, ja se käsitti kaupungin taajama-alueen. Kaupungin keskusta ja sen tuntumassa sijaitseva historiallisesti merkittävä puutaloalue vanha Rauma keilattiin erikseen. Laserkeilausmateriaalin ensisijainen käyttötarkoitus on maanpintamallin muodostaminen. Maanpintamallia tullaan käyttämään pohjakartan täydentämiseen sekä kaavoitus- ja tiesuunnitteluun.

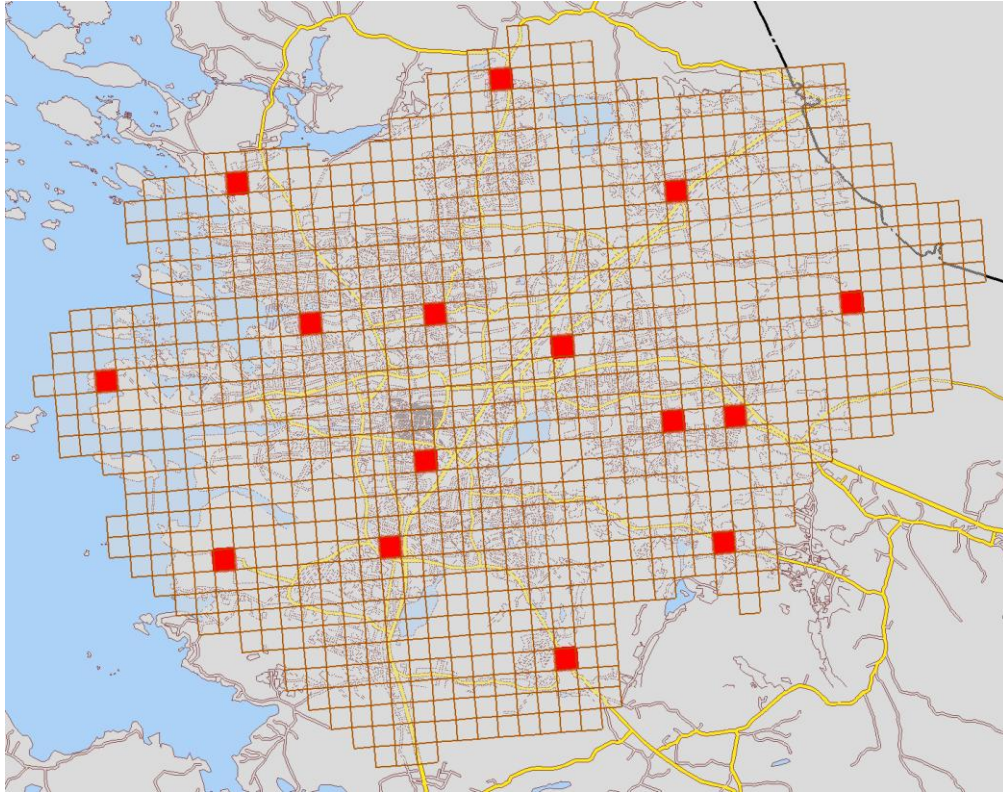
Keskustan keilausalue oli kooltaan noin 110 ha ja taajaman noin 6 100 ha. Keskustan keilausalueen lopulliseksi pistetiheydeksi tuli 91 pistettä neliölle kokonaispistemäärän ollessa 97,7 miljoonaa. Taajaman alueelle pistetiheys oli 26 pistettä neliölle ja pisteitä reilut 16 miljardia. Maanpinnaksi luokiteltuja pisteitä taajama-alueella oli yhteensä reilut 890 miljoonaa. Maanpintapisteiksi luokiteltujen pisteiden tiheydeksi muodostui noin 8,96 pistettä neliölle.

Keilausmateriaali toimitettiin luokiteltuna LAS-aineistona. Aineisto muodostui 300 m x 300 m:n ruuduista, joita taajaman keilausalue sisälsi noin tuhat kappaletta. Keskustan keilausalue muodostui 48 ruudusta. Taajaman ja keskustan keilausalueiden ruutujako ja numerointi on sama, mikä helpottaa aineistojen yhteiskäyttöä.

### 8.1 Vertailumittaukset

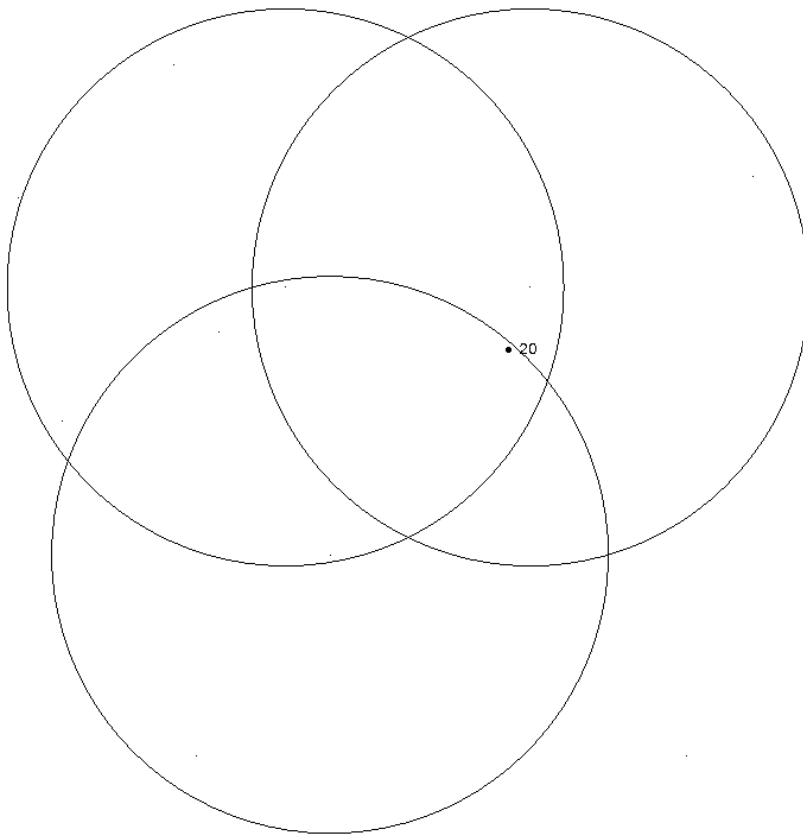
Koska laserkeilaus suoritettiin keväällä, haluttiin mahdollinen maanpinnan korkeusvaihtelu poistaa mittaustuloksista suorittamalla vertailumittauksia samaan aikaan keilausalueen kanssa. Mittaukset suoritettiin noin viikkoa ennen keilausta. Vertailumittauksissa mitatut vertailupisteet muodostuivat takymetrillä asfalttipinnoille mitatuista korkeuspisteistä. Takymetri asetoitettiin hyödyntäen kaupungin kiintopisteverkkoa. Kaupungin kiintopisteverkon korkeudet on mitattu takymetrillä vaaitsemalla, hyviä mittaustapoja noudattaen ja niitä on yleisesti pidetty luotettavina. Vuonna 2012 tehdyllä korkeusjärjestelmän muutoksella oli keskimäärin 1,3 mm:n vaikutus pisteiden korkeustarkkuuteen. Tämän työn yhteydessä kaupungin pisteiden korkeustarkkuutta ei ole varmistettu, eikä käytettyjen pisteiden tarkkuudesta ole siksi täyttä varmuutta. Kiintopisteiden tarkkuus kuitenkin arvioitiin riittäväksi korkeusvertailun suorittamiseksi. Jokaiselta vertailualueelta mitattiin 10–18 korkeuspistettä. Mittauksista kaksi suoritettiin mahdollisimman kalte-

valle asfalttipinnalle ja muut on mitattu mahdollisimman vaakatasoisille pinnoille. Kaltevat pinnat valittiin mukaan, jotta voitaisiin arvioida vinojen pintojen vaikutusta keilaukseen. Vertailumittaukset pyrittiin mahdollisuuksien mukaan tekemään tasaisesti ympäri keilausaluetta. Vertailupisteitä mitattiin yhteensä 225, viideltätoista eri alueelta (Kuva 7.)



Kuva 7. Rauman keilausalue. Vertailumittauksien suorituspaikat on merkitty punaisella.

Koska vertailupisteet mitattiin ennen suoritettua keilausta, eivät keilauspisteet sijaitse täysin samalla kohdalla vertailupisteiden kanssa. Lisäksi pistemäistä korkeusmittaustulosta piti verrata noin 25 cm halkaisijaltaan olevaan laserjalanjälkeen. Käytännössä näin suuren laserjalanjäljen tarkka mittaaminen ei ole mahdollista, sillä ei voida olla varmoja, mistä kohtaa jalanjälkeä paluupulssi on heijastunut. Päädyin vertaamaan mittaamiani pisteitä keilauspisteiden korkeuksien keskiarvoon. Keskiarvon laskemiseen valitsin kaikki keilauspisteet, joiden laserjalanjälki kulki tarkastusmittauspisteen yli (kuva 8). Taajaman keilauksen kohdalla tämä tarkoitti, että laskin jokaisen 25 cm:n etäisyydellä tarkastuspisteestä olleiden keilauspisteiden korkeuksien keskiarvot, joita sitten vertasin tarkastusmittauspisteiden korkeuksiin. 25 cm:n etäisyydellä vertailupisteestä sijaitsi paikasta riippuen 1–20 keilauspistettä.



Kuva 8. Korkeusvertailupiste 20 sekä siihen verrattujen keilauspisteiden jalanjälkien hahmotelmat.

Vertailumittausten tulos on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Vertailumittauksen tulokset.

MIN	-0,056
MAX	0,049
Keskihajonta	0,021
Mediaani	-0,008
Keskiarvo	-0,009

Koska tarkastusmittausten vertailupisteiden asemoinnissa käytettävien kiintopisteiden tarkkuudesta ei ole täyttä varmuutta, täytyy mittaustulosta ajatella laserkeilauksen ja kiintopisteverkon korkeuserona. Tuloksista voidaan päätellä, että taajama-alueen laserkeilaus on onnistunut varsin hyvin, vaikka hajontaa onkin muutaman sentin verran. Vinoilta pinnoilla saadut mittaustulokset eivät eronneet muista mittaustuloksista. Keilausgeometria oli ilmeisesti vinojen pintojenkin kohdalla sen verran hyvä, että havaittavaa eroa ei syntynyt.

Koska kaupungin keskusta-alueelta on kahden erillisen keilauksen johdosta saatavilla kaksi eri pistepilviaineistoa, päätin suorittaa aineistojen keskinäisen vertailun. Pintojen vertailuun käytin Tekla Civil -ohjelman pintojenvisualisointityökalua. Työkalulla pystyy muodostamaan pintojen korkeuseroista visuaalisen kartan jossa korkeuserot on jaettu luokkiin, joita voi kuvata haluamallaan väreillä. Alueesta sai myös numeerisen analyysin, joka kertoi prosentteina pisteiden jakautumisen määriteltyihin luokkiin (liite 1). Päädyn tekemään vertailun muutamille tasaisille pinnoille 30 cm:n pisteresoluutiolla. Vertailualueet täytyi pitää pieninä, sillä vertailuoperaatio vaati tietokoneelta reilusti muistia. Alueiden keskinäisen vertailun tuloksista selvisi, että keskustan aineisto näyttäisi olevan keskimäärin 1,3 cm taajaman aineistoa matalammalla. Paikallista hajontaa on kuitenkin useita senttimetrejä, joten keilausaineistojen korkeuseroa ei voi kertoa tarkasti. Visuaalisessa esityksessä lentolinjojen väliset rajat ovat selvästi näkyvissä (liite 2).

## 8.2 Tarkkuusarvio Rauman keilauksessa

Keilaus suoritettiin käyttäen helikopteriin kiinnitettyä laserkeilauslaitteistoa. Laitteiston laserkeilain on RIEGL LMS-Q560 ja paikannusvälineenä POS-AV 510 GPS/IMU-järjestelmä. Keilain perustuu pyörivään monikulmiopeiliin, joka synnyttää tasaisen keilauskuvion. Laitteen maksimi keilauskulma on  $60^\circ$  ja maksimi keilausnopeus 240 000 Hz. Laserkeilaimen maksimitarkkuus on 20 mm, joka on valmistajan omissa testeissä esiintynyt standardipoikkeama 250 m:n testietäisyydellä [LMS-Q560 Data Sheet 2010].

Ilman parempaa tietoa joudun olettamaan, että laitteen tarkkuus huonontuu tasaisesti etäisyyden kasvaessa. 500 metrin korkeudelta suoritettussa taajaman keilauksessa laitteen tarkkuus olisi noin 40 mm. Vastaavasti 400 metrin korkeudesta suoritettussa keskustan keilauksessa tarkkuus olisi noin 32 mm.

Keilaimen lasersäteen divergenssi on  $\leq 0,5$  mrad, jolloin laserjalanjäljen koko on taajaman keilauksessa noin 25 cm ja keskustan keilauksessa noin 20 cm. Laserjalanjäljen koosta johtuva maksimivirhe on noin puolet jalanjäljen halkaisijasta. Virheen keskiarvo on neljäsosa jalanjäljen halkaisijasta.

Keilaimen tallennustiheys on 1 ns [Werner 2008: 8] ja lähetetyn pulssin leveys noin 4 ns [Ullrich ym. 2011: 3]. Tämä tarkoittaa, että laite ei pysty erottamaan toisistaan pa-luukaikuja, joiden keskinäinen etäisyys on pienempi kuin 60 cm.

Kulmanerotuskyky keilaimessa on  $0,001^\circ$  [LMS-Q560 Data Sheet 2010]. Laitteen kulmatarkkuutta ei ole ilmoitettu. Koska kulman epätarkkuudesta johtuvan virhe sisältyy ilmoitettuun laserkeilaimen tarkkuuteen, en arvioi kulmatarkkuudesta johtuvaa virhettä erikseen.

Laitteiston GPS-vastaanotin toimii 5 Hz:n taajuudella eli tallentaa sijainnin 0,2 s:n välein. POS-järjestelmän maksimi paikannusvirheen luvataan jälkilaskentana olevan alle 0,05 m horisontaalisesti ja alle 0,1 m vertikaalisesti [POS AV Specifications 2012.] Kuten ilmalaserkeilauksessa yleensä, myös Rauman keilauksessa paikannus on suoritettu jälkilaskentana.

Tarkkuusarvion yhteenveto on esitetty taulukossa 3. Laserkeilaimen tarkkuus on valmistajan ilmoittamasta tarkkuudesta laskettu arvio kullekin keilausetaisytydelle. Taulukoon sijoitettu laserjalanjäljen aiheuttama vertikaalivirhe on oletetun virheen keskiarvo. Jalanjäljen koosta aiheutuvan korkeusvirheen suuruus riippuu keilausgeometriasta sekä kohteen ominaisuuksista ja on siten hyvin vaikea arvioida. Keilaussuuntaan nähden kohtisuoralta pinnalta jalanjäljen koko ei aiheuta korkeusvirhettä.

Taulukko 3. Keilauksen oletettavissa oleva tarkkuus olosuhteissa, joissa keilausgeometria on hyvä.

	<b>Taajama</b>		<b>Keskusta</b>	
Lentokorkeus	500 m		400 m	
Laserjalanjäljen halkaisija	25 cm		20 cm	

<b>Virhelähde</b>	<b>X ja Y-virhe (m)</b>	<b>Z-virhe (m)</b>	<b>X ja Y-virhe (m)</b>	<b>Z-virhe (m)</b>
POS (GPS ja IMU)	<0,05	<0,1	<0,05	<0,1
Laserkeilain	0,04*	0,04*	0,032*	0,032*
Laserjalanjälki	0,0625	0**	0,05	0**
<b>Yhteensä</b>	<b>&lt;0,1525</b>	<b>&lt;0,14</b>	<b>&lt;0,132</b>	<b>&lt;0,132</b>

\* arvio

\*\* kohtisuora pinta

## 9 Yhteenveto

Suoritetut vertailumittaukset antavat kuvan, että laserkeilaus Raumalla on onnistunut varsin hyvin. Vertailumittauksien tulokset sopivat arvioituihin rajoihin korkeuden puolesta. Mittauksissa ei tarkasteltu keilauksen horisontaalista tarkkuutta. Keilausmateriaalin ensisijaisen käyttötarkoituksen eli maanpintamallin luomisen kannalta horisontaalisella tarkkuudella ei kuitenkaan ole suurta merkitystä.

Mikäli X- ja Y-tarkkuutta olisi pyritty selvittämään mittaamalla, olisi tuloksissa todennäköisesti aluekohtaista vaihtelua. Keilausgeometrialla ja laserjalanjäljen koolla on merkittävä vaikutus keilauksen horisontaaliseen tarkkuuteen. Koska keilausgeometria vaihtelee tapauskohtaisesti, on sen vaikutuksista vaikea antaa yleispätevää arviota.

## 10 Loppusanat

Tämän työn tekeminen on ollut ennen kaikkea suuri oppimistilaisuus. Allekirjoittaneen lähtötiedot ilmalaserkeilauksesta olivat vähäiset ja paljastuivat työn edetessä vielä vähäisemmiksi. Haluaisin kiittää Rauman kaupungin Vesa Posiota mahdollisuudesta tehdä insinöörityö varsin mielenkiintoisesta aiheesta.

## Lähteet

Ahokas Eero. 2013. Aspects of accuracy, scanning angle optimization, and intensity calibration related to nationwide laser scanning. Doctoral dissertation. Aalto University School of Engineering.

Brenner C. 2008. Aerial laser scanning. International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling", Aghios Nikolaos, Crete, Greece. Verkkodokumentti. University of Hannover. <[http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/sonstige\\_Beitraege/Brenner\\_tutorialSommerSchool2006.pdf](http://www.ikg.uni-hannover.de/fileadmin/ikg/staff/publications/sonstige_Beitraege/Brenner_tutorialSommerSchool2006.pdf)> 24.4.2006. Luettu 12.3.2014.

Chauve Adrien, Mallet Clément, Bretar Frédéric, Durrieu Sylvie, Deseilligny Marc Pierrot, Puech William. 2007. Processing full-waveform lidar data: modeling raw signals. Verkkodokumentti. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 36 (Part 3/W52)* <[http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/31/29/PDF/Chauve\\_2007\\_Laser\\_scanning.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/29/31/29/PDF/Chauve_2007_Laser_scanning.pdf)> 3.7.2007. Luettu 15.5.2014.

Cracknell Arthur P., Hayes Ladson. 2007. Introduction to remote sensing. Second edition. CRC Press

Hofmann-Wellenhof. Lichtenegger. Wasle. 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. SpringerWienNewYork.

Jutzi B., Stilla U. 2006. Precise range estimation on known surfaces by analysis of full-waveform laser. Verkkodokumentti. <[http://www.researchgate.net/publication/230642342\\_Precise\\_range\\_estimation\\_on\\_known\\_surfaces\\_by\\_analysis\\_of\\_fullwaveform\\_laser](http://www.researchgate.net/publication/230642342_Precise_range_estimation_on_known_surfaces_by_analysis_of_fullwaveform_laser)>. Syyskuu 2006. Luettu 25.3.2014

Kukko Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Maa-57.290 Fotogrammetrian erikoistyö.

LMS-Q560 Data Sheet. 2010. Verkkodokumentti. *RIEGL Laser Measurement Systems GmbH*. <[http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/10\\_DataSheet\\_Q560\\_20-09-2010\\_01.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_Q560_20-09-2010_01.pdf)> 20.9.2010. Luettu 28.2.2014.

POS AV Specifications. 2012. Verkkodokumentti. Applanix Corp.

<[http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/posav\\_specs\\_1212.pdf](http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/posav_specs_1212.pdf)>.

Elokuu 2012. Luettu 28.2.2014

Schaer P., Skaloud J., Landtwing S., Legat K. 2007. Accuracy estimation for laser point cloud including scanning geometry. Verkkodokumentti. <[http://infoscience.epfl.ch/record/116146/files/schaer\\_philipp.pdf](http://infoscience.epfl.ch/record/116146/files/schaer_philipp.pdf)>.

Toukokuu 2007. Luettu 25.3.2014.

Shan Jie, Toth Charles K. 2008. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. CRC Press

Ullrich A. Pfennigbauer M. 2011. Echo Digitization and Waveform Analysis in Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Verkkodokumentti.

<<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/220ullrich.pdf>> Syyskuu 2011.

Luettu 26.3.2014

Vosselman G., Maas H.-G. 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. CRC Press

Wagner W. Ullrich A. Melzer T. Briese C. Kraus K. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. 2004. Verkkodokumentti.

<<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/267.pdf>>. Heinäkuu 2004. Luettu 3.3.2014.

Werner Mücke. 2008. Analysis of full-waveform airborne laser scanning data for the improvement of DTM generation. Diplomarbeit. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien. Verkkodokumentti.

<[http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_170289.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_170289.pdf)>. September 2008. Luettu

26.3.2014

**Laserkeilattujen pintojen vertailu 30 cm:n pisteresoluutiolla**

Surfaces = Laserkeilaus\_tajama-alue - Laserkeilaus\_keskusta

Type = Height

Area = Project

Wupp = 0.000

Min value = -0.079

Max value = 0.139

Average value = 0.016

Min value XY = 22473644.3 6779910.9

Max value XY = 22473716.1 6779881.3

Amount values = 23833

Amount tries = 38850

Time = 8 sec

<= -0.10: 0.00%

-0.10 - -0.06: 0.02%

-0.06 - -0.06: 0.00%

-0.06 - -0.04: 0.03%

-0.04 - -0.04: 0.00%

-0.04 - -0.02: 0.38%

-0.02 - -0.02: 0.08%

-0.02 - -0.01: 1.62%

-0.01 - -0.01: 0.42%

-0.01 - 0.00: 9.23%

0.00 - 0.00: 1.72%

0.00 - 0.01: 21.02%

0.01 - 0.01: 2.94%

0.01 - 0.02: 25.55%

0.02 - 0.02: 2.53%

0.02 - 0.04: 28.31%

0.04 - 0.04: 0.57%

0.04 - 0.06: 5.03%

0.06 - 0.06: 0.05%

0.06 - 0.10: 0.48%

>= 0.10: 0.02%

## Visuaalinen esitys pintojen korkeusvertailusta 30 cm pisteresoluutiolla

