

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Maanmittaustekniikan koulutusohjelma

**Sami Ruuskanen**

**Ilmasta käsin suoritettavan laserkeilaushankkeen  
prosessikuvaus konsulttiyrityksessä**

Insinööritö 26.05.2010

Ohjaaja: yliopettaja Vesa Rope  
Ohjaava opettaja: yliopettaja Vesa Rope

Tekijä Otsikko	Sami Ruuskanen Ilmasta käsin suoritettavan laserkeilaushankkeen prosessikuvaus konsulttiyrityksessä
Sivumäärä Aika	72 sivua 26.05.2010
Koulutusohjelma	maanmittaustekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	yliopettaja Vesa Rope yliopettaja Vesa Rope
<p>Insinööriössä oli tavoitteena kuvata ilmasta käsin suoritettavan laserkeilaushankkeen prosessi välivaiheineen hankkeesta vastaavan konsultin näkökulmasta. Ilmalaserkeilaus on noussut suosituksi menetelmäksi maastotiedon keruussa, ja teknologiassa on tapahtunut huomattavaa kehitystä viime vuosikymmenien aikana. Se on hyvin käytetty menetelmä korkeusmallin tuottamiseksi väyläsuunnittelussa, ja tulevaisuudessa kaupunkirakenteen mallintaminen laserkeilauksella yleistyy huomattavasti mallintamisohjelmien kehityksen myötä.</p> <p>Laserkeilauksen periaate on suhteellisen yksinkertainen: keilain lähettää laserpulseja ja rekisteröi takaisin heijastuneen kaiun. Kohteen etäisyys voidaan laskea kulkuajan ja sijainti pulssin kulkusuunnan perusteella. Lisäksi täytyy tuntea keilaimen sijainti ja asento, jotka selvitetään satelliittipaikannus- ja inertiahavainnoilla..</p> <p>Ilmalaserkeilaushankkeessa on tyypillisesti kolme osapuolta: työn tilaaja, toteutuksesta vastaava konsultti ja keilauksen suorittava alikonsultti. Hanke on asiakaslähtöinen prosessi, jonka tarkoituksena on tuottaa tilaajalle tämän tarvitsema lopputuote.</p> <p>Laserkeilaushankkeen työvaiheet ovat suunnittelu, keilaus, maastomittaukset, aineiston käsittely, lopputuotteiden valmistus ja niiden tarkastus. Aineiston käsittely jakautuu edelleen tarkastukseen, lentojonojen kalibrointiin, pisteiden luokitteluun, ortokuvien valmistukseen ja laadunvarmistukseen.</p>	
Hakusanat	ilmalaserkeilaus, prosessikuvaus, korkeusmalli

## Helsinki Metropolia University of Applied Sciences Abstract

Author Title	Sami Ruuskanen Process description of an airborne laser scanning project in a consultant company
Number of Pages Date	72 26 May 2010
Degree Programme	Land Surveying
Degree	Bachelor of engineering
Instructor Supervisor	Vesa Rope, Principal Lecturer Vesa Rope, Principal Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to describe the process of an airborne laser scanning project. Airborne laser scanning has become a popular method in collecting geospatial data, and the field has experienced notable development during the past decades. The method is very commonly used in road and railway planning to produce digital elevation models, and modelling city structure with airborne laser scanning is likely to gain importance in the future due to the development of modelling programs.</p> <p>The principle of laser scanning is fairly simple: the scanner emits a laser pulse and registers the back scatter. The distance to the object can be calculated from the travel time of the laser pulse and the location obtained from the direction of the pulse. In addition, the location and attitude of the scanner must also be known. The information is collected from satellite and inertial observations.</p> <p>An airborne laser scanning project is typically a joint venture of three parties: the client, the consultant responsible for executing the project and the sub consultant responsible for the actual scanning. The project is a customer oriented process that aims to produce the desired end product for the customer.</p> <p>In the final year project, the following stages that are present in a laser scanning project were recognized: planning, scanning, field survey, processing the data, producing the end products and inspecting them. Processing the data takes place in the following stages: inspection, calibration, point classification, orthophoto production and quality control.</p>	
Keywords	airborne laser scanning, process, digital elevation model

## Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Käsitteitä

1	Johdanto	8
2	Pöyry Group	9
2.1	Pöyryn arvot	9
2.2	Pöyry Finland Oy	10
3	Laserkeilaus	11
4	Konsulttiyritys ilmalaserkeilaushankkeessa	13
4.1	Konsultti	13
4.2	Konsultin tehtävät	13
4.3	Konsultin valinta	13
5	Laserkeilaushankkeen prosessi	15
6	Hankkeen suunnittelu	16
6.1	Hankkeen lähtökohdat	16
6.2	Lopputuotteen suunnittelu	19
6.3	Keilaustoimittajalta tilattavan aineiston määrittely	20
6.4	Keilausajankohta	24
7	Maastotyöt	26
7.1	Laserkeilauksen maastotyöt	26
7.2	Ilmakuvauksen maastotyöt	28
8	Aineiston käsittely	29
8.1	Aineiston käsittelyn vaiheet	29
8.2	Projektin valmistelu ja toimitetun aineiston tarkastus	30
8.3	Kalibrointi ja lentojonojen yhteensovittaminen	31
8.4	Luokittelu	34
8.4.1	Aineiston siivoaminen	35
8.4.2	Maanpinta	36
8.4.3	Kasvillisuuden luokittelu	42
8.4.4	Rakennusten luokittelu	42
8.4.5	Pistepilven harventaminen jatkokäsittelyä varten	43
8.5	Ilmakuvat	44
8.6	Laadunvarmistus ja raportointi	47
9	Lopputuotteet	51
9.1	Korkeusmalli	51
9.2	Rakennukset	51

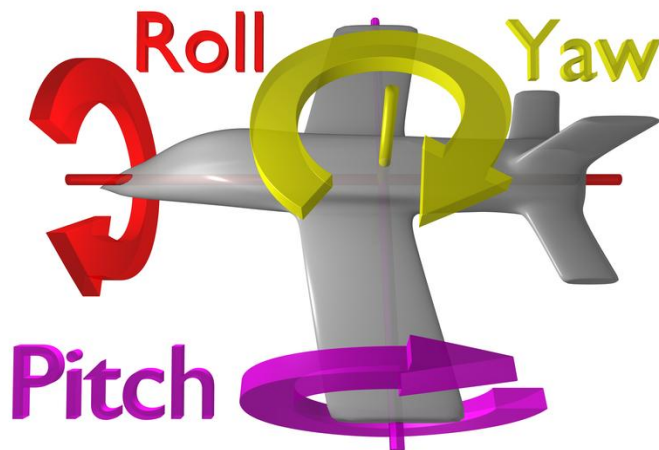
10	Prosessin laatu ja sen varmistus	56
10.1	Lennon ja keilauksen parametrit	56
10.2	Kohde	57
11	Esimerkit	59
11.1	Ratahankkeen keilaus välillä Seinäjoki-Kaskinen	59
11.2	Maanmittauslaitoksen korkeusmalli ja laserkeilausaineisto	63
12	Yhteenveto	66
	Lähteet	67
	Liitteet	
	Liite 1 Esimerkki laserkeilaushankkeen vaihe aikataulusta	72

## **Käsitteitä**

<b>Divergenssi</b>	Avaruuskulma, jonka sisällä laserpulssi etenee ja vaimenee määritettyyn murto-osaan huippuintensiteetistään.
<b>Fotogrammetria</b>	Kuvilta mittaamista.
<b>Geoidi</b>	Painovoiman tasapotentialipinta, joka yhtyy vapaaseen valtameren keskipintaan tai sen kuviteltuun jatkeeseen mannerten alla. Geoidin tarkka matemaattinen mallintaminen on käytännössä mahdotonta, koska planeetan sisäisten massajakaumien vuoksi geoidipinta on monimutkaisen epäsäännöllinen ja muuttuu jatkuvasti. [24, s. 162–163.]
<b>Geoidin korkeus</b>	Geoidipinnan ja vertausellipsoidin korkeusero. Geoidimallin pisteiden korkeus ilmoitetaan tiettyyn vertausellipsoidiin nähden. Ortometriset ja normaalikorkeudet ilmoitetaan geoidiin nähden. [25, s. 69.]
<b>GPS</b>	Global Positioning System. Yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit. Gyroskooppeja ja kiihtyvyysantureita hyödyntävä 1–6 vapausasteen järjestelmä, joka mittaa sijainnin ja asennon muutoksia.
<b>Kaukokartoitus</b>	Kohteen tutkimista koskematta siihen, yleensä sähkömagneettista säteilyä hyödyntäen.
<b>Keilauskulma</b>	Kulma, jonka keilain pyyhkäisee. Ilmoitetaan poikkeamana nadiirista.
<b>Kiertokulmien vakiovirheet, Pitch, Yaw &amp; Roll</b>	Lentoaluksen ja myös laserkeilaimen tai ilmakuvakameran kallistukset akselien ympäri [kuva 1]. Keilaimen ja IMU- tai INS-järjestelmän välisen orientoinnin aiheuttamat virheet keilauskulman määrittämisessä. Näistä aiheutuu systemaattinen sijaintivirhe raakadataan. [16]
<b>Korkeusmalli</b>	Maanpinnan korkeutta kuvaava malli.
<b>Kulmaresoluutio</b>	Lasersäteiden välinen kulmaerotus. Voi olla erisuuruinen lentojon suunnassa ja sitä kohtisuoraan.
<b>Kulmatarkkuus</b>	Lasersäteen kulmanmäärittäytarkkuus
<b>Maastomalli</b>	Tarkka maanpinnan topografinen malli, joka kuvaa maastoa sellaisena kuin se luonnossa on. Maastomalli voi sisältää kasvillisuutta ja rakennuksia. Koostuu pisteistä ja niitä yhdistävistä vii-

voista.

- Ortokuva** Korkeusmallin avulla karttaprojektioon oikaistu ilmakehän tai -kuvablokki.
- Pintamalli** Pintamalli on rautalankamalli, jossa piiloviivat eivät ole näkyvisiä. Pinnoille voidaan antaa tekstuuri ja pintoja voidaan käsitellä itsenäisesti.
- Vertausellipsoidi** Maan navoilta litistynyttä muotoa kuvaava pyörähdySELLIPSOIDI. Suomessa yleisemmin käytetyt ovat Hayford 1909 KKK:n yhteydessä ja GRS80 EUREF-koordinaattijärjestelmän yhteydessä. GPS-järjestelmän käyttämä WGS-84 on käytännössä yhtenevä GRS80-ellipsoidin kanssa. Maantieteelliset koordinaatit lasketaan vertausellipsoidin pinnalla ja GPS-järjestelmästä saadaan korkeus ellipsoidin pintaan nähden.



---

*Kuva 1. Lentokoneen kallistukset [6].*

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli mallintaa ilmalaserkeilaushankkeen prosessi konsulttiyrityksen näkökulmasta ja tarkastella prosessin eri työvaiheita.

Ilmalaserkeilauksesta ei ole olemassa kansallisia ohjeita, eikä menetelmä ole kovinkaan tuttu tahoille, jotka voisivat hyödyntää sitä. Aiheesta on kohtuullisen paljon suomenkielistäkin kirjallisuutta, mutta koko prosessin kattavaa kuvausta, jossa työvaiheet selitettäisiin perusteineen, ei ole saatavissa.

Ilmalaserkeilaus ilmestyi markkinoille kymmenisen vuotta sitten, ja sen käyttö on yleistynyt varsinkin korkeusmallin tuottamisen tekniikkana. Ilmalaserkeilauksen käyttö kaupunkimallinnuksessa on voimakkaasti kasvamassa sekä kehittyvän teknologian että lisääntyneen kysynnän ansiosta. Myös muutostulkintaan ilmalaserkeilaus tuo uusia mahdollisuuksia.

Työ toteutettiin Pöyry Finland Oy:lle ja työssä hyödynnettiin Pöyry Finland Oy:n Vesi ja ympäristö toimialan paikkatieto-osaston kokemuksia ilmasta tapahtuvista laserkeilaushankkeista.



## 2 Pöyry Group

Pöyry on globaali konsultointi- ja suunnittelupalveluita tuottava yritys, jonka 7 000 asiantuntijaa työskentelevät noin 50 maassa. Pöyryn toimialat ovat teollisuus, energia, kaupunki & liikenne, vesi & ympäristö ja liikkeenjohdon konsultointi.

Yritys sai alkunsa vuonna 1958, kun Metsänomistajien liitto pyysi tohtori Jaakko Pöyryä kumppaneineen suunnittelemaan Äänekoskelle rakennettavan sulfaattiselutehtaan. Toiminta laajeni nopeasti ja ensimmäinen toimipiste ulkomailla perustettiin jo 1962 Tukholmaan.

90-luvulla Pöyry teki päätöksen laajentaa toimintaansa energia-, infrastruktuuri ja ympäristöalalle ja laajeni yritysostojen kautta. Vuonna 1997 Pöyry listautui Helsingin pörsssiin. [27]

### 2.1 Pöyryn arvot

Pöyryn arvoissa heijastuu konsulttiyritystoiminnan luonne – asiantuntijaratkaisujen tuottaminen asiakaslähtöisesti.

- Client: Asiakkaiden tarpeiden ymmärtäminen ja niiden aktiivinen ratkaiseminen
- Team: Me pöyryläiset – tekijät ja osaajat yhdessä
- Drive: Tekemisen meininki – kyky viedä asiat sujuvasti päätökseen
- Excellence: Laadukas ja innovatiivinen toiminta, kyky uudistaa toimintatapoja ja toimialaa

Motto: ”Kun asiakas menestyy, me olemme onnistuneet.”

[27]

## **2.2 Pöyry Finland Oy**

Pöyry Finland Oy on osa Pöyry Groupia ja operoi lähinnä Suomessa ja lähialueilla. Pöyryllä on Suomessa 22 toimistoa ja liiketoimintaa kaikilla Pöyry Groupin liiketoimintasektoreilla. Pöyry on Suomen johtavia konsulttitoimistoja useilla toimialoilla.

### **Paikkatieto-osasto**

Paikkatieto-osasto kuuluu vesi ja ympäristö -toimialaan. Pöyry auttaa asiakkaita keräämään, organisoimaan ja hallitsemaan paikkatietojaan sekä kehittämään paikkatietojärjestelmäänsä niin, että se tukee mahdollisimman tehokkaasti asiakkaan omaa toimintaa. Paikkatietojen tuottamiseen tarjotaan ratkaisuja satelliittikuvien hyödyntämisestä tarkkojen as-built-tietojen tuottamiseen. Paikkatieto-osasto toimii kansainvälisesti. Paikkatieto-osasto toteuttaa myös ilmalaserkeilausprojekteja. [26; 23.]

### 3 Laserkeilaus

Laserkeilain on näkyvän valon, infrapunan tai ultravioletin aallonpituusalueilla toimiva optinen tutka, joka tuottaa kolmiulotteista sijaintitietoa. Laite lähettää laserpulseja ja määrittää vastaanotetusta kaiusta kulkuajan tai vaihe-eron perusteella etäisyyden kohteeseen. Laserkeilaus on nopea tapa tuottaa suuria kolmiulotteisia pistejoukkoja. [29]

#### Laserkeilaus ilmasta

Ilmasta käsin tapahtuva laserkeilaus on hyvä keino maasto- ja kohdemallien luomiseen, linjamaisten kohteiden väyläsuunnitteluun, tulvakartoitukseen, metsäinventointiin ja kaupunkimallien mittaukseen. Laserkeilaus lentoaluksesta on yleistynyt huomattavasti 90-luvun lopulta lähtien. [10, s. 2.]

Ilmalasekeilaus on perusidealtaan melko yksinkertainen. Mittaus tapahtuu lentokoneesta, helikopterista tai lennokista kohteen yläpuolelta. Lentokorkeus on tyypillisesti 60–4 000 m [32, s. 2]. Kohteen etäisyys mitataan laserpulssin kulkuajasta, ja laserkeilain pyyhkii pulssia keilauslinjalla. Kun laserkeilaimen asento ja sijainti tunnetaan, mitattu etäisyys voidaan muuttaa kolmiulotteiseksi sijainniksi. Laserkeilausaineiston orientoimiseen tarvitaan sijaintitieto GPS:n avulla ja tieto keilaimen asennosta INS-inertia-antureilla. [10, s. 1.]

GPS-paikanmäärityksen tarkkuutta parannetaan joko RTK-tukiasemalla tai VRS-verkkoa käyttämällä [21, s. 2]. Yksi tukiasema kattaa alueen, jonka säde on enimmillään 30 km, mikä riittää alle 10 cm:n tarkkuuden saavuttamiseen [40, s. 31].

Inertiamittaus perustuu kiihtyvyyden mittaukseen. Painovoiman vaihtelu heikentää sen tarkkuutta, sillä painovoima aiheuttaa kiihtyvyyttä. Inertiamittauksen tarkkuuden parantamista painovoimanmittauksella tutkitaan, ja tästä on saatu joitakin lupaavia tuloksia. [7, s. 46–59.]

Laserkeilauksella voidaan luoda kohteesta malli, jonka pistetiheys on lentokorkeudesta ja keilaustaajuudesta riippuen 0,06–25 pistettä/m<sup>2</sup>. Tiheyttä on mahdollista kasvattaa lentämällä useampia päällekkäisiä jonoja. [10, s. 5.]

*Taulukko 1. Ilmalaserkeilainten tyypillisiä parametrejä [2, s. 2–3].*

Aallonpituus	0,9 μm tai 1,5 μm
Pulssin kesto	0,5–1,5 ns
Keilan divergenssi	0,2–1 mrad
Pulssin toistotaajuus	30–200 kHz
Suurin avauskulma	14–75°
Keilauksen toistotaajuus	25–650 Hz
Keilauskuvio	siksak, linjoittainen, elliptinen, siniaaltoinen
Keilan koko maassa	0,2–2 m
Kaikujen määrä	2–8, tai koko aallonmuoto
Lentokorkeus	200–3000 m
GPS:n tallennustaajuus	1–2 Hz
IMU:n tallennustaajuus	128–1000 Hz
Korkeustarkkuus	0,05–0,2 m
Tasotarkkuus	0,1–1 m

Taulukosta 1 käy ilmi muun muassa laserkeilauksen korkea pulssitaajuus. Uudet keilaimet pystyvät rekisteröimään jopa 200 000 pistehavaintoa sekunnissa. Nykyisin monet keilaimet pystyvät myös rekisteröimään koko kaiun aallonmuodon, jolloin pisteiden tarkkuutta voidaan parantaa muuttamalla pulssin rekisteröintikynnystä ja laskennan parametrejä.

## **4 Konsulttiyritys ilmalaserkeilaushankkeessa**

### **4.1 Konsultti**

Konsultti on yleisnimike henkilölle, jonka toimenkuva on asiantuntijapalveluiden tarjoaminen. Konsultointityön määrite on laaja ja kattaa aiheet räjähdys- ja louhintakonsultoinnista pukeutumisen värianalyysiin ja sisustamiseen. Konsulttien rooli, tehtävät, ja hyöty asiakkaalle ovat tieteellisen tutkimuksen mukaan kohtuullisen monitulkintaiset. [18]

Laserkeilaushanke on asiakaslähtöinen prosessi, joka lähtee asiakkaan tarpeista. Laserkeilaus itsessään on mittausväline, jolla tuotetaan asiakasta hyödyttävää tietoa maasta, ympäristöstä tai luonnonvaroista.

Laserkeilaushankkeessa toimijoina ovat tilaajan lisäksi hankkeen toteutuksesta vastaava konsulttiyritys ja keilauksesta vastaava operaattori. Projektin onnistunut toteutus edellyttää toimijoilta saumatonta yhteistyötä. [21, s. 1.]

### **4.2 Konsultin tehtävät**

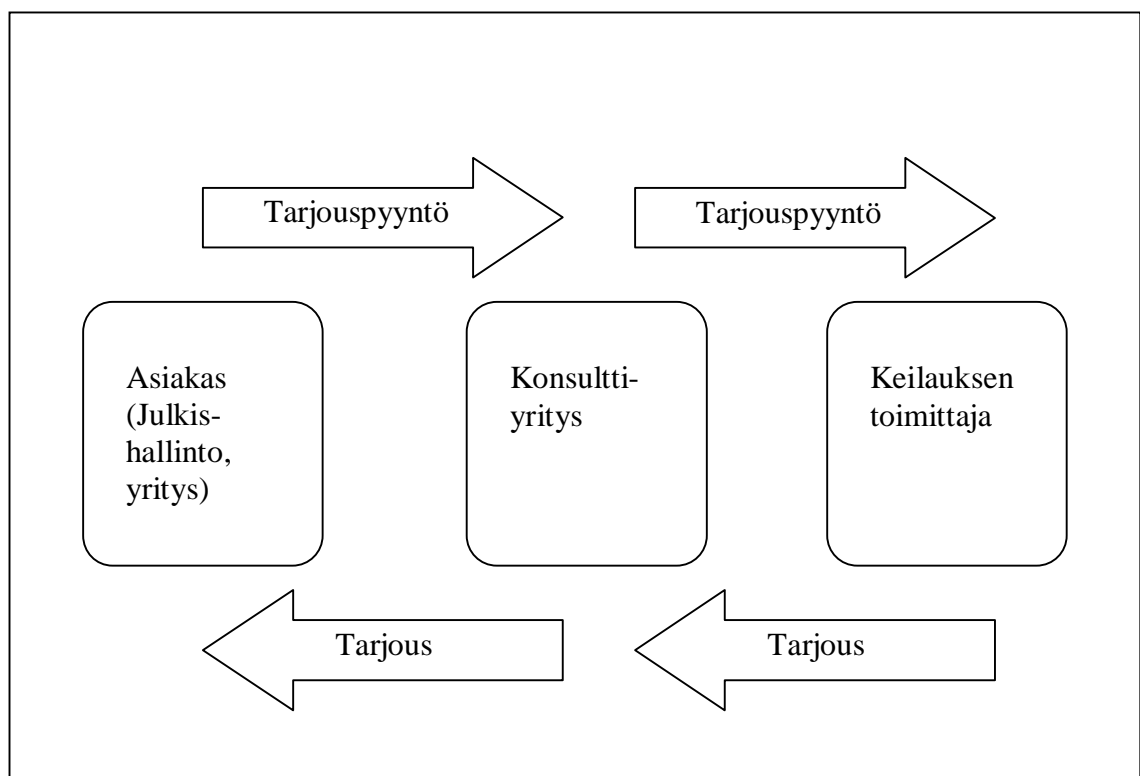
Konsultin tehtävänä on toimia asiakkaalle projektin johtajana ja yhteyshenkilönä alihankkijoiden suuntaan sekä toimittaa asiakkaalle haluttu lopputuote. Käytännössä Suomessa laserkeilauspalveluja tarjoavat yritykset tilaavat keilauksen suorituksen palveluntarjoajilta [40, s. 39]. Aineiston prosessointi jakautuu tilaajalle ja palvelun tarjoajalle sopimuksen mukaisesti.

### **4.3 Konsultin valinta**

Konsultti voidaan valita tarjouskilpailulla, tai tilaajan ja konsultin välillä voi olla laserkeilaushankkeet kattava puitesopimus ersimerkiksi geotieteellisestä konsultoinnista.

Molemmissa tapauksissa konsultti kilpailuttaa omasta puolestaan laserkeilauksen suorituksen ja antaa tilaajalle tarjouksen keilaustoimittajien tarjousten perusteella.

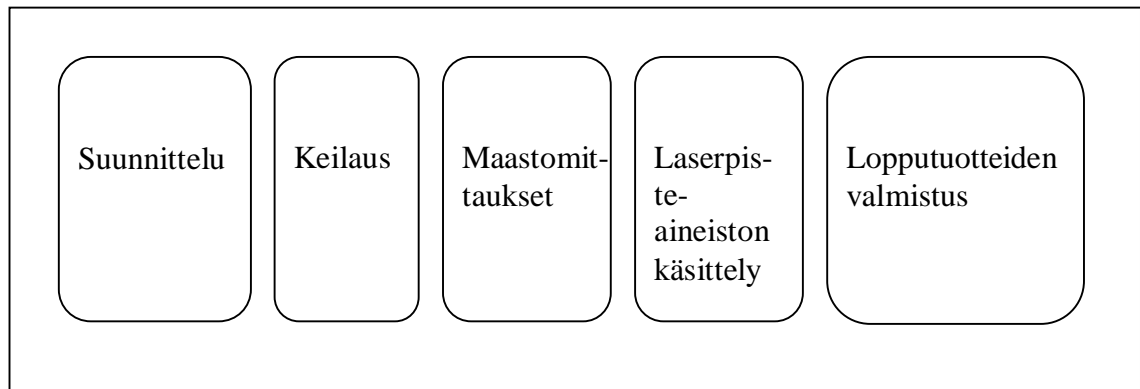
Pöyry Finland Oy:ssä laserkeilaus tilataan alihankkijalta. Keilaajilta pyydetään kirjalliset tarjoukset, joiden perusteella sopivin ja tarkoituksenmukaisin valitaan. [Kaavio 1.] Pöyry Finlandin toimialueella ilmalaserkeilausta suorittavat lähinnä BlomKartor, FM international ja Terratec.



*Kaavio 1. Hankkeen eteneminen tarjousvaiheessa.*

## 5 Laserkeilaushankkeen prosessi

Ilmasta tapahtuvan laserkeilaushankkeen prosessi koostuu viidestä työvaiheesta [kaavio 2].



*Kaavio 2. Ilmasta tapahtuvan laserkeilaushankkeen työvaiheet.*

- Suunnitteluun osallistuvat kaikki hankkeen toimijat omalta osaltaan.
- Keilauksen suorittaa alikonsultti yksin.
- Maastomittaukset voivat kuulua konsultille, toiselle alikonsultille tai jopa tilaajalle.
- Laserpisteaineiston esikäsittelystä vastaa keilauksen suorittaja ja varsinaisesta käsittelystä konsultti.
- Lopputuotteiden valmistuksen suorittaa konsultti.

Laserpisteaineiston käsittely jakautuu useisiin työvaiheisiin, joita käsitellään luvussa 9.

## 6 Hankkeen suunnittelu

### 6.1 Hankkeen lähtökohdat

#### Tarkoitus

Hankkeen tarkoitus on kohteen mallintamisella tuottaa asiakkaalle tämän tarvitsema aineisto tai informaatio, tyypillisesti pinta- tai korkeusmalli suunnittelun avuksi, seurantaan, visualisointiin, tai kartoituskäyttöön. Asiakkaan tarpeet ja maksukyky määrittävät hankkeen lopputuotteet, työvaiheet ja menetelmät sekä tarkkuuden.

Laserkeilausta on hyödynnetty teiden, katujen ja rautateiden suunnittelussa, 3D-kaupunkimallien tekemisessä, metsävarojen inventoinnissa, sähkölinjojen kunnossapidossa, kartoituksessa ja muutostulkinnassa [10, s. 3].

#### Kohde

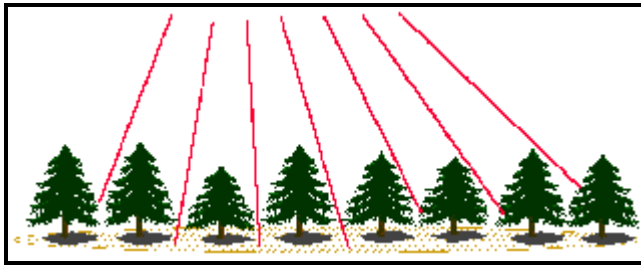
Suomessa ei ole olemassa virallisia kansallisia ohjeita laserkeilaukseen suositukseen, mutta tietyn tyyppisille kohteille, kuten tiehankkeille, voidaan hyödyntää kokemuksia aikaisemmista projekteista. Esimerkiksi tie-, ja ratahankkeissa on hyödynnetty ilmalaserkeilausta paljon. [26]

Keilattavan alueen muoto ja koko määrittävät keilausalustan ja -tavan. Pienissä ja nauhamaisissa kohteissa, kuten tie- ja ratahankkeissa, lentoaluksena käytetään yleensä helikopteria pienempien lentokustannusten ja ketterämmän liikkeen takia. Helikopterilla on mahdollista lentää matalammalla ja hitaammin, mitä voidaan hyödyntää suurta tarkkuutta vaativilla alueilla. Suurilla yhtenäisillä alueilla lentokone on tyypillisesti edullisempi ratkaisu [32, s. 2]. Helikopterista keilaaminen muodostuu kannattavaksi, kun alue on kooltaan noin 200 ha tai enemmän, lentokonekeilaus tulee edulliseksi, jos alueen koko on vähintään 50–100 km<sup>2</sup> [19, s. 37].



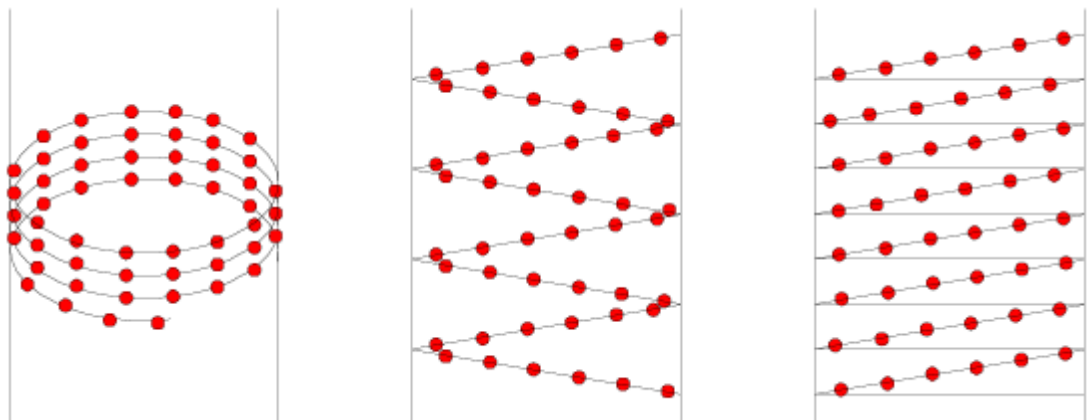
Keilauskohteen maaston muoto saattaa myös vaikuttaa keilauksessa käytettäviin menetelmiin. Kasvillisuus, suuret äkilliset korkeusvaihtelut ja alueen rakennuskanta on otettava huomioon keilausta suunniteltaessa.

Laserkeilaus tuottaa hyvän korkeusmallin päästessään tunkeutumaan maan pintaan asti. Peitteisillä alueilla paras tulos saadaan kapealla keilan aukeamiskulmalla, eli kun keilaus on mahdollisimman pystysuora [kuva 2]. Metsäalueilla käytetään usein maksimissaan 10 asteen avauskulmaa [10, s. 2].



Kuva 2. Keilaimen avauskulman vaikutus [10].

Metsäisillä alueilla keilaukseen soveltuvat lentosuuntaan poikittaissuuntaisesti linjoittain kuvaavat keilaustyypit ja siksak-kuviota tuottavat keilaimet, koska näillä saadaan keilattua suoraan yläpuolelta. Rakennetulla alueella kartiomainen keilaustekniikka tuottaa tietoa pystysuorista rakenteista myös lentojonon suuntaisesti. [Kuva 3.] [26]



Kuva 3. Keilaustekniikat: kartiomainen, siksak ja linjoittainen [12].

## **Aikataulu**

Laserkeilaushankkeen aikataulu on yleensä vähintään lopputuotteen luovutuksen osalta määritelty jo tarjousvaiheessa, mutta myöhempien työvaiheiden ajoitus riippuu itse keilauksen suorittamisen ajankohdasta. Keilaukselle määritellään sopimuksessa viimeinen mahdollinen suorituspäivä ja tätä edeltävä suunniteltu aloituspäivä. [26]

Keilaus saattaa olla tarkoituksenmukaista suorittaa tietyinä vuodenaikana lumesta, kasvillisuudesta tai vedestä johtuen. Usein kuitenkin keilausaineistoa tarvitaan esimerkiksi linjahankkeen suunnitteluun, jolloin suunnittelun aikataulu ratkaisee keilauksen ajankohdan. Toisinaan hankkeella on kiire, jolloin joudutaan toimimaan epäedullisena ajankohtana. Nopeasti toteutettu prosessi saattaa heijastua hintaan, lisätä maastotöiden tarvetta ja heikentää laatua. [26]

Laserkeilauksessa pilvisuus tai valon vähyys ei ole ongelma, sillä laser pystyy tunkeutumaan myös kasvillisuuden läpi, joten keilauksia voidaan suorittaa lähes minä ajankohtana tahansa [12]. Laserkeilauksen yhteydessä otetaan kuitenkin usein digitaaliset ilmakuvat, jolloin keilaus on ajoitettava kuvaamisen kannalta edulliseen ajankohtaan. Laserkeilaajat suorittavat myös viivästymisille herkempiä ilmakuvauksia, minkä vuoksi heidän aikataulunsa saattavat viivästyä.

Keilauksen jälkeiseen datankäsittelyyn varataan kullekin toiminnolle oma aikansa. Tyypillisesti aikataulussa on työvaiheet jaettu viikkokohtaisesti ja työn edistymistä seurataan ”check pointien” saavuttamisen avulla. Myös laskutus voi tapahtua osissa ja perustua kyseisten välitavoitteiden saavuttamiseen. [26]

## **Budjetti**

Asiakkaan maksukyky määrää, mitä tuotteita tilataan ja miten aineistoa käsitellään. Hankkeen budjetissa itse kuvauksen osuus on tyypillisesti varsin suuri, ja muiden työvaiheiden osuus riippuu suuresti halutusta mallinnuksen tasosta ja laadusta sekä lopputuotteista. Budjetissa voidaan eritellä jokaisen työvaiheen osuus erikseen, ja maksu voi

tapahtua niiden valmistumiseen tai hyväksymiseen perustuen. Budjetin ylittymisestä ja siihen liittyvistä toimenpiteistä sovitaan sopimuksessa.

## **6.2 Lopputuotteen suunnittelu**

Lopputuotteen määrittää tilaajaorganisaatio ja tilaajaorganisaation tarpeet. Lopputuotteen sisältö ja laatutaso määrittävät lennon ja työn määrät ja siten kustannukset. Monilla laserkeilausta säännöllisesti hyödyntävillä asiakkailla on haluttu lopputuote pääsääntöisesti ennalta mietittynä, mutta tarjousvaiheessa toimittajan ja alihankkijan resurssit voivat vaikuttaa lopulliseen tilaukseen. Etenkin laserkeilauksen kanssa vähemmän tuttujen tilaajien kanssa voidaan joutua tekemään enemmän yhteistyötä suunnittelussa.

### **Tuotetyypit**

Laserkeilaushankkeen lopputuotteina saadaan esimerkiksi

- orto-oikaistuja digitaalisia ilmakuvia
- tarkkoja maasto-, korkeus- ja pintamalleja
- 3D-kaupunkimalleja
- luokiteltuja pistepilviä
- vektoroituja johtolinjoja.

[21, s. 1].

### **Formaatit**

Lopputuotteen toimitusmuodon on oltava asiakkaan laitteistojen ja tarpeiden kanssa yhteensopiva. Toimitusmuotoja suunnitellessa tulee olla yhteydessä kaikkiin lopputuotetta hyödyntäviin tahoihin ja selvittää formaattien yhteensopivuus. Myös ohjelmistojen rajoitukset tiedostojen koon suhteen tulee huomioida aineiston toimituksen yhteydessä. [37, s 24.]

Usein käytetään alalla yleisesti käytössä olevia formaatteja, kuten TIFF- tai tiled TIFF-kuvaformaatit alkuperäisille kuville, tiheästi pakatut ECW- ja JPEG2000-formaatit kuvien käsittelyyn [21, s. 2], binäärinen LAS-formaatti pistepilville ja esimerkiksi .dgn- ja .dwg-tiedostoformaatit vektoriaineistolle [12, s. 39].

## **Tarkkuus**

Lopputuotteen haluttu tarkkuus riippuu sen käyttökohteesta ja tilaajan vaatimuksista. Lopputuotteen tarkkuus riippuu keilauksen tarkkuudesta ja tiheydestä, ja on huomattava, että keilatessa ei mitata yksittäisiä pisteitä, vaan pistepilviä, joista mallinnetaan pintoja ja kappaleita. Mallinnuksen onnistumiseksi pistejoukon tarkkuus ja tiheys on oltava riittävä. [36, s. 26.]

## **Koordinaatiston määrittely**

Lopputuotteen koordinaatiston määrää asiakas. Koordinaatisto voi olla kohteen oma, alueella yleisesti käytetty tai valtakunnallinen/maailmanlaajuinen riippuen käyttötarkoituksesta ja jatkokäsittelystä. Tyypillisesti mahdolliset eri aineistot halutaan samassa koordinaatistossa, mutta esimerkiksi linjahankkeissa voidaan haluta linjan eri osat paikakunnalla paremmin realisoidussa tai yleisemmin käytetyssä koordinaatistossa [26].

### **6.3 Keilaustoimittajalta tilattavan aineiston määrittely**

#### **Aluerajaus**

Aluerajaus tulee olla yksikäsitteinen, selkeästi määritelty ja kattaa kohdealue täydellisesti. Usein aluerajaus tulee suoraan tilaajalta. Aluerajauksessa on hyvä huomata, että keilauksessa paikannukseen käytetään GPS-paikanninta, joka toimii WGS84-koordinaattijärjestelmässä, joten sen käytöllä aluerajauksessa voidaan minimoida virheiden mahdollisuus. [36, s. 24–25.]

## Tarvittava pistetiheys

Pistetiheydellä on suora yhteys hankkeen hintaan ja nimellispistetiheys tulee usein suoraan vaatimuksena tilaajalta.

Tarvittava pistetiheys on monen tekijän summa. Pistetiheydellä on suuri vaikutus siihen, mitä aineistosta voidaan määrittää. Suurella pistetiheydellä erotetaan yksityiskohtia paremmin ja parannetaan tilastollisen laskennan edellytyksiä. [12]

Laserkeilauksen pistetiheyteen vaikuttavat pulssin toistotaajuus, lentokorkeus, lentonopeus, keilauskulma ja linjojen peittoprosentti.

Keskimääräinen pistetiheys voidaan laskea seuraavasti:

$$tiheys(pistettä / m^2) = \frac{f}{2 * (\tan \alpha) * h * v}$$

jossa  $f$  on pulssin toistotaajuus (n/s)  
 $\alpha$  on keilan maksimipoikkeama nadiirista  
 $h$  on lentokorkeus (m)  
 $v$  on lentonopeus (m/s)

Saavutettavaa pistetiheyttä rajoittavat maaston peitteisyys, topografia ja kohteen heijastusominaisuudet. Maaston peitteisyydestä ja topografiasta aiheutuu katvealueita. Kohteen pintaominaisuudet vaikuttavat heijastukseen, esimerkiksi kiiltävät tai kosteat pinnat aiheuttavat usein peiliheijastuksen, jota ei saada rekisteröityä vastaanottimessa. [12]

## **Esikäsittely**

Keilauksen toteuttaja yleensä laskee pisteille koordinaatit ainakin WGS84-järjestelmässä GPS/IMU-tietojen, kulmahavaintojen ja kulkuajan perusteella. Keilaaja voi sopimuksen mukaan suorittaa muunnoksen toiseen koordinaatistoon tai koordinaatijärjestelmään.

## **Ilmakuvat**

Ilmakuvilla voidaan tarkoittaa varsinaiseen kartoituskäyttöön suuriformaattisella digitaalisen ilmakuvakameralla otettuja valokuvia tai matalalta lennettäessä pieni- tai keskiformaattisen digikameran kuvia. Ilmakuvien spatiaalinen resoluutio, eli kuvapikselin koko maastossa, määritellään tarjousvaiheessa.

Ilmakuvien tarve riippuu hankkeen tarkoituksesta. Kartoituskäyttöön tarkoitettussa hankkeessa ilmakuvat ovat keskeinen osa koko prosessia, kun taas linjamaisten hankkeiden keilauksessa niitä ei aina tarvita lainkaan [26]. Ilmakuvien mosaikointi ja ortokuvien valmistus on työvaiheena aikaa ja työpanosta vaativa, mutta ilmakuvat ovat erinomainen apu laserkeilausaineiston luokittelussa.

## **Formaatit**

Tuotteiden formaatit voi olla syytä määritellä etukäteen yhteensopivuuden varmistamiseksi, välttämään häviöllistä pakkausta tai tiedonsiirron nopeuttamiseksi.

## **Koordinaatisto**

Sopimuksessa voidaan määritellä koordinaatisto ja tieto siitä, halutaanko korkeusasema elliptisessä järjestelmässä vai geoiditasoitettuna.

## Lentokorkeus

Lentokorkeus vaikuttaa moneen asiaan keilaushankkeessa. Käytännössä lentokorkeus on yleensä kompromissi tarkkuuden ja hinnan välillä. Laserkeilauksessa lentokorkeus on helikopterilaitteilla 60–500 m ja lentokoneella 500–4000 m [32, s. 2]. [Taulukko 2.]

*Taulukko 2. Esimerkkejä käytetyistä lentokorkeuksista.*

Kohde	Lentokorkeus	Alue
Rataosuus Seinäjoki–Kaskinen [26]	300	112 km, linjamainen kohde
Riihimäen keskustan tulva-kartoitus 2005 [28]	750 m	12 km <sup>2</sup>
Lehijärven ranta-alueiden korkeusmalli [15]	200 m (paikoin 100 m)	14 km, linjamainen kohde
Maanmittauslaitoksen uusi korkeusmalli 0,5 pistettä/m <sup>2</sup> [38]	2000 m	Suomi TM35 1:50000 kartta-lehdittäin, à 1150 km <sup>2</sup>
Ovanmyra/Lenåsen, puustotulkinta, 1,2 pistettä/m <sup>2</sup> [1]	800 m	50 km <sup>2</sup>

Laserkeilaimen keilaustaaajuus on usein vakio, jolloin lentokorkeus yhdessä keilauskulman kanssa määrittää keilattavan linjan leveyden ja pistetiheyden maassa. Korkeammalla lennettäessä pystytään keilaamaan suurempi alue kerralla. Tältä kannalta korkeammalta keilaaminen tulee edullisemmaksi, ja keilatessa on halvempaa lentää niin korkealla kuin tarkkuus- ja laatuvaatimukset sallivat. Peitteisillä alueilla keilatessa keilauskulma on pidettävä pienenä, joten ainoa keino leventää keilauslinjaa on lentää korkeammalla.

Lentokorkeus vaikuttaa keilauksen tarkkuuteen. Laserpulssin kulkuajan määrittämiseen perustuvan etäisyysmittauksen tarkkuus on vakio, mutta IMU-järjestelmän asennonmittauksen ja keilaimen kulmanmittauksen epävarmuudet heikentävät tarkkuutta korkeammalla lennettäessä.

Lentokorkeus yhdessä pulssin divergenssin kanssa määrittää myös keilan koon maanpinnalla. Pienemmällä keilakoolla saadaan yksityiskohtaisempaa tietoa kohteesta, mutta laajempi keila läpäisee kasvillisuutta paremmin.

### **Keilausalusta**

Ilma-aluksesta operoitavat laserkeilaimet voidaan jakaa kahteen tyyppiin: helikopteri- ja lentokonepohjaisiin keilaimiin. Näitä käytetään hieman erityyppisiin tarkoituksiin. Lentokonepohjaiset laitteet soveltuvat paremmin laajojen alueiden kartoitustyyppiseen käyttöön ja heilikopterisovellukset pienempien alueiden tai mutkittelevien linjojen tarkempaan keilaukseen. [32, s. 2.]

Lentokonekeilauksen etuina ovat edullisemmat lentokustannukset, tehokkuus laajoilla alueilla, vakaus alustana, laaja toimintasäde ja hyvä kuljetuskapasiteetti. Heikkoutena vastaavasti se, ettei lentokoneella voi lentää yhtä matalalla kuin helikopterilla eikä seurata mutkittelevia linjoja. [32, s. 2.]

Helikopteripohjaisten laitteiden etu on kyky lentää matalalla ja seurata mutkittelevia linjoja ja heikkoutena suuremmat kustannukset siirtymisestä ja laajempia alueita keilattaessa sekä suuremmat kallistukset [32, s. 2-3.]

## **6.4 Keilausajankohta**

Keilausajankohtaa valittaessa on huomattava, että yleisesti kasvillisuus ja sääilmiöt heikentävät keilauksen tulosta.

### **Lumi**

Lumi heijastaa laserpulssin takaisin, joten maanpintaa keilattaessa tulisi keilaus ajoittaa lumettomaan ajankohtaan [9, s. 8].



Lumipeitteen laajuuden ja paksuuden mallinnukseen laserkeilaus sen sijaan sopii oikein hyvin, jos alueelta on tarkka maastomalli entuudestaan. Lumen havainnointi suoraan laserkeilauksesta ilman ilmakuvia on haastavaa, sillä lumen vesipitoisuus, lämpötila ja hiutaleiden koko vaikuttavat takaisinsirontaan huomattavasti. [17, s. 155-163.]

## **Vesi**

Joskus keilaushankkeessa on tarpeen mallintaa ojat kuivina ja vesiuomat mahdollisimman vähävetisinä. Tällöin on syytä välttää keilaamista lumien sulamisen aikaan ja rankkojen sateiden jäljiltä [26]. Itse vesi heijastaa laserpulssia heikosti, joten vesistöt on helppo rajata laserkeilausaineistosta. Tyynellä ilmalla matalan vakaveden pinta saattaa kuitenkin aiheuttaa laserpulssin heijastumisen vedenpohjasta, jolloin vedenpinnan määrittäminen muodostuu hankalaksi. [15, s. 37-40.]

## **Kasvillisuus**

Kasvillisuus vaikuttaa keilauksen tarkkuuteen. Tiheä aluskasvillisuus nostaa maanpinnan mallia korkeutensa verran. Optimaalisin keilausajankohta olisi lumien lähdön jälkeinen kevät. Puiden lehdet heikentävät mallia jonkun verran erityisesti tuuheissa koivikoissa, ja peltoviljelyksien takia tarkkoja keilauksia ei pitäisi suorittaa kesäkuun puolenvälin ja elokuun lopun välillä. [9, s. 8.]

## **Muut operaatiot**

Laserkeilauksen kustannuksista suuri osa on lentokoneen tai helikopterin siirtokustannuksia, jotka ovat tyypillisesti noin 10 000 €[10]. Tästä syystä keilaus pyritään usein ajoittamaan samalla suunnalla tapahtuvien muiden projektien yhteyteen, jos aikataulut antavat myöden.

## 7 Maastotyöt

### 7.1 Laserkeilauksen maastotyöt

Maastotöillä saadaan maanpinnasta tietoa, jolla keilauspisteet saadaan orientoitua paikalliseen korkeustasoon ja tarkkaillaan keilauksen tarkkuutta maastoon nähden. Maastotyöt voidaan suorittaa joko keilausta ennen tai sen jälkeen. Jälkikäteen mitattaessa etuna on se, että aineiston laadusta voidaan mahdollisesti arvioida maastotöiden tarpeen määrää. Joka tapauksessa maastotyöt on syytä suorittaa mahdollisimman samanaikaisesti keilauksen kanssa, sillä esimerkiksi routiminen saattaa aiheuttaa huomattavia muodonmuutoksia maanpintaan. [26]

Mittaukset voidaan lukea kahteen luokkaan: korkeusaseman ja tasotarkkuuden määrittämiseksi suoritettaviin kalibrointimittauksiin ja laserkeilauksella saavuttamattomien kohteiden, kuten siltarumpujen tai mahdollisesti ojanpohjien täydennysmittauksiin. Maastotyöt jäävät usein konsulttiorganisaation tehtäviksi tai ne on hankittava ostopalveluina kolmannelta osapuolelta. Ilmakuvaus- ja keilausyritykset eivät yleisesti tee maastotöitä. Pöyry Finlandin kattavan toimistoverkon ansiosta maastotyöt tehdään usein konsernin sisäisesti. [26]

#### **Kalibrointimittaukset**

Kalibrointimittauksilla tarkoitetaan laserkeilausaineiston tarkkuuden arvioimiseksi suoritettuja geodeettisia mittauksia, joista saatua tietoa käytetään pistepilven paikalliseen koordinaatistoon ja korkeusjärjestelmään orientointiin. Kalibrointipisteet koostuvat korkeuspisteistä ja tasotarkkuuspisteistä.

Korkeuspisteitä mitataan Pöyry Finlandilla tyypillisesti tasaisilta, kovilta ja hyvin heijastavilta pinnoilta, tyypillisesti asfalttipäällysteeltä tai betonirakenteilta. Pisteitä mitataan vähintään 5\*5-kokoiseen ruudukkoon, jossa pisteiden väli on noin metri, jos maastosta löytyy sopivia kohteita. Korkeustarkkuuspisteiden avulla laserkeilauspisteet saa-

daan asetettua paikalliseen tunnettuun korkeuteen, jos mallin korkeusasema on virheelinen. Niitä mitataan tyypillisesti esimerkiksi kulkuväyliltä ja pysäköintipaikoilta. [26]

Pisteitä mitataan myös jonkin verran peitteisillä ja epätasaisilla maastoilla jos parempia kalibrintipisteitä ei ole saatavilla. Nämä mitataan usein harvemmalla ruudukolla, ja niitä käytetään lähinnä siihen, ettei mallin korkeustaso poikkea suuresti todellisesta maastosta. [26]

Tasotarkkuuspisteillä saadaan pistepilvi orientoitua xy-tasossa oikealle kohdalle. On huomattavasti vaikeampaa löytää käyttökelpoisia tasotarkkuuspisteitä kuin korkeuspisteitä. Ojien risteyskohtia voidaan käyttää, mutta niissäkin ojan keskilinjojen määrittely on aina mittaajasta riippuvaista. Rata- ja tiehankkeissa voidaan mitata linjan poikkileikkauksia, joilla keilausaineiston sijaintia voidaan tarkkailla linjaa vasten kohtisuorassa suunnassa. Yleisesti voidaan sanoa, että xy-tason sijainti on korkeusasemaa riippuvaisempi GPS- ja IMU-havainnoista. [26]

### **Kalibrintimittausten mittaustiheys**

Kalibrintimittausten tiheys riippuu kohteesta ja kailaustavasta. Sopivien kalibrintimittauskohtien löytyminen voi osoittautua haasteelliseksi esimerkiksi rata-, tie- ja linjahankkeiden yhteydessä, jos kohteen läheltä ei löydy tarvittavaa tasaista ja heijastavaa pintaa. [26]

Seinäjoki–Kaskinen-ratahankkeen perusparannuksen keilauksessa suunniteltiin kalibrintimittauksia tehtävän noin kahden kilometrin välein. Tammikuun 2010 erittäin huonojen sääolojen takia mittaukset sujuivat ennakoitua hitaammin, ja ensimmäisten kalibrintimittausten näyttäessä keilausaineiston asettuvan hyvin oikealle korkeudelle mittausten välimatkaa päätettiin kasvattaa. Kalibrintimittauksia on tehty 2–5 km:n välein. [26]

## **Täydennysmittaukset**

Laserkeilaukselta peittoon jääviä kohteita joudutaan usein mittaamaan maastossa. Tie- ja ratahankkeiden yhteydessä ne ovat usein siltarumpuja, kaivoja, ratahallintalaitteita ja alikulkujen korkeusasemia, mutta myös peitteisten alueiden maanpinnan mallia joudutaan joskus täydentämään. Mittaukset suoritetaan takymetrillä tai vaaituskojeella. [26]

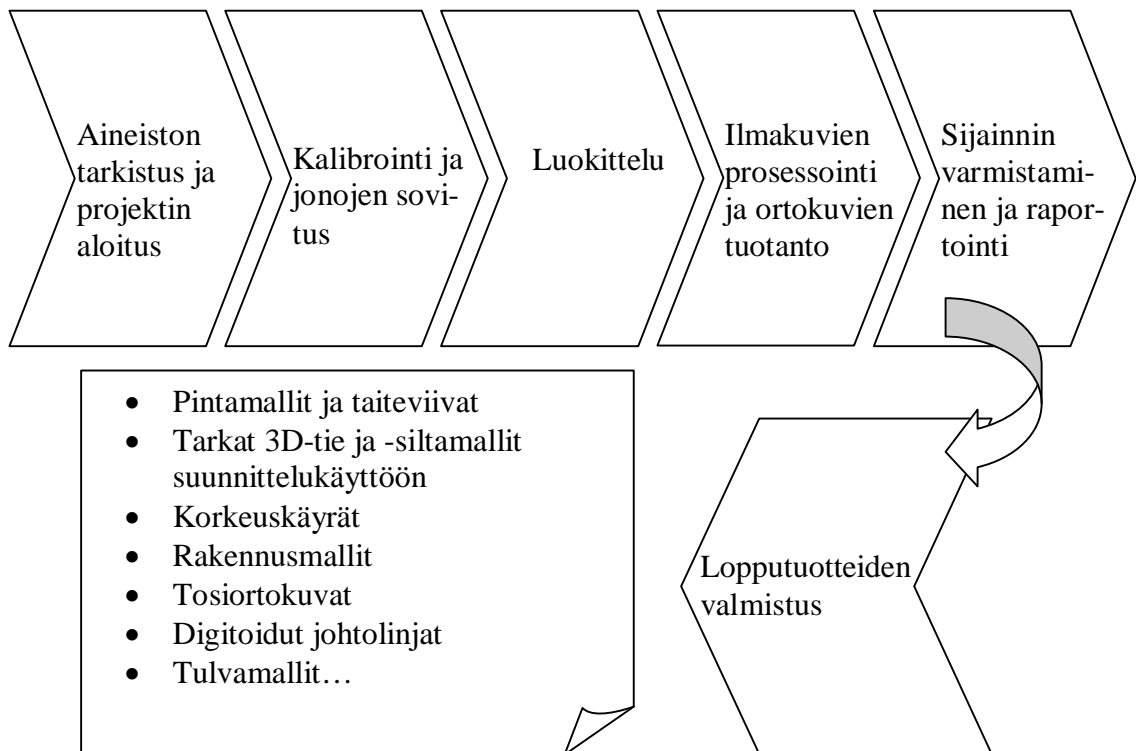
### **7.2 Ilmakuvauksen maastotyöt**

Jos keilauksen yhteydessä otetaan ilmakuvia, on niitä varten suoritettava lähtöpisteiden signalointi ja mahdollisesti konsulttiyrityksen on myös mitattava tai rakennettava pisteet itse. Keilauksen toteuttajat eivät pääsääntöisesti suorita signalointia. [26]

## 8 Aineiston käsittely

### 8.1 Aineiston käsittelyn vaiheet

Laserkeilausaineiston käsittelyprosessi koostuu kaavio 3:n mukaisista vaiheista.



*Kaavio 3. Laserkeilausaineiston käsittelyprosessi.*

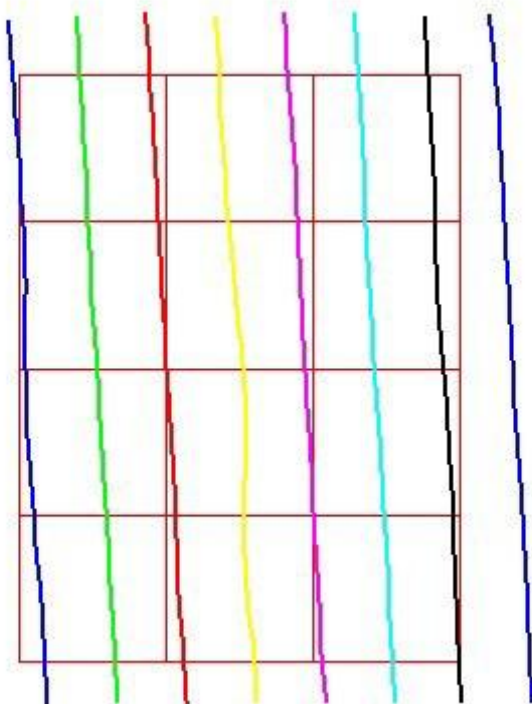
Käsittelyprosessi ei ole täysin suoraviivainen, sillä joissain työvaiheissa hyödynnetään seuraavasta vaiheesta etukäteen tuotettua raakaversiota. Esimerkiksi kalibroinnissa hyödynnetään automaattisesti luokiteltua maanpintaa ja varsinaisessa luokittelussa ”pikaortokuvia”, jotka on niinkään valmistettu automaattisesti luokitellun maanpinnan avulla.

## 8.2 Projektin valmistelu ja toimitetun aineiston tarkastus

Tässä vaiheessa opinnäytetyössä oletetaan, että GPS- ja IMU-havainnoista on laskettu lentoradat ja laserpisteille on laskettu koordinaatit.

Keilaajan toimitettua aineiston konsultille tämä käy aineiston läpi varmistaakseen, että se vastaa tilattua. Aineistosta tarkistetaan formaatti, tiheys, kattavuus ja aukottomuus, sekä aikaleimat ja lentolinjojen tiedot. [26; 26, s. 1.]

- Aineistot luetaan TerraScan-ohjelmistoon. Jos piste on ”viimeinen monesta”, eli oman pulssinsa viimeinen rekisteröity kaiku, se jää luokkaan default, muut pisteet luokitellaan matalaan kasvillisuuteen.
- Määritetään kohdekoordinaatisto ja suoritetaan muunnos WGS-84:stä paikalliseen koordinaattijärjestelmään. [31, s. 1-4.]
- Leikataan lentoradoista käännökset ja alueen ylimenevät osat pois [kuva 4], ja tarkistetaan, että lentoradat eivät leikkaa itseään eivätkä toisiaan.



Kuva 4. Lentoratojen leikkaaminen [30].

- Tarkistetaan aineiston kattavuus, aukottomuus ja tiheys.
- Luodaan uusi projekti, rajataan blokit, ja tuodaan pisteet uuteen projektiin.
- Määritellään jokaiselle pisteelle lentojono, johon se kuuluu. Tämä tehdään aikaleimojen avulla. [3, s. 1-2.]

Projekti joudutaan tyypillisesti jakamaan blokkeihin, eli pienempiin ruutuihin, joita voidaan käsitellä erikseen, sillä laserkeilaushankkeen pistemäärä saattaa nousta miljardeihin, mikä on liikaa mille tahansa työasemalle. Sopiva pistemäärä blokkiin on noin 5–20 miljoonaa. [31, s. 1.]

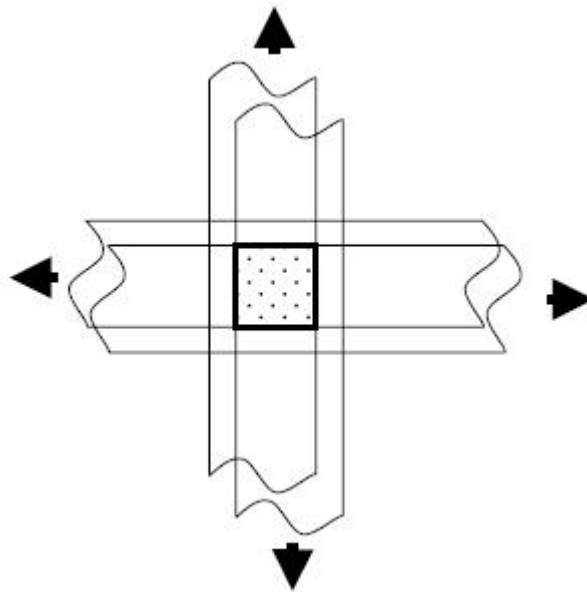
### 8.3 Kalibrointi ja lentojonojen yhteensovittaminen

Kalibroinnin tarkoitus on selvittää laitteiston asemointivirheistä, paikan- ja asennonmäärityksestä sekä mittausmenetelmästä johtuva systemaattinen virhe mittaustuloksiin ja poistaa se, jotta saatu pisteaineisto sopisi saumattomasti yhteen. Kalibroitiparametrit joudutaan selvittämään jokaiselle lennolle erikseen [31, s. 2]. Lentojonojen sovitus tapahtuu seuraavissa työvaiheissa [3, s. 2]:

- Aiemmin määritellylle maanpintaluokalle tehdään jonokohtainen luokitus ja tallennetaan jonokohtaisesti maanpinnan avainpisteet, eli maanpintaa edustavista pisteistä suodatettu pienempi pistejoukko, joka parhaiten kuvaavat pinnanvaihteluita.
- Luodaan uusi projekti pisteiden sovitukseen.
- Määritellään kiertokulmien vakiovirheet ja oskilloivan peilin kiihtymisen ja hidastumisen aiheuttamat virheet kulmanmääritykseen.

Kiertokulmien vakiovirhe [kuva 6] johtuu laserkeilaimen ja IMU-järjestelmän orientointivirheistä ja virheet kulmamäärityksessä sik-sak-keilaimessa edestakaista liikettä tekevän peilin pienestä vääntymisestä kiihtymisen ja hidastumisen takia [kuva 7], mikä aiheuttaa kulmanmääritykseen systemaattisen virheen. [16, s. 2–3.]

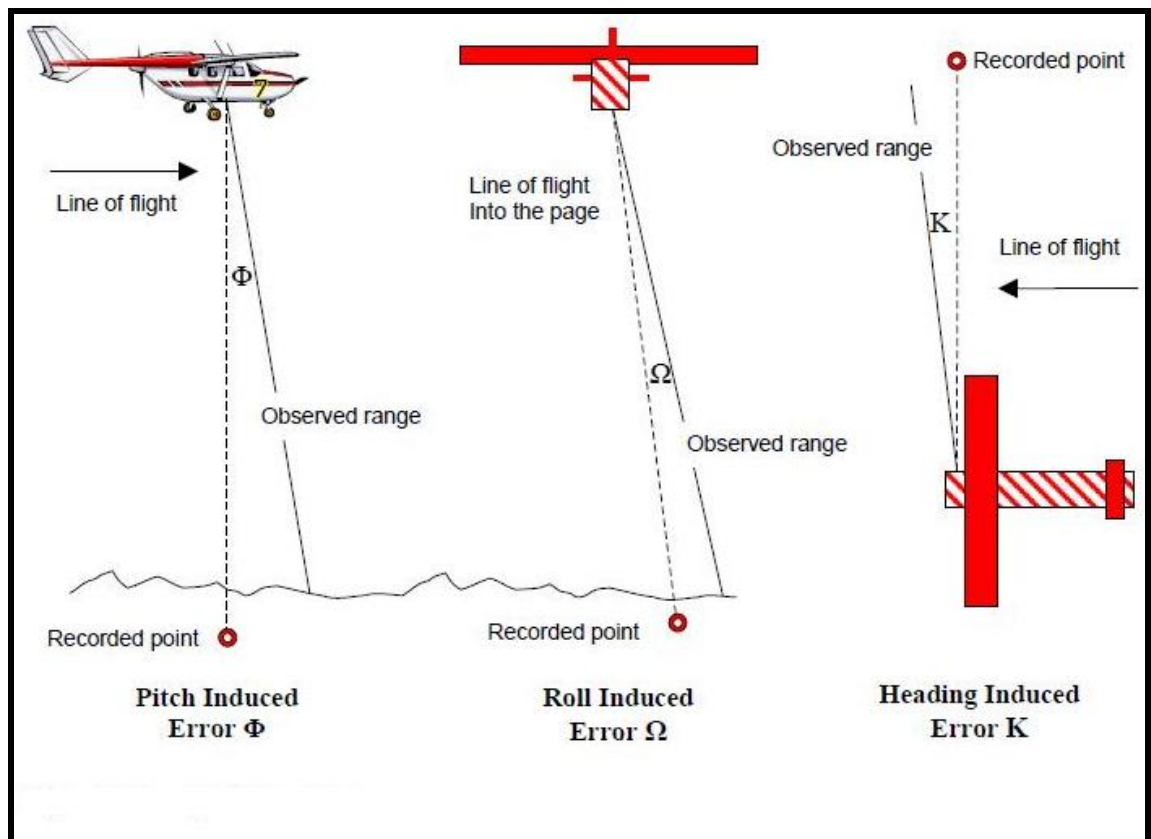
Vakiovirheiden määrittelyä varten täytyy määrittää sopivat alueet, joilla jonojen välinen sovitus tapahtuu. Optimaalinen maasto orientoinnin ratkaisemiseen käsittää sekä tasaisia vaakasuoria että tasaisia vinoja pintoja. Paras tulos saadaan, kun alueella ei ole matalaa kasvillisuutta. Optimaalinen kalibrointialueen lentokuvio muodostuu neljästä ristikkäisestä lentojonosta, joiden keskellä vinot pinnat sijaitsevat [kuva 5]. Lisäksi menettelyssä tarvitaan aikaleimoilla varustetut lentolinjojen tiedot ja niihin yhdistetyt laserpisteet. [11, s. 206.]



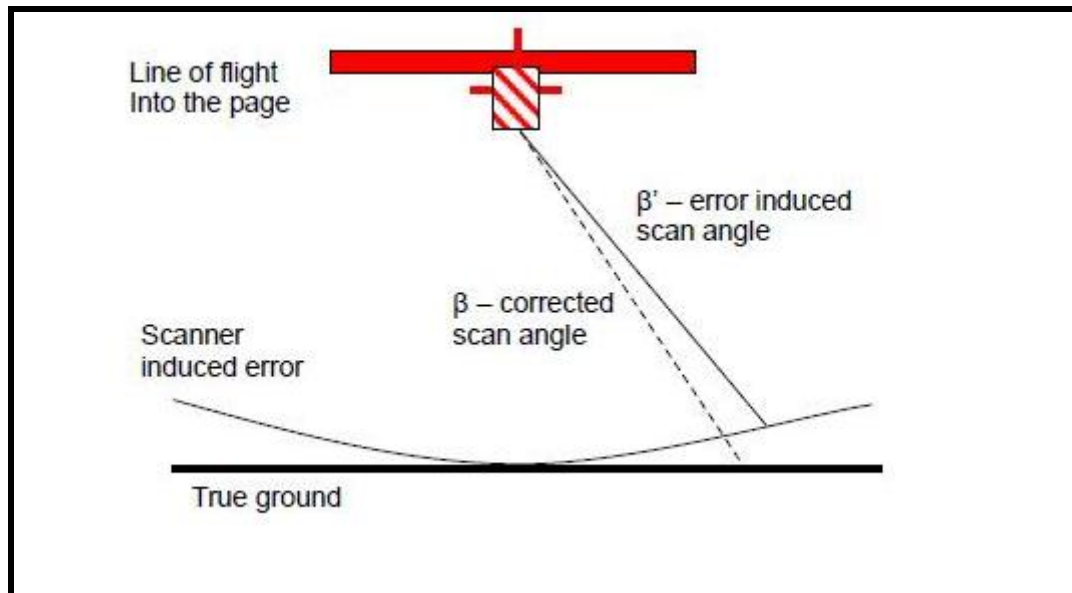
*Kuva 5. Optimaalinen lentokuvio kalibrointimittauksille [16].*

Systemaattinen korkeustason vaihtelu ja roll-suuntainen kierto voidaan ratkaista jopa pelkillä vaakasuorilla pinnoilla, pitch-kierron ratkaisemiseksi tarvitaan lentojonon suuntaan kohtisuoria rinteitä ja yaw- eli heading-kierron selvittämiseksi tarvitaan lentojonon suuntaisia rinteitä lentojonon molemmin puolin [11, s. 206].





Kuva 6. Kiertokulmien vakiovirheet [16].



Kuva 7. Peilivirheen vaikutus [16].

Lopuksi lentojonoissa oleva suuritaajuinen korkeusvaihtelu pyritään poistamaan vertailemalla vierekkäisiä lentojonoja keskenään ja asettamaan jonot samalle korkeudelle. Tyypillisesti jonojen korkeusasema voi olla muutamia senttimetrejä liian korkealla tai matalalla. [31, s. 2.]

Lentolinjojen reunoista leikataan päällekkäiset osat pois, sillä linjojen reunoilla tarkkuus usein vaihtelee suuremmasta keilauskulmasta johtuen, ja eri linjojen pisteiden yhteensovituksessa voi tulla eroja.

### **Muunnos elliptisestä korkeusjärjestelmästä kohdekoordinaatistoon**

Keilauksen orientointiin käytetään GPS-paikannusjärjestelmää ja koordinaatit ovat GPS:n käyttämän WGS-84-vertausellipsoidin mukaisia. Ellipsoidiset korkeudet muunnetaan geoidimallin avulla esimerkiksi N60- tai N2000-järjestelmän mukaisiksi ortometrisiksi tai normaalikorkeuksiksi riippuen halutusta kohdekoordinaatistosta [kuva 8]. Samalla voidaan muuttaa myös ilmakuvien kuvanottokoordinaatit ja lentojonojen radat kohdekoordinaatistoon. [34, s. 232.]



*Kuva 8. Geoiditasoitus [34].*

## **8.4 Luokittelu**

Luokittelussa koitetaan selvittää, minkätyyppisestä kohteesta kukin lasersäde on heijastunut takaisin. Luokittelu on tyypillisesti kaikkein aikaavievin työvaihe. Vaikka automaatio tekeekin suurimman osan työstä, joutuu operaattori kuitenkin luokittelemaan tuhansia tai miljoonia pisteitä oman harkintansa mukaan. [31 s.2.]

Luokkien lukumäärä vaihtelee erityyppisten projektien välillä. Lopputuotteen ollessa pelkkä maastomalli 5–8 luokkaa on riittävästi. Joissain projekteissa käytetään kuitenkin jopa 50:tä luokkaa. Taulukossa 3 on esitelty tyypillisimmät pisteluokat. [31, s. 2.]

*Taulukko 3. Esimerkki tyypillisistä pisteluokista [31, s. 3].*

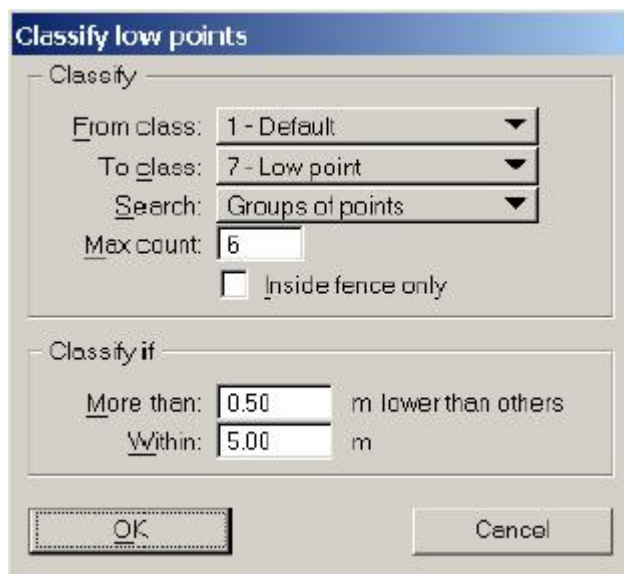
Numero	Luokka	Kuvaus
1	Default	Luokittelematon
2	Ground	Maanpinta
3	Low vegetation	Alle 0,3:n metrin korkeudessa maanpinnasta
4	Medium vegetation	0,3–2,0:n metrin korkeudella maanpinnasta
5	High vegetation	Yli kahden metrin korkeudessa maanpinnasta
6	Building	Rakennusten katot
7	Low point	Matalat/huonot pisteet
8	Model-key-point	Maanpinnan avainpisteet
9	Overlap	Prosessoinnista poistetut pisteet

Varsinaisen luokittelun ensimmäinen vaihe on maanpinnan luokittelu, joka on aluksi automaattinen prosessi ja myöhemmin muuttuu interaktiiviseksi. Interaktiivisessa työvaiheessa operaattori tarkastee aineistoa useasta eri kulmasta ja hyödyntää samalla muitakin tiedonlähteitä, kuten ortokuvia, vektorikarttoja tai olemassaolevia maastomalleja. Varsinkin ortokuvilla on suuri merkitys luokituksen onnistumiseen. [31, s. 2.]

#### **8.4.1 Aineiston siivoaminen**

Laserkeilausaineistossa on aina jonkun verran virhepisteitä. Näitä voi syntyä säteen heijastuessa useamman kerran ennen paluusignaalin mittaamista tai säteen törmätessä esteeseen ennen varsinaista kohdetta. Esteitä voivat olla esimerkiksi linnut, autot ja eläimet. Myös savu, sumu ja kosteus voivat aiheuttaa virheellisiä havaintoja.

Ennen maanpinnan luokittelua on syytä poistaa liian alas osuneet pisteet, jotka voivat johtua esimerkiksi osumasta kaivoon tai vastaavaan kaivantoon, tai säteen heijastumisesta useaan kertaan puista ja rakennuksista. Piste voidaan luokitella *matalaksi*, jos sen naapuripisteet tietyllä etäisyydellä ovat ennalta määritellyä arvoa alempana [11]. TerraScanilla voi luokitella myös pistejoukon mataliksi pisteiksi samalla periaatteella [kuva 9][34, s. 242].



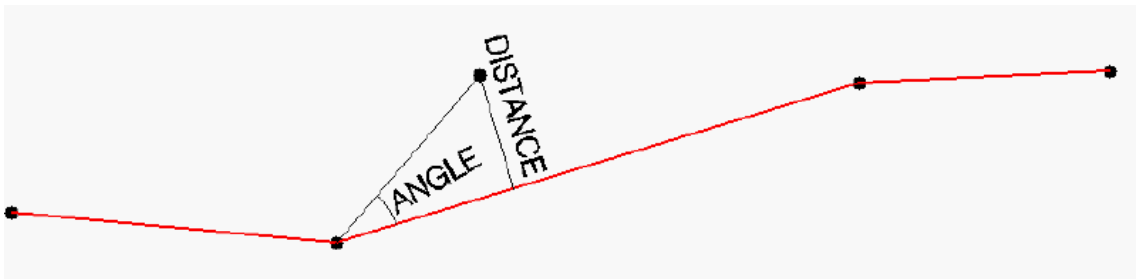
Kuva 9. Matalien pisteiden luokittelu TerraScan-ohjelmalla [34].

## 8.4.2 Maanpinta

### Kolmioverkon tihennys

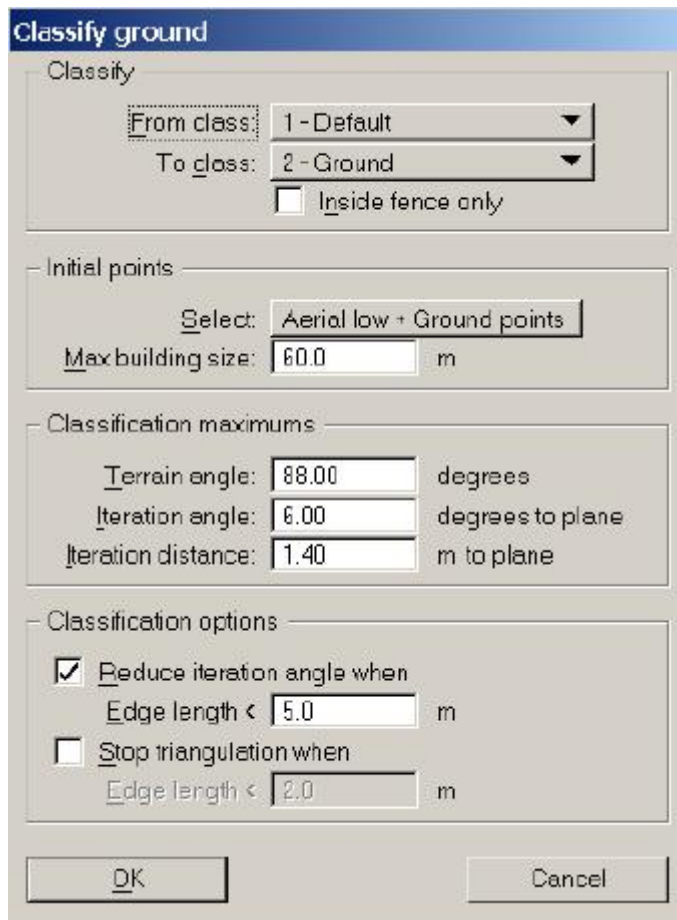
Maanpinnan luokittelu TerraScan-ohjelmalla tapahtuu kolmioverkkoa iteratiivisesti tihentämällä. Menetelmän alussa valitaan varmoja maanpinnan pistettä. Valitut pisteet ovat tietyn kokoisen ruudukon ruutujen alimmat pisteet. Ruudukon kokoa voidaan säätää asettamalla rakennusten suurin seinälinjan pituus, esimerkiksi 60 m. Tämän jälkeen oletuksena on, että jokainen 60 m \* 60 m:n ruutu sisältää ainakin yhden osuman maanpintaan. [34, s. 245–247.]

Näistä pisteistä kolmioidaan alustava pintamalli, joka on todellista maanpintaa alempana ja sivuaa sitä vain kulmapisteissään. Tähän nostetaan siihen iteratiivisesti lisäämällä tietyt ehdot täyttäviä pisteitä. Iteraatioaskelten parametrit ovat maksimikulma pisteen ja sitä lähimmän kolmion pisteen ja tason välillä ja maksimietäisyys kolmion muodostamasta tasosta [kuva 10]. Tämä parametri auttaa pitämään pienet rakennukset poissa maanpinta-luokasta kolmioiden ollessa suuria. [34, s. 245–247.]



Kuva 10. Iteraation parametrit: kulma ja etäisyys [34].

Pienemmällä kulmaparametrin arvolla rutiini on vähemmän innokas seuraamaan pieniä epätasaisuuksia maanpinnassa ja luokittelemaan matalaa kasvillisuutta maanpinnaksi. Tasaiselle maanpinnalle kulmaparametrin arvoksi riittää 4 astetta, ja mäkiselle maastolle soveltuu noin 10 astetta. [34, s. 245–247.]



Kuva 11. TerraScan-ohjelman maanpinnan luokitteluikkuna [34].

Pinnan maksimijyrkkyysskulma (*Terrain angle*) tarkoittaa iteraatiossa syntyvien pintojen suurinta sallittua korkeuskulmaa.

*Reduce iteration angle when Edge length <* -parametri pienentää käytettävää kulman maksimiarvoa, kun kolmion kaikki sivut ovat parametrin arvoa lyhyempiä.

*Stop triangulation when Edge length <* -parametri lopettaa kolmioinnin, kun kolmion kaikki sivut ovat raja-arvoa lyhyemmät. Molemmat viimeksimainitut parametrit auttavat välttämään tarpeettoman tiheää kolmioverkkoa ja vähentämään tilantarvetta.

[Kuva 11.] [34, s. 245–247.]

## Vankka interpolointi

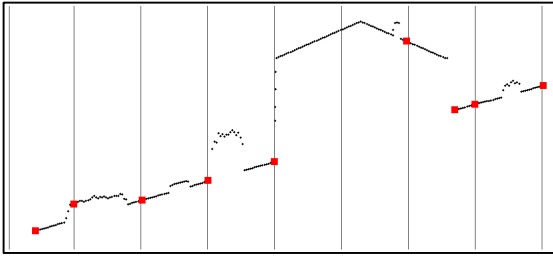
Muita ohjelmia hyödynnettäessä maanpinnan luokittelu ja digitaalisen korkeusmallin (DEM) luonti voi tapahtua myös esimerkiksi seuraavalla *vankaksi interpoloinniksi* kutsutulla tavalla:

Luetaan maanpinta-luokkaan kaikki viimeiset ja ainoat kaiut.

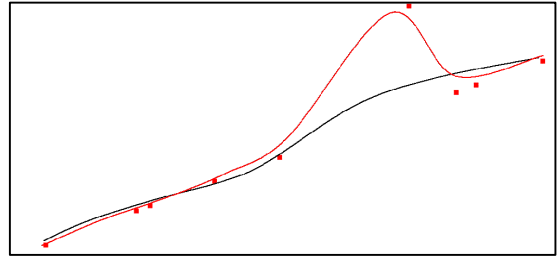
- Muodostetaan pintamalli kaikista maanpinnan pisteistä identtisillä painoituksilla interpoloimalla.
- Lasketaan suodatusarvot (orientoidut etäisyydet pinnasta mitattuun pisteeseen) jokaiselle pisteelle.
- Lasketaan uudet painot jokaiselle pisteelle suodatettujen arvojen avulla. [Kuva 13].

Toistetaan, kunnes iteraatio ei enää muuta vallitsevaa tilannetta. Lopullinen luokitus maanpintaan ja muuhun saadaan asettamalla suodatusarvolle kynnsarvo, jonka ylittävät pisteet poistetaan maanpinta-luokasta [kuva 14], ja suorittamalla iteraatio uudelleen uudella maanpinta-luokalla [kuva 15]. [3, s. 2-3.]

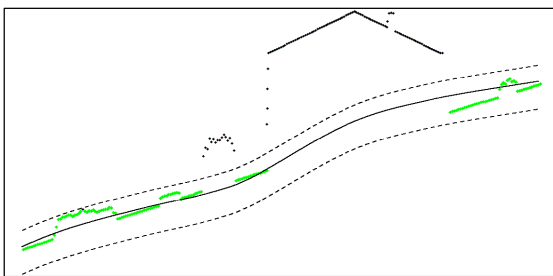
Vankka interpolointi onnistuu, kun alustavassa luokittelussa ei ole liikaa karkeitä virheitä (kasvillisuus, rakennukset yms.). Menetelmää voidaan tehostaa käyttämällä *hierarkista vankkaa interpolointia*, jossa lähekkäisiä pisteitä käsitellään datapyramidien avulla [kuva12]. Muutaman lähekkäisen pisteen matalin piste kuvastaa pistejoukkoa muihin pistejoukkoihin verrattaessa, ja pistejoukkoa käsitellään yhtenä pisteenä. [3, s. 2-3.]



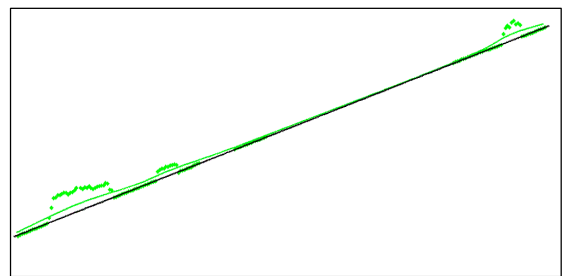
Kuva 12. Datapyramidien luonti [3].



Kuva 13. Kuvassa ensimmäinen ja viimeinen iteraatiopinta. Katolle jäävä piste suodattuu pois. [3]



Kuva 14. Karkea DEM toleranssien kanssa. Kaikki toleranssien väliin jäävät pisteet mukana. [3]



Kuva 15. DEM:n luonti. kuvassa ensimmäinen ja viimeinen iteraatio [3].

### Tiheämpi luokittelu

Tiheämmällä luokittelulla tarkoitetaan maanpinnan muotojen mallintamista sellaisilla parametreilla, jotka tuottavat yksityiskohtaisemman ja korkeusaseman äkillisiä muutoksia paremmin kuvaavan mallin. Nämä parametrit ottavat maanpintaa mallintaessa huomioon ympäristöstään äkillisestikin poikkeavia pisteitä. Tiheää luokittelua tarvitaan teiden, rautateiden ja ojien mallinnuksessa, ja muissa kohteissa, joissa korkeusvaihtelut ovat äkillisiä ja jyrkkiä ja jotka halutaan mallintaa tarkasti. Kyseiset kohteet rajataan maastotietokannan aineistojen avulla levittämällä kohteen keskilinjan kummallekin puolelle tarvittavan leveä puskurivyöhyke (esimerkiksi 3 metriä ojille, 12 metriä rautatielinjalle), tai ne on etsittävä ilmakuvilta tai muuta aineistoa hyödyntäen. Tasaisella maanpinnalla liian tiheä luokittelu saattaa aiheuttaa mittausepävarmuudesta johtuvaa pinnan röpelöisyyttä. [26]



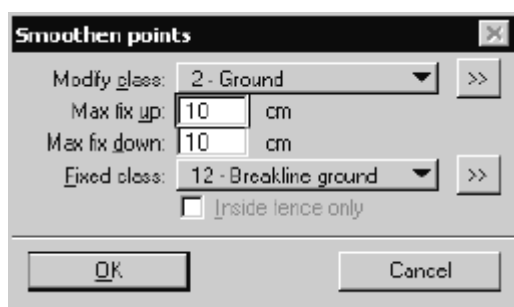
## Harvempi luokittelu

Harvempi luokittelu tarkoittaa maanpinnan mallintamista sellaisilla parametreilla, jotka suodattavat suuremman osan pisteistä pois tuottaen tasaisemman maanpinnan mallin. Harvempi luokittelu soveltuu tasaisemmille ja vähemmän keskeisille alueille. Jyrkkiä korkeusvaihteluita sisältävät pinnanmuodot, kuten tien penkereet ja ojat saattavat jäädä harvemmalla luokittelulla kokonaan mallintamatta algoritmin hylätessä näihin kohteisiin osuneet pisteet. [26]

## Pehmennys

Laserpisteaineisto on tiheää, mutta siinä on paljon kohinaa. Maanpinnan pisteiden korkeusasemaa voidaan muokata tasaisemman ja paremmin pintaa kuvaavan mallin luomiseksi ja kohinan poistamiseksi [33]. Pehmennystä hyödynnetään esimerkiksi havainekuvissa, poikkileikkausten teossa ja pehmeämpien korkeuskäyrien tuottamisessa. [34, s. 133.]

TerraScanilla pehmennys on iteratiivinen prosessi, jossa jokaista pistettä verrataan sen lähipisteisiin. Pisteille sovitetaan taso ja keskimmäisen pisteen korkeutta muokataan vastaamaan tason korkeutta paremmin. [Kuva 16.] Iteraatioprosessin lopuksi ohjelma tarkistaa, onko uusi pinta sileä. Pehmennys suoritetaan vain sileille pinnoille. Pehmennystä ei suoriteta, jos maanpinta on matalan kasvillisuuden peitossa, tai jos aineistosta pyritään mallintamaan kohteita, joiden korkeusvaihtelu on pientä. Esimerkiksi jalkakäytävän reunukset häviävät pehmennyksen tuloksena. [34, s. 133.]



Kuva 16. Pehmennystoiminto TerraScan-ohjelmassa [34].

Parametreinä annetaan korkeusaseman muutoksen enimmäisarvo kumpaankin suuntaan. Lisäksi voidaan myös määritellä pistejoukko, jota käytetään pehmennyksessä apuna mutta jonka korkeusasemaa ei muuteta. [34, s. 133.]

### 8.4.3 Kasvillisuuden luokittelu

Kasvillisuudeksi luokitellaan aluksi kaikki maanpinnan yläpuoliset pisteet. Sitten pisteitä voidaan luokitella eri kasvillisuusluokkiin korkeusasemansa perusteella [kuva 17]. Korkean kasvillisuuden luokkaa voidaan hyödyntää rakennusten, johtojen ja tornien luokittelussa. [34, s. 249.]

The image shows a software dialog box titled "Classify by height from ground". It contains the following fields and options:

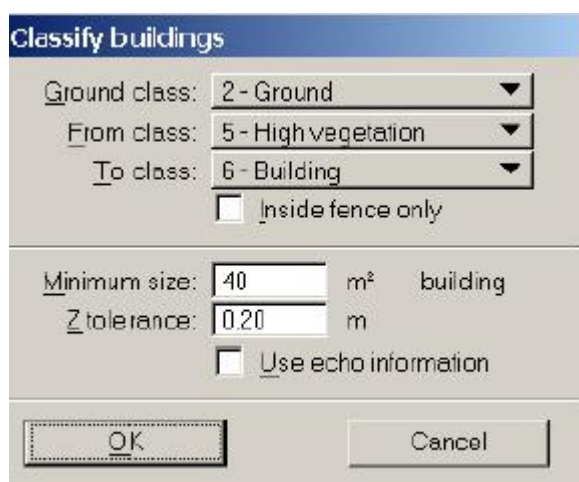
- Ground class:** 2 - Ground (dropdown menu)
- Max triangle:** 100.0 m (text input)
- From class:** 4 - Medium vegetation (dropdown menu)
- To class:** 5 - High vegetation (dropdown menu)
- Inside fence only (checkbox)
- Min height:** 2.00 m (text input)
- Max height:** 999.00 m (text input)
- Buttons:** OK, Cancel

Kuva 17. Kasvillisuuden luokittelu TerraScan-ohjelmassa [34].

### 8.4.4 Rakennusten luokittelu

Rakennukset voidaan luokitella pistepilviaineistosta suhteellisen hyvällä tarkkuudella. Rakennusten ja kasvillisuuden erottamiseksi toisistaan on hyödynnetty paikallista tasomaisuutta, pinnan karheutta, pisteiden intensiteettiarvoja sekä kohteen kokoa ja muotoa. Myös pisteen tietoa siitä, kuinka mones kaiku pulssista on kyseessä ja kuinka monta kaikua pulssista on rekisteröity, voidaan hyödyntää luokittelussa. [11, s. 208.]

TerraScan-ohjelmassa rakennusten katot luokitellaan etsimällä tasomaisia pistejoukkoja sopivalta korkeudelta maanpinnan yläpuolelta. Maanpinnan yläpuoliset pisteet on ensin syytä luokitella korkeusasemansa perusteella matalaan, keskikorkuiseen ja korkeaan kasvillisuuteen, jolloin haku voidaan kohdistaa korkean kasvillisuuden luokkaan välttämättä liian matalalla olevia kohteita. Luokittelussa voidaan hyödyntää myös kaiun ominaisuuksia. Kattopisteille on ominaista, että ne ovat pulssin ainoa kaiku, kun taas puista kimmonneet pisteet ovat usein ”ensimmäinen monesta” tai keskimmäisiä kaikuja. Rakennuksien pisteitä mallinnettaessa [kuva 18] ongelmaksi muodostuu se, että rakennusten harjakatot ulottuvat tyypillisesti seinälinjaa kauemmas, joten varsinkin pienellä keilauskulmalla on vaikeuksia saada tietoa seinälinjasta. [34, s. 265.]

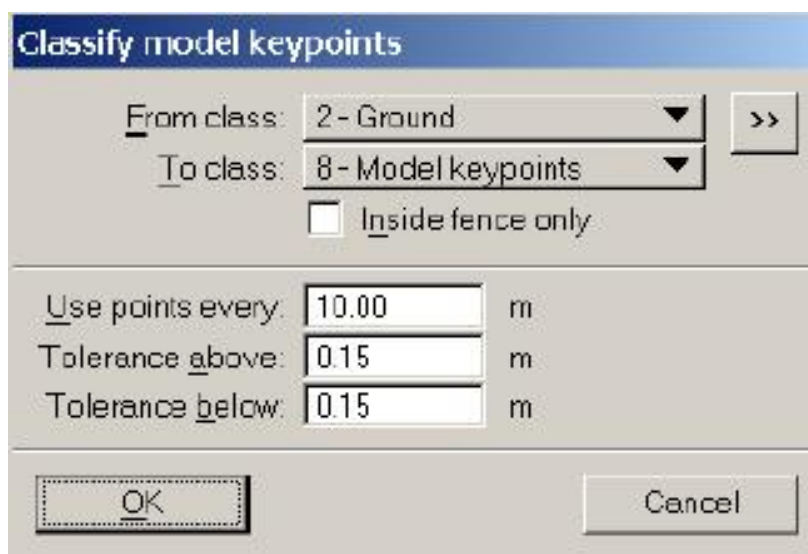


Kuva 18. Rakennuspisteiden luokitteluikkuna TerraScan-ohjelmassa [34].

#### 8.4.5 Pistepilven harventaminen jatkokäsittelyä varten

Usein pistepilvet sisältävät suunnittelukäyttöön tarkoitetuille ohjelmille tarpeettoman paljon aineistoa, joten datan määrää on työn sujuvuuden vuoksi pienennettävä. Pisteaineistoa harvennetaan ennen kaikkea suunnittelun kannalta vähempiarvoisilta alueilta ja pinnoilta, jotka voidaan luotettavasti mallintaa vähemmälläkin aineistomäärällä. Kyseisiä alueita ovat tyypillisesti tasaiset ja säännölliset pinnat, kuten esimerkiksi urheilukentät, pellot ja ruohoalueet. Pistepilven harventamisessa hyödynnetään maanpinnan avainpisteet -toimintoa, jolla haetaan pinnan muotoja parhaiten kuvaavat pisteet. [34, s. 267.]

Maanpinnan avainpisteet [kuva 19] haetaan muodostamalla säännöllinen ruudukko, jossa kunkin rudun ylin ja alin piste luokitellaan avainpisteiksi ja niistä muodostetaan alustava kolmioverkko. Tämän jälkeen haetaan iteratiivisesti lisää pisteitä, jotka ovat annettua toleranssiarvoa kauempana kolmioiden pinnasta. Ruutujen koko annetaan parametrinä, jolloin voidaan varmistaa, että jokaiseen ruutuun osuu ainakin kaksi pistettä. [34, s. 267.]



Kuva 19. Maanpinnan avainpisteiden haku [34].

## 8.5 Ilmakuvat

Laserkeilaushankkeeseen saattavat kuulua myös kartoituskäyttöön tarkoitetut suuriformaattiset ilmakuvat, joilla saadaan kuvattua suuria alueita korkealta lennettäessä, mutta tässä työssä keskitytään pienempiformaattisiin kuviin, jotka usein otetaan samanaikaisesti keilausten kanssa ja joita hyödynnetään varsinkin pisteiden luokitteluun ja tasotarkkuuden parantamiseen.

Ilmakuvaus kuuluu ilmasta tehtävän laserkeilauksen yhteyteen. Kuvauksen yhteydessä tyypillisesti otetaan kuvat pieni- tai keskiformaattisella ilmakuvakameralla ja näistä muodostetaan ortokuvat. Kuvat ovat erittäin tärkeitä pisteiden luokittelussa ja laadunvalvonnassa. Ortokuvia tarvitaan pisteiden tasotarkkuuden kontrolloimiseen ja parantamiseen. [19, s. 37.]

## **Ortokuvat**

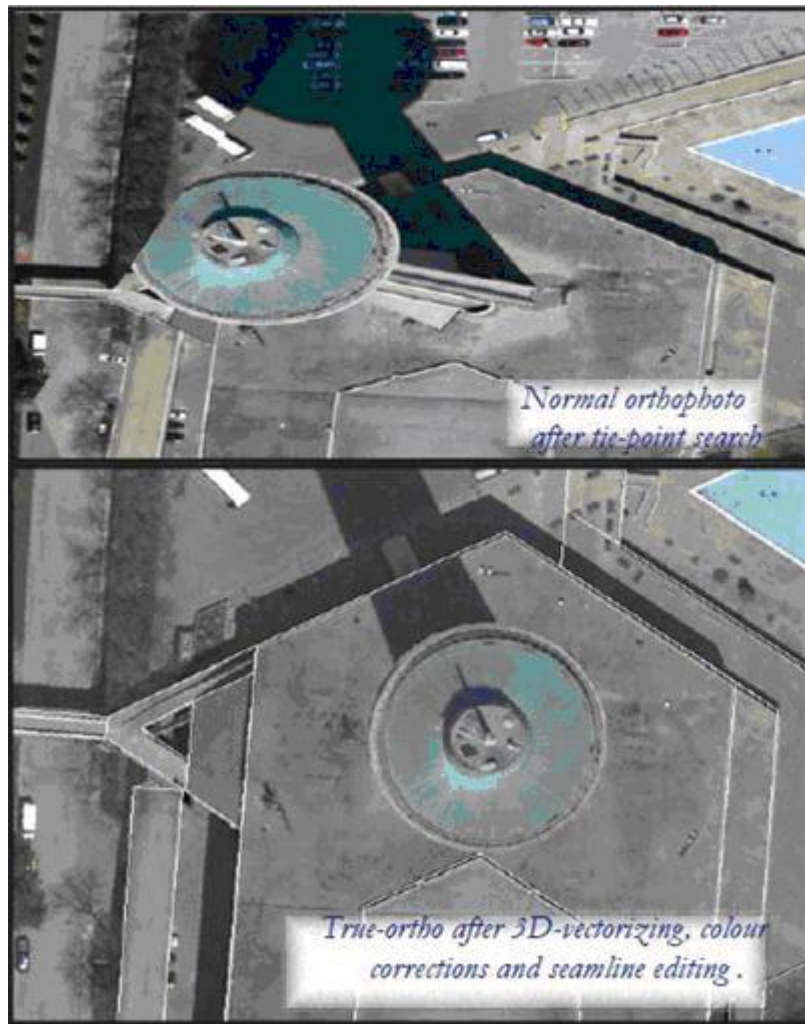
Ortokuva on oikaistu ilmakuva, josta on poistettu maaston korkeuseroista ja keskusprojektiosta johtuvat geometriset vääristymät. Geometrialtaan se vastaa karttaa. Ortokuvia käytetään kartoituksessa sekä ympäristön suunnittelussa ja seurannassa. [31, s. 2.] Ortokuvien tuotanto vaatii yleensä huomattavasti vähemmän aikaa kuin saman alueen laserkeilausaineiston käsittely. [4]

Ilmakuvista voidaan tuottaa ”raakaortokuvat” varsin automaattisesti hyödyntämällä GPS- ja IMU-havainnoista laskettuja kuvanottoaikan koordinaatteja ja automaattisesti luokiteltua maanpintaa. Raakaortokuvia voidaan hyödyntää maanpinnan interaktiivisessa luokittelussa. [31, s. 2.]

Lopulliset ortokuvat vaativat liospisteiden mittauksen ja ilmakolmioinnin. Kuvien väritasapaino täytyy tasoittaa ja kuvien reunakohtia editoida. [31, s. 2.]

Ortokuvien ja laserkeilauksen yhdistämisellä on monia hyötyjä [31, s. 2]:

- Kuvat tukevat luokittelua.
- Laserpisteille voidaan hakea väriarvot ortokuvilta.
- Ortokuvilta voidaan vektoroida piirteitä ja johtaa korkeudet laseraineistosta.
- 3D-kohteita voidaan vektoroida perspektiivikuvista.



*Kuva 20. Ortokuva ja tosiortokuva [30].*

Ortokuvilla korkeat rakennukset kuvautuvat väärään paikkaan maanpinnalle. Tosiortokuva on ortokuva, joka ei hyödynnä pelkästään maanpinnan korkeusmallia, vaan myös rakennusten ja rakennelmien mallia. [Kuva 20.] TerraPhoto-ohjelmalla on mahdollista tuottaa tosiortokuvia hyödyntämällä vektoroitua lasepisteaineistoa tai luokiteltua piste-pilveä. [35, s. 26, 69.]

## **Ortokuvien muodostus**

Ortokuvien muodostus tapahtuu seuraavissa työvaiheissa:

- Projektin määrittely.
- Lentoratojen tuonti projektiin.
- Kuvalistan luonti.
- Thumbnail-versioiden, eli alemman tarkkuustason kuvien luonti.
- Kuvien sävynsäätö.
- Liitospisteiden mittaaminen sekä kameran parametrien validointi ja hienosäätö.
- Uuden kuvalistan luonti liitospisteiden avulla lasketuilla korjauksilla.
- Color point -pisteiden luonti vierekkäisten kuvien sävynsäätöön ja saumojen häivyttämiseen.
- Tiilityksen luonti ja ortokuvien tekeminen.

## **8.6 Laadunvarmistus ja raportointi**

### **Korkeusasema**

Korkeusasema saadaan määritetyksi ja tarkistetuksi tarkasti myös maastossa mitattujen korkeuspisteruudukkojen avulla tasaisilta pinnoilta. Korkeustasoituksessa koko blokkia voidaan liikuttaa korkeussuunnassa. Jos tunnettuja kiintopisteitä on riittävän tiheästi projektin alueelta, saadaan korkeusmallin keskimääräinen tarkkuus arvioitua helposti [kuva 21]. [34, s. 233.]

Korkeustarkkuus määritellään hakemalla jokaista tunnettua kiintopistettä korkeuspistettä lähimmät kolme laserpistettä ja interpoloimalla niistä korkeus pisteen xy-sijainnille. Tuloksena saadaan raportti mallin korkeusaseman poikkeamista todelliseen maanpintaan verrattuna [kuva 22]. [34, s. 233.]

**Output control report**

Process: All blocks

Known points: C:\data\niagara\mission\control\_points.dat

Class: 2 - Ground

Max triangle: 25.0 length

Max slope: 45.0 degrees

Z tolerance: 0.15 m

Kuva 21. Korkeusaseman tarkistus [34].

Use	Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz	Line
<input checked="" type="checkbox"/>	1	655980.63	4770345.25	144.874	144.814	-0.060	2
<input checked="" type="checkbox"/>	2	655995.11	4770371.39	145.532	145.514	-0.018	2
<input checked="" type="checkbox"/>	3	657809.82	4770183.59	140.145	140.048	-0.097	4
<input checked="" type="checkbox"/>	4	657812.06	4770189.40	140.249	140.239	-0.010	4
<input checked="" type="checkbox"/>	5	657814.06	4770194.85	140.155	140.254	+0.099	4
<input checked="" type="checkbox"/>	6	657816.72	4770200.91	140.224	140.269	+0.045	4
<input checked="" type="checkbox"/>	7	657818.42	4770206.24	140.311	140.304	-0.007	4
<input checked="" type="checkbox"/>	8	657527.75	4772082.11	132.033	131.911	-0.122	6
<input checked="" type="checkbox"/>	9	657523.38	4772093.73	131.952	131.996	+0.044	6
<input checked="" type="checkbox"/>	10	657520.61	4772103.73	131.779	131.857	+0.078	6
Average magnitude		0.0576		Average dz		-0.0248	
Std deviation		0.0659		Minimum dz		-0.1230	
Root mean square		0.0689		Maximum dz		+0.0990	

Kuva 22. Korkeusaseman virheraportti [34].

## Tasosijainti

Tasosijainnin määrittäminen on haasteellisempaa kuin korkeustason. Laserkeilan kattama alue voi olla useita kymmeniä senttejä halkaisijaltaan, ja yksittäisten taiteviivojen löytäminen on hankalaa. [8]

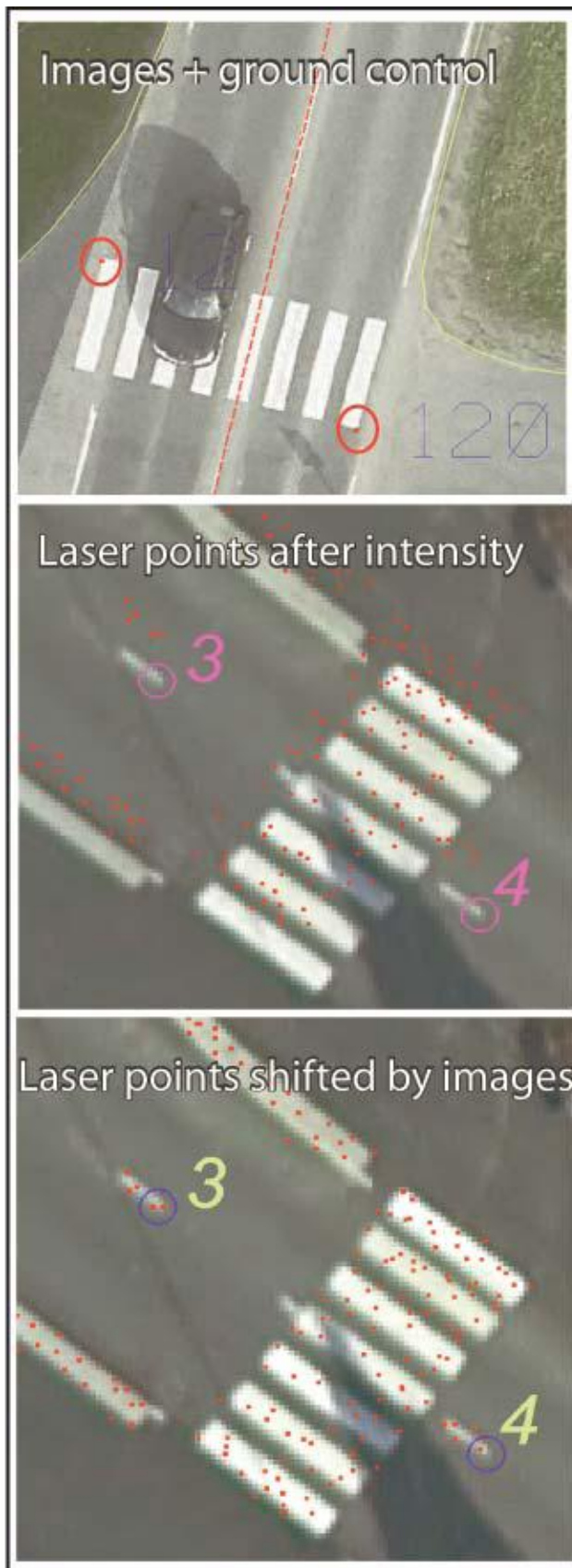


Sopivia kohteita voivat olla esimerkiksi asfalttipinnan vaaleat maaliviivat [31, s. 2–4]. Niiden koordinaatit voidaan hankkia maastomittauksilla, mutta on myös hyvän sisäisen geometrian omaavia ortokuvamosaiikkeja voidaan hyödyntää. [19, s. 37.]

Ortokuvista etsitään kontrollipisteitä, kuten tienpinnan maaliviivoja. Ortokuvat orientoidaan koordinaattien mukaan. Vaaleista maaliviivoista heijastuneiden lasersäteiden intensiteetti-arvo on ympäröivää tienpintaa korkeampi, ja maaliviivojen pisteet voidaan erottaa omaan luokkaansa hakemalla sopiva intensiteetin raja-arvo. Valitut pisteet sovitetaan mitattuihin maaliviivojen koordinaatteihin. [Kuva 23.] [31, s. 2–3.]

Tarkkuutta voidaan arvioida myös vertaamalla mallia ja esimerkiksi maastomittauksilla saatuja tie- tai ratahankkeen poikkileikkauksia. [26]

Laserkeilauksen kalibroinnissa ja tarkkuuden arvioinnissa on mahdollista hyödyntää olemassaolevia mittaustietoja, mutta niiden soveltuvuus on arvioitava tapauskohtaisesti. Esimerkiksi ratahankkeiden yhteydessä on usein mallinnettu radan geometria. Aineistoa olisi mahdollista hyödyntää keilauksen korkeusaseman orientoimiseen, mutta on kuitenkin huomattava, että mallin korkeus on kiskon aluslevyn alapinnasta, eli käytännössä ratapölkyn pinta. Keilatessa saadaan runsaasti osumia ratapölkkyjen väliin, jossa sepeli saattaa olla kuopallaan tai pölkkyjen pinnan tasoa korkeammalla, joten tulosten istuvuudessa voi olla useiden senttimetrien eroja. Lisäksi on huomioitava, että kallistuksissa korkeus on alemman kiskon aluslevyn alapinnasta. [26]



Kuva 23. Pistepilven tasosijainnin korjaus ortokuvien avulla [31].

## 9 Lopputuotteet

### 9.1 Korkeusmalli

Digitaalinen korkeusmalli on laserkeilaushankkeen tyypillinen lopputuote. Korkeusmallia käytetään esimerkiksi rakenne- ja tiesuunnittelussa ja avolouhosten seurannassa. Se voidaan esittää pisteinä, rasterina, kolmioverkkona tai korkeuskäyrinä. [10, s. 14.]

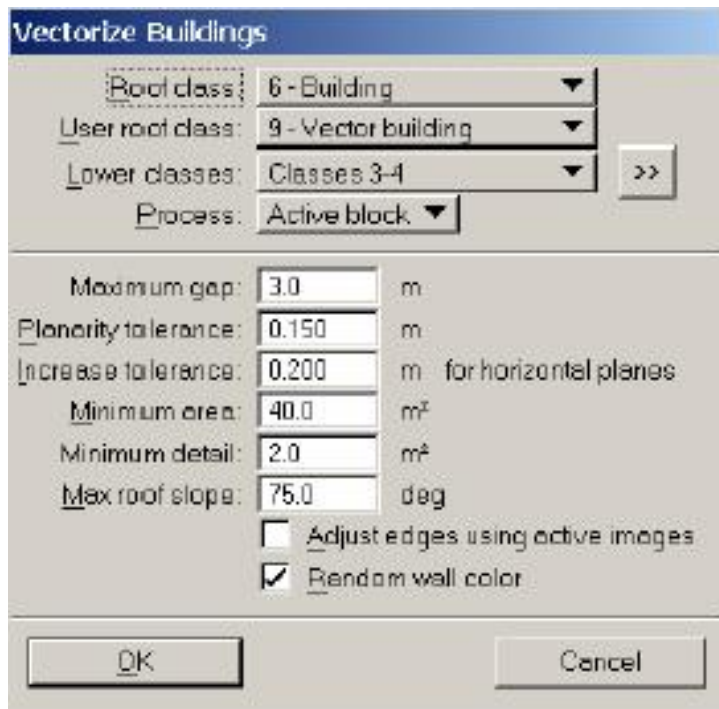
Korkeuskäyrien käyttö ei ole suositeltavaa korkeusmallin siirrossa, sillä korkeuskäyrät on yleensä tarkoitettu visuaaliseen tarkasteluun ja ne ovat huomattavan yleistettyjä ja pyöristettyjä. Visuaalisesti hyvännäköisten, mutta epätarkkojen korkeuskäyrien käyttö korkeusmallissa tuottaa epätarkan korkeusmallin. [19, s. 38-39.]

Rasterin hyvä puoli formaattina on se, että se soveltuu tietokoneprosessointiin ja suurienkin aineistojen prosessointi on suoraviivaista ja helppoa [10, s. 14]. Rasterointi kuitenkin hukkaa osan laserpisteiden informaatiosta [31, s. 3].

Kolmioinnilla saadaan pinnanmuodot paremmin kuvattua ja pinta jatkuu saumattomasti reunojen ylitse. Kolmiopinnat vievät myös vähemmän tilaa tietokoneella kuin rasteriaineistot erityisesti mallin ollessa tiheydeltään epätasainen [10, s. 14]. Usein kolmioinnissa käytetään maanpinnan avainpisteitä, joita on tyypillisesti noin 10 prosenttia kaikista pisteistä [31, s. 3].

### 9.2 Rakennukset

Rakennusten vektorointi TerraScan-ohjelmalla vaatii rakennusten katoille osuneiden pisteiden luokittelun omaan luokkaansa (buildings). Luokittelu voidaan tehdä pelkästään laserpisteaineiston avulla, mutta parempaan lopputulokseen päästään, jos käytettävissä on rakennusten nurkkapisteiden 2D-koordinaatit tai ilmakuvia. Varsinkin ortokuvien avulla saadaan kattojen taiteviivoja paremmin kohdennettua. [34, s. 227.]



Kuva 24. TerraScan-ohjelman rakennusten vektorointi -valikko [34].

Vektorisoinnin parametreinä [kuva 24] annetaan

- kohteiden maksimietäisyys, jota kauempana toisistaan olevat kohteet luokitellaan eri rakennuksiksi
- tasomaisuuden toleranssiarvo
- kahden pinnan yhdistämisen maksimipoikkeama
- rakennuksen vähimmäispinta-ala
- rakennuksen osan vähimmäispinta-ala
- rakennuksen katon suurin kaltevuuskulma

[34, s. 230-231].

Pistetiheys vaikuttaa rakennusten automaattisen digitoinnin tarkkuuteen ratkaisevasti. Suuret rakennukset on mahdollista mallintaa vähäisemmälläkin pistetiheydellä (jopa alle 2 pistettä/m<sup>2</sup>), mutta pienet rakennukset ja yksityiskohdat vaativat korkeampaa tiheyttä. Tarkkojen mallien tuotantoon vaaditaan vähintään kymmenen pistettä neliömetrille. [30, s. 25.]

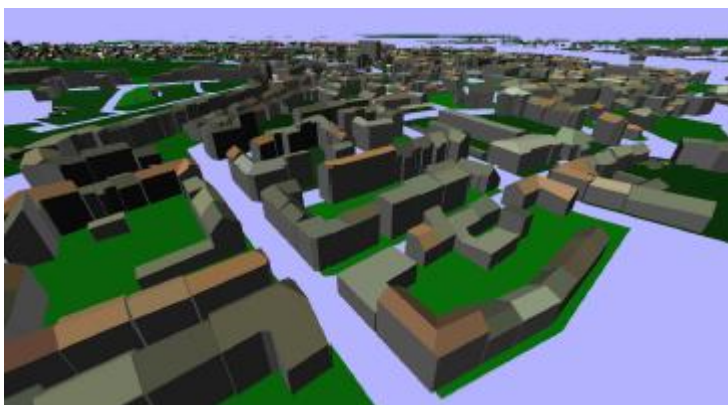
Parhaiten mallinnus onnistuu yksinkertaisille rakennuksille, jotka ovat suorakaiteen muotoisia ja joiden kattorakenne on yksinkertainen [kuva 25]. Mallinnusta vaikeuttavat epäsäännöllinen muoto, katolla sijaitsevat rakennelmat, eri korkeusasemat ja loivasti taivuttavat pinnat [kuva 26]. [30, s. 26–29.] Laserkeilausaineistosta on mahdollista mallintaa kokonaisia kaupunkoja [kuva 27].



*Kuva 25. Helppo mallinnuskohde [30, s. 26].*



*Kuva 26. Erittäin haastava mallinnuskohde [30].*



*Kuva 27. Laserkeilausaineiston perusteella muodostettu kaupunkimalli Aalborgista [22].*

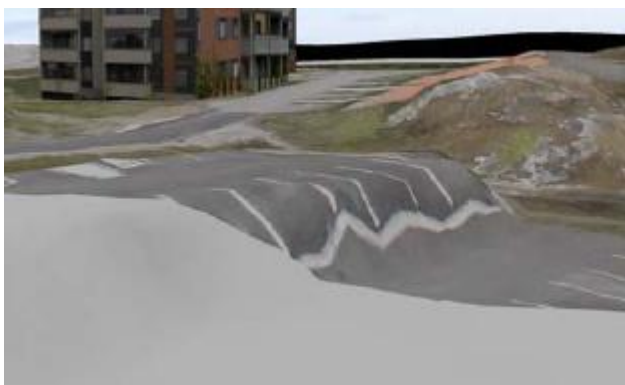


## Pintatekstuuri

Maastomalliin ja rakennusten katoille saadaan pintatekstuuri ortokuvista [kuva 28]. Ortokuvien täytyy kuitenkin olla tarkkoja, sillä pienikin virhe saattaa aiheuttaa malliin suuria vääristymiä [kuva 29]. Rakennusten julkisivujen tekstuurin mallintaminen vaatii usein viistoilmakuvia tai maakuvia, sillä ne eivät yleensä ole kovinkaan hyvin näkyvissä kohtisuoraan ylhäältäpäin otetuilta kuvilta. Viistokuvien hyvä puoli on se, että niiltä näkyy yleensä useita rakennuksia, ja näkymäesteiden, kuten ihmisten, autojen ja kasvilisuuden, haitta on pienempi kuin maakuvissa. Toisaalta maakuvia on helpompi hankkia. [5, s. 5.]



*Kuva 28. Fotorealistinen 3-ulotteinen malli [5].*



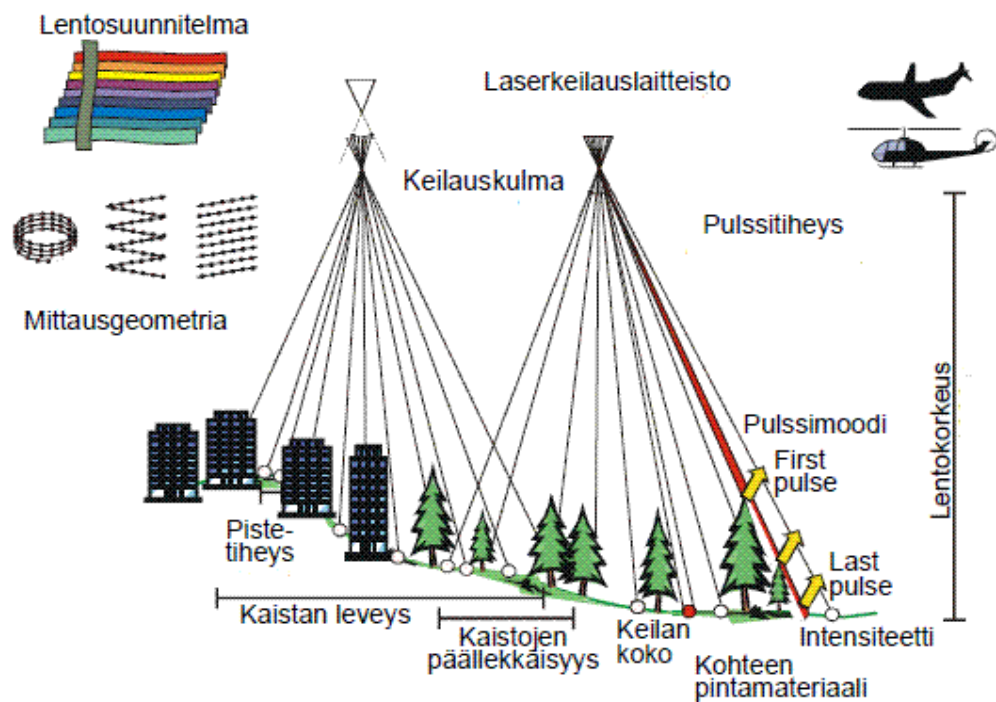
*Kuva 29. Oikaisemattoman ilmakuivan aiheuttama vääristymä malliin [5].*

## 10 Prosessin laatu ja sen varmistus

### 10.1 Lennon ja keilauksen parametrit

Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat laserkeilauslaitteisto, pulssitiheys, pulssimoodi, keilaukulma, keilan koko kohteessa, kohteen pintamateriaali, kaistojen leveys ja päällekkäisyys, pistetiheys, mittausgeometria ja lentosuunnitelma [kuva 20]. Laatu perustuu keilauksen tilaajan asettamiin vaatimuksiin, kuten pistetiheyteen ja -tarkkuuteen, joilla määritellään lennon parametrit. [10, s. 4.]

Lasermittauslaitteistoissa on eroja pulssin toistotaajuuden, kaiun tallentamismuodon, keilan koon ja GPS- ja IMU-järjestelmien välillä, ja nämä vaikuttavat myös lentokorkeuteen [10, s. 4].



Kuva 30. Laserkeilauksen laadun osatekijät [10].

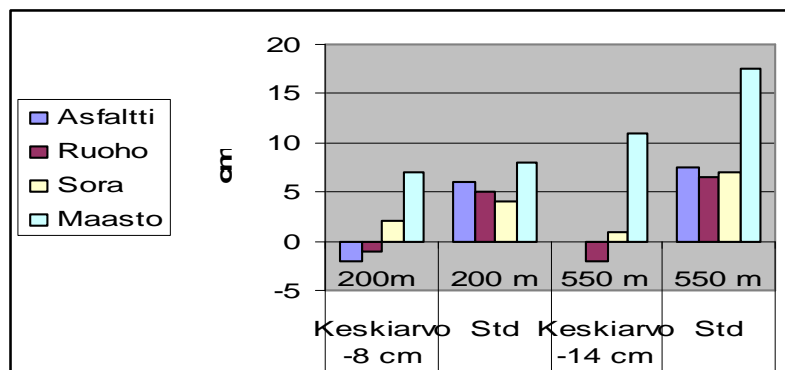


## 10.2 Kohde

Korkeusmallin tarkkuutta arvioitaessa on otettava huomioon, että tarkkuus riippuu vertailupinnasta. Laserkeilaus tuottaa tarkemman korkeusmallin kovalle ja tasaisille pinnoille, joilla ei ole kasvillisuutta. [19, s 37.]

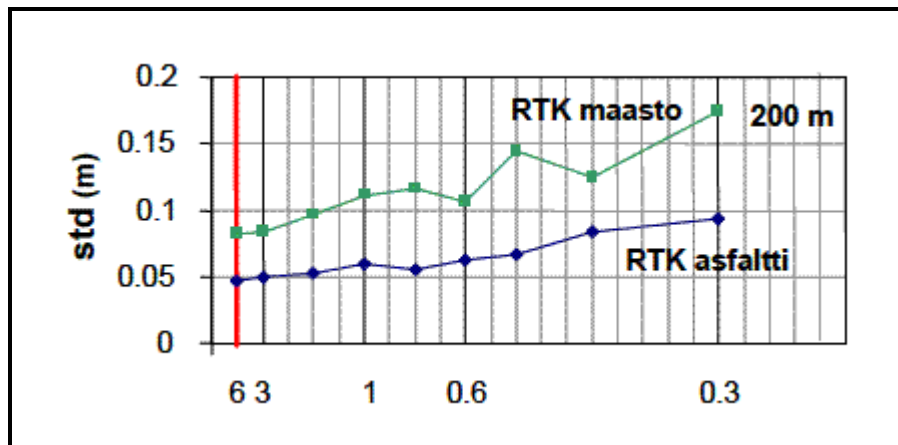
Keilauskohteen pintamateriaali ja -väri vaikuttavat takaisinsirontaan. Laserpulssin nousuaika, jonka aikana sen voimakkuus nousee kymmenestä prosentista 90:een, on noin yksi nanosekunti [12], jonka aikana pulssi etenee noin 30 cm. Voimakkaammin heijastavasta pinnasta heijastunut paluupulssi voi ylittää laitteen rekisteröintikynnyksen aikaisemmin ja aiheuttaa systemaattisen etäisyys siirtymän. Kohteen sisäinen vaihtelu saattaa myös aiheuttaa siirtymää tai satunnaisvirheen kasvua ilmaisukynnyksen ylittyessä jo ensimmäisestä heijastuksesta. Tämä pätee varsinkin ruohikolle ja matalalle kasvillisuudelle. [10, s. 5.]

Hyyppä & Hyyppä analysoivat laserkeilauksen korkeustarkkuutta lentokorkeuden ja pintamateriaalin mukaan. Tuloksista näkyy selvästi kumpuilevan maaston korkeusaseman systemaattinen siirtymä ja tuloksien suuri hajonta verrattuna tasaisempiin pintoihin. [Kaavio 4.] Huomattava on myös korkeusaseman keskimääräinen muutos, vaikka keilaukset on suoritettu vain noin tunnin välein toisistaan. Kyseessä onkin esimerkki eri lentojonojen ja blokkien välisestä korkeustason virheestä, joka on kalibroitava ennen kuin aineistoja voi käyttää yhdessä. [10, s. 6–7.]



Kaavio 4. Erilaisten pintojen vaikutus korkeusmallin epävarmuuteen [10].

Pistetiheyden vaikutus näkyy keskihajonnan lähes kaksinkertaistumisena tiheyden las-  
kiessa kuudesta pisteestä neliömetrillä 0,3:een. Vaikutus on samansuuntainen sekä ko-  
valla asfalttipinnalla että kumpuilevalla maastolla. Kuvassa 31 on esitetty pystyakselilla  
keskihajonnan suuruus metreinä ja vaaka-akselilla pistetiheys (pistettä/m<sup>2</sup>). [10, s. 7.]



Kuva 31. Pistetiheyden vaikutus laserkeilauksen tarkkuuteen [10].

Suurin korkeusaseman määritykseen vaikuttava tekijä on kasvillisuus ja erityisesti puus-  
to. Mittaustarkkuus vaihtelee puuston tiheyden, puulajin, pinnan kaltevuuden ja alus-  
kasvillisuuden mukaan. Suurimmat virheet tapahtuvat tiheissä kuusikoissa, lehtimetsissä  
kesäaikaan ja tuuhean aluskasvillisuuden metsissä. [33, s. 8.]

Käytetyt prosessointimenetelmät vaikuttavat aineistojen laatuun. Aineiston muokkaa-  
minen, siirtely ja harventaminen vaikuttavat myös laatuun. [10, s. 5.]

Laserpisteiden ja ortokuvien sijainnin vertailu on osa pisteiden käsittelyä ja tuotteen  
laadunvalvontaa. Vertailussa ei tutkita yksittäisten pisteiden sijaintia vaan maanpinnan  
maastomallin korkeutta maanpinnan vertailupisteisiin. Vertailupisteitä tulee olla tasai-  
sesti koko kartoitusalueella. Pistepilviä nostetaan tai lasketaan vertailuraportin mukaan  
tarkan lopputuloksen aikaansaamiseksi. [34, s. 233.]

## 11 Esimerkit

### 11.1 Ratahankkeen keilaus välillä Seinäjoki–Kaskinen

#### Suunnittelu

<i>Hankkeen tarkoitus</i>	Tuottaa Seinäjoen–Kaskisen välisen ratayhteyden perusparannuksen suunnitteluun tarkka maastomalli.
<i>Aikataulu</i>	Keilaushanke tuli vireille joulukuussa 2009 edeten nopeasti. Keilaus suoritettiin 17.12.2009. Aineisto toimitettiin Pöyrylle 4.1.2010. Toimitus asiakkaalle tapahtui erissä 15.1. 2010, 5.2.2010 ja 15.3.2010.
<i>Kohdekoordinaatiston valinta</i>	Asiakas halusi osan aineistoa kkj2:ssa ja osan aineistoa kkj1:ssä
<i>Tarvittava pistetiheys</i>	Haluttiin rakennussuunnittelun maastomallia varten riittävästi pisteitä. Sovellettiin ohjeellisesti Tiehallinnon omille linjahankkeilleensa laatimia maastomallin ohjeita, tiheys noin 12 pistettä/m <sup>2</sup> .
<i>Lentokorkeus</i>	Sovellettiin Tiehallinnon ohjeita tiehankkeen laserkeilaukseen ja määriteltiin lentokorkeudeksi 300 m.
<i>Ilmakuvat</i>	Ei tilattu. Asiakas ei pitänyt tarpeellisena.
<i>Lopputuote</i>	Luokiteltu pistepilvi.

[26]

## Tilattavan aineiston määrittely

<i>Pistepilvi</i>	Ellipsoidisella korkeudella, jonojen sovitus tehtynä.
<i>Koordinaatisto</i>	ETRS-TM35FIN. Helpompi käsitellä, kun aineisto oli aluksi samassa koordinaatistossa. Muunnetaan lopuksi kohdekoordinaatistoihin.
<i>Keilauksen toteutus</i>	BlomKartta Oy.
<i>Linjojen suunnittelu</i>	Annettiin aineiston toimittajan suoritettavaksi.
<i>Keilauksen ajankohta</i>	Hanke toteutettiin tilaajan toiveesta erittäin nopealla aikataululla ja kuvauksen ajankohta määräytyi toteuttajan mahdollisuuksien mukaan. Jouduttiin toimimaan hankalissa olosuhteissa eikä voitu suunnitella ajankohtaa lumen, veden ja kasvillisuuden vaikutuksen mukaan.

[26]

## Maastotyöt

<i>Tarkistusmittaukset</i>	Mitattiin korkeusaseman laaduntarkistukseen pisteitä 5 * 5 m:n ruudukoissa kattavasti jonon alueelta ja lisäksi hajapisteitä aluskasvillisuuden vaikutuksen arvioimiseksi. Työhön käytettiin kaksi työviikkoa. [26]
----------------------------	---

## **Aineiston käsittely**

<i>Vastaanottotarkastus</i>	Todettiin aineiston olevan halutussa formaatissa, kattaa pyydetyn laajuuden ja on tarpeeksi tiheä.
<i>Korkeusjärjestelmän muutos</i>	Muunnettiin korkeusjärjestelmä ellipsoidisista korkeuksista ortometrisiin geoidimallin avulla.
<i>Lentojonojen sovitus</i>	Toimittajan tekemä
<i>Luokittelu</i>	Maanpinta luokiteltiin erilaisin parametrein erilaisilta pinnoilta.
<i>Tiheämpi luokitus</i>	Poimittiin maastotietokannasta tiet, ojat ja radat ja ympäröitiin ne sopivan levyisellä vyöhykkeellä: ojat 3 metriä kummallakin puolella, tiet 6, 8, 10 tai 12 metriä, rautatiet 12 metriä ja etsittiin kalliopintoja. Näille vyöhykkeille tehtiin paremmin maanpinnan korkeusvaihteluita huomioiva luokitus, ja muut alueet luokiteltiin harvemmillä parametreilla.
<i>Karkeiden virheiden poisto</i>	Siivottiin pois erilaisia kasoja, kiviä, puupinoja yms.
<i>Maanpinnan avainpisteiden suodatus</i>	Luokiteltiin maanpinnasta oleelliset pisteet suunniteluohjelmistojen käyttöön.

[26]

**Keilauksen tietoja**

<i>Keilauslinjan pituus</i>	112,6 km
<i>Keilauslinjan leveys</i>	200 m
<i>Pistetiheys</i>	noin 11 pistettä/m <sup>2</sup>
<i>Keilausalusta</i>	helikopteri

[26]

**Projektissa ilmenneitä ongelmia**

Keilaus suoritettiin kartiomaisella keilaimella, jolloin saatiin havaintoja sekä eteen, että taakse. Lentolinjojen reunoilla lähekkäisillä pisteillä oli useiden senttimetrien korkeuseroja ilmeisesti eteen- ja taaksepäin suuntautuvien pisteiden välillä. Lisäksi yhdellä lentojonolla ratapenkka oli kuvautunut liian kapeana, mikä johtui toimittajan puutteellisesta heading-kierron korjauksesta. Keilauslaitetoimittaja toimitti makro-ohjelman, joka korjasi virheet. [26]

Tilaaajan kiireistä johtuvan varsin nopean toteutuksen takia maastomittaukset ajoittuivat kovien pakkasten aikaan, jolloin maassa oli myös lähes metri lunta, mikä häytti mittauksen suorittamista. Mittauspisteväliä harvennettiin aikataulussa pysymiseksi ensimmäisten mittausten osoittaessa mallin korkeustarkkuuden hyväksi. [26]



Keilaus on suoritettu noin 2 000 metrin korkeudesta, jolloin keilan leveys maassa on noin 60 senttimetriä. Mallin tiheydeksi on määritelty vähintään puoli pistettä neliömetrille ja keilauksessa on käytetty tarkkuusvaatimuksena korkeusaseman keskivirheenä enintään 15 senttimetriä ja tasossa yksiselitteisellä pinnalla enintään 60 senttimetriä. Näillä arvoilla saavutetaan interpoloidulle mallille tarkkuudeksi 30 senttimetriä. [13]

Keilaaja toimittaa Maanmittauslaitokselle georeferoidun pistepilviaineiston TM35-karttalehdittäin, jonka jälkeen aineistolle suoritetaan laaduntarkastus ja automaattinen maanpinnan luokittelu kahden viikon kuluessa. Tämän jälkeen maanpintaluokitusta parannetaan stereokuvien avulla, ja aineistosta maskataan maastotietokannan avulla vesialueet, jotka luetaan omiin luokkiinsa vaka- ja virtavesiksi. Vakavesien korkeus tasoitetaan vielä pistepilven keskiarvoon. Lisäksi siltoja edustavat pisteet luokitellaan omaan luokkaansa. Lopuksi lasketaan lopullinen korkeusmalli. [20]

Yksi operaattori käsittelee päivässä alueesta riippuen noin 12 neliökilometriä. Tällöin kokonaisen 1 152 km<sup>2</sup>:n tuotantoalueen käsittely veisi yhdeltä operaattorilta neljästä viiteen kuukautta. [20]

### **Laserkeilauspistepilvi**

Laserkeilauspistepilviä on saatavana LAS-formaatissa 3\*3 kilometrin kokoisina TM35-karttalehtijaon mukaisina karttalehtinä ja tuotantoalueittain 1 152 neliökilometriä kattavina alueina. Aineistoa saa automaattisella maanpinnanluokittelulla tai jatkoluokiteltuna maanpintaan, vakavesiin, virtavesiin ja siltoihin. [13]

Laserkeilausaineisto toimitetaan TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä ja N2000-korkeusjärjestelmässä, rasteroitu korkeusmalli myös YKJ/N60-järjestelmissä. [39]



### **Korkeusmalli**

Laserkeilaukseen perustuvaa korkeusmallia oli 17.12.2009 valmiina vain Oulun ja Imatran seuduilta [13].

### **Aineiston hinta**

Korkeusmallin hinta on hyvin edullinen. Korkealta keilatessa lentojonojen määrä on minimoitu ja suuri aineistomäärä takaa pienet kustannukset pinta-alayksikköä kohti. Korkeusmallin arvonlisäveroton hinta sadalle neliökilometrille on 13,50 € [14]

## 12 Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena on ollut luoda ilmasta käsin tapahtuvasta laserkeilaushankkeesta konsulttiyrityksen näkökulmasta kattava prosessikuvaus, jota voitaisiin hyödyntää tulevaisissa ilmalaserkeilaushankkeissa. Työn lähteinä on käytetty keskusteluja Pöyry Finlandin henkilökunnan kanssa, TerraScan-ohjelman käyttöohjeita sekä useita aihetta käsitteleviä julkaisuja.

Työssä todettiin ilmalaserkeilaushankkeen koostuvan viidestä työvaiheesta, joita ovat suunnittelu, keilaus, maastomittaukset, laserpisteaineiston käsittely ja lopputuotteiden valmistus, jotka keilausta lukuunottamatta kuuluvat kailausyrityksen tehtäviin. Työssä on avattu edellämainitut työvaiheet ja selitetty niihin sisältyvät toimenpiteet.

Työtä laadittaessa ongelmaksi muodostui se, että monissa alan julkaisuissa keskitytään hyvin kapea-alaisesti johonkin tiettyyn osa-alueeseen, mikä tekee kokonaiskuvan saamisesta vaikeaa. Toisaalta taas osa artikkeleista antaa vain hyvin yleispiirteisen kuvauksen prosessista keskittyen suoraan menetelmällä saatujen tulosten hyödyntämiseen tietyssä projektissa.

Työtä olisi voinut jatkaa tutkimalla enemmän lopputuotteiden valmistusta. Voitaisiin tutkia esimerkiksi rakennus- ja kaupunkimallien luontia laserkeilausaineistosta, niiden tarkkuutta ja kuva-aineiston hyödyntämistä niiden kanssa. Myös laserkeilauksen tarkkuutta ja sen muodostumista voitaisiin tutkia enemmän.

## Lähteet

- 1 Airaksinen, Markku., Honkanen, Mikko., Läätö, Maija., Tammi, Jarkko. & Sirkiä, Olli. Tuottoarvomenetelmän käyttö arviointi- ja tilusjärjestelytoimitusten metsänarvioinnissa. Maanmittauslaitos, kehittämiskeskus Maanmittauslaitoksen julkaisuja nro 110. 2009
- 2 Briese, C., Mandlburger, G. & Pfeifer, N. Airborne Laser Scanning - High Quality Digital Terrain Modelling. Vienna University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. 2007.
- 3 Briese, C., Pfeifer, N. & Dorninger, P. Applications Of The Robust Interpolation For DTM Determination. Vienna University of Technology, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing. 2010.
- 4 Digitaalinen kuvantuotanto. (WWW-dokumentti.) Maanmittauslaitos. <<http://www.maanmittauslaitos.fi/default.asp?id=983>> Luettu 3.4.2010.
- 5 Erving, Anna. Citygml Mallinnus Fotogrammetrisesti. Maanmittaustieteiden Seura ry:n julkaisu n:o 44. 2007.
- 6 Flight dynamics. (WWW-dokumentti.) Wikipedia, käyttäjänimi ZeroOne <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Flight\\_dynamics\\_with\\_text.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Flight_dynamics_with_text.png)> Luettu 31.3.2010.
- 7 Gerlach, Christian. Dorobantu, Raul. Ackermann, Christian. Kjösвик, Narve. Boedecker, Gerd. Gravimetri med treghetssystemer: Oversikt og testresultater. Kart og plan, 1/2010, s. 46–59.
- 8 Haggrén, Henrik. Fotogrammetrinen kartoitus, luento 13 Uudet 3D kartoitustekniikat. Luentomoniste. Teknillinen korkeakoulu. 2002.

- 9 Hyypä, Juha & Hyypä, Hannu. Laserkeilauksen kansalliset mahdollisuudet. *Maankäyttö* 1/2007, s. 6–8.
- 10 Hyypä, Hannu & Hyypä, Juha. Laserkeilauksen laatu ja sen osatekijät. *Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu* 40. *Maanmittaustieteiden päivät*. 2003.
- 11 Hyypä, J., Wagner, W., Hollaus, M. & Hyypä H. Airborne Laser Scanning. Teoksessa Warner, T., Nellis, M. & Foody, G. (eds.). *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, SAGE publications ltd. London. 2009.
- 12 Hyypä, Juha. Laserkeilaus. (WWW-dokumentti.) Geodeettinen laitos. <[http://www.fgi.fi/osastot/projektisivut/kk\\_www\\_portaali/rswww/laser.html](http://www.fgi.fi/osastot/projektisivut/kk_www_portaali/rswww/laser.html)> Luettu 10.3.2010.
- 13 Maanmittauslaitoksen laserkeilausalueet 2009. Maanmittauslaitos. 2009.
- 14 Maanmittauslaitoksen tuottamien ja välittämien suoritteiden hinnasto. Maanmittauslaitos. 2009.
- 15 Majuri, Hannu. Laserkeilaus maastomallinnuksessa. *Vesitalous*, 6/2003, s. 37–40.
- 16 Morin, Kris & Ee-Sheimy, Naser. Post-mission Adjustment Methods of Airborne Laser Scanning Data. FIG XXII International Congress, Washington, D.C. 2002.
- 17 Kaasalainen, Sanna, Kaartinen, Hannu & Kukko, Antero. Snow Cover Change Detection With Laser Scanning Range And Brightness Measurements. *Cold Regions Science and Technology*, Vol 54, Issue 3. 2008, s. 133–141.
- 18 Konsultti. (WWW-dokumentti.) Wikipedia. <<http://fi.wikipedia.org/wiki/Konsultti>> Luettu 13.3.2010

- 19 Korpela, Hannu. Laserkeilaus, kannattavampaa käytön yleistyessä. Maankäyttö 2/2008, s. 36–39.
- 20 Laaksonen, Heli. Paikkatietoasiantuntija, Maanmittauslaitos. Sähköpostikeskustelu 4.3.2010.
- 21 Laserkeilaus aluekartoituksessa. (WWW-dokumentti.) TerraSolid. <[http://www.terrasolid.fi/system/files/Laserkeilaus\\_aluekertoituksessa\\_FIN.pdf](http://www.terrasolid.fi/system/files/Laserkeilaus_aluekertoituksessa_FIN.pdf)> Luettu 15.3.2010.
- 22 Overby, J, Bodum, L., Kjems, E. & Ilsøe, P. Automatic 3d Building Reconstruction From Airborne Laser Scanning And Cadastral Data Using Hough Transform. Centre for 3DGI, Aalborg University.
- 23 Paikkatieto. (WWW-dokumentti.) Pöyry Finland Oy. <[http://www.poyry.fi/Toimialat\\_ja\\_palvelut/Vesi\\_ja\\_ymparisto/Paikkatieto\\_GIS\\_.html](http://www.poyry.fi/Toimialat_ja_palvelut/Vesi_ja_ymparisto/Paikkatieto_GIS_.html)> Luettu 15.3.2010.
- 24 Poutanen, Markku (toim.). Maan muoto. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, 2003.
- 25 Poutanen Markku. GPS-paikanmääritys. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa, 1998.
- 26 Pöyry Finland Oy, Vantaa. Keskustelu yrityksen henkilökunnan kanssa. 26.2.2010.
- 27 Pöyry lyhyesti. (WWW-dokumentti.) Pöyry Finland Oy. <[http://www.poyry.fi/Poyry\\_lyhyesti/Poyry\\_Suomessa.html](http://www.poyry.fi/Poyry_lyhyesti/Poyry_Suomessa.html)> Luettu 15.3.2010.

- 28 Riihimäen keskustan yksityiskohtainen tulvavaarakartta. (WWW-dokumentti.) Suomen ympäristökeskus.  
<<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=63136&lan=fi>> Luettu 27.3.2010.
- 29 Rönholm, Petri & Haggren, Henrik. Fotogrammetrian yleiskurssi, Luento 10 Optinen 3D-mittaus ja laserkeilaus. Luettu 29.3.2010
- 30 Salolahti, Mika. Laserkeilaus ja sen käyttömahdollisuudet. Terrasolid, esite. Helsinki. 2010.
- 31 Soininen, Arttu & Korpela Hannu. Processing of Airborne Laser Data and Images – Versatile products through skilled processing. GIS development magazine 10/2007.
- 32 Soininen Arttu. Laserkeilauksen sovellusalueet. Maanmittaustieteiden seuran julkaisu 40. Maanmittaustieteiden päivät. 2003.
- 33 Soininen, Arttu. Maastomallien tuotanto LIDAR aineistosta. (WWW-dokumentti.) TerraSolid.  
<[http://foto.hut.fi/seura/tapahtumia/kkp07/esitelmat/pea7\\_soininen\\_maastomallien\\_tuotanto\\_s2.pdf](http://foto.hut.fi/seura/tapahtumia/kkp07/esitelmat/pea7_soininen_maastomallien_tuotanto_s2.pdf)> Luettu 4.3.2010.
- 34 Soininen, Arttu. TerraScan user's guide. 2010.
- 35 Soininen, Arttu. TerraSolid. TerraPhoto User's guide. 2009.
- 36 Suominen, Tauno. Laserkeilaus helikopterista suunnitteluhankkeilla. Maankäyttö 1/2001, s. 23–26.
- 37 Tiensuunnittelun laatujärjestelmä – Maastotietojen hankinta. Tiehallinto, toimintaohjeet. 2002.

- 38 Uusi valtakunnallinen korkeusmalli laserkeilaamalla. (WWW-dokumentti.) Maanmittauslaitos.  
<[http://www.maanmittauslaitos.fi/Tietoa\\_maasta/Ilmakuvaus/Uusi\\_valtakunnallinen\\_korkeusmalli\\_laserkeilaamalla/](http://www.maanmittauslaitos.fi/Tietoa_maasta/Ilmakuvaus/Uusi_valtakunnallinen_korkeusmalli_laserkeilaamalla/)> Luettu 3.3.2010.
- 39 Uusi valtakunnallinen korkeusmalli laserkeilaamalla. (WWW-dokumentti.) Maanmittauslaitos. <<http://www.maanmittauslaitos.fi/default.asp?id=1235>> Luettu 1.3.2010.
- 40 Valtakunnallisen korkeusmallin uudistamistarpeet ja -vaihtoehdot. Maa- ja metsätalousministeriö. Helsinki. 2006.

