

Mikko Kantonen

Laserkeilauksen hyödyntäminen Tuusulan  
kunnassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

11.9.2014

Tekijä Otsikko	Mikko Kantonen Laserkeilauksen hyödyntäminen Tuusulan kunnassa
Sivumäärä Aika	56 sivua 11.9.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	lehtori Jussi Laari maanmittausinsinööri Saara Patronen
<p>Opinnäytetyössä selvitetään laserkeilauksen hyötyjä ja käyttömahdollisuuksia Tuusulan kunnassa. Työssä keskitytään enimmäkseen ilmalaserkeilaukseen sekä perehdytään laserkeilauksen perusperiaatteisiin ja virhelähteisiin. Ilmalaserkeilausta käsitellään tilaajan kannalta ja pyritään näin edistämään laserkeilausaineistojen hyödyntämistä tulevaisuudessa.</p> <p>Työssä esitellään laserkeilauksen käyttökohteita tarkemmin korkeuskäyrien, tulvakartoituksen, tilavuuslaskennan, maastokohteen seuraamisen, infrarakentamisen ja 3D-visualisoinnin näkökulmasta. Kunnan kaavoittajille toteutettiin 3D-visualisointi uudesta kaava-alueesta ja ohjeet vastaavan visualisoinnin tekemiseen. Työssä selvitettiin myös N2000-muunnosta varten menetelmiä uusien korkeuskäyrien valmistamiseen ja kohti tulleet ongelmia aineistojen käsittelyssä.</p> <p>Korkeuskäyrät vaativat runsaasti käsittelyä ennen kuin niitä voidaan käyttää pohjakartalla. Korkeuskäyrät pyrittiin saada mahdollisimman oikeanlaisiksi ohjelmien automaation avulla. Automaatiota voidaan tehdä vain tiettyyn pisteeseen saakka ja loput virheet tulee korjata manuaalisesti karttojen ylläpitotyön ohella.</p>	
Avainsanat	laserkeilaus, virhelähteet, käyttömahdollisuudet, 3D-visualisointi, korkeuskäyrät

Author	Mikko Kantonen
Title	Utilization of Laser Scanning in Tuusula
Number of Pages	56 pages
Date	11 September 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Jussi Laari, Senior Lecturer Saara Patronen, Surveyor
<p>In this thesis the benefits and the use of laser scanning in Tuusula is analysed. The thesis mostly focuses on the basics of aerial laser scanning with error source analysis. The benefits of aerial laser scanning are considered from the buyer's perspective and the objective is to promote the use of laser scanning data in the future.</p> <p>Different ways of using laser scanning data are presented in the thesis, where flood analysis, contour production, volume measurement, change detection, municipal engineering and 3D-visualisation are explained in more detail. 3D-visualization and visualization instructions were made for a new planning area in Tuusula. The study also examined techniques for making new automated contours from laser scanning data.</p> <p>The contours required a great deal of processing before they could be used in the map. The contour production can be automated to a certain extent, but eventually manual editing has to take place in the production process.</p>	
Keywords	aerial laser scanning, principles of laser scanning, laser scanning error analysis, 3D-visualisation, contour production

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Yleistä laserkeilauksesta	1
1.1	Laserkeilauksen historia	1
1.2	Laserkeilauksen hyödyt	1
1.3	Laserkeilauksen ongelmat	2
1.4	Tilaaajan kannalta tärkeää	4
1.5	Kustannustehokkuus	5
2	Laserkeilaimen toimintaperiaate ja luokittelu	6
2.1	Laserin perusteet	6
2.2	Laserkeilaimen ominaisuuksia	7
2.3	Laserkeilaintyytit	8
2.3.1	Ilmalaserkeilaus	8
2.3.2	Maalaserkeilaus	10
2.3.3	Mobiililaserkeilaus	10
2.4	Laserkeilaimen mittaustyytit	10
2.4.1	Pulssi- eli aikaerolaserit	10
2.4.2	Vaihe-erolaserit	11
2.4.3	Täysi aallonmuoto (full-waveform)	12
2.4.4	Paluupulssit ja -kaiut	13
2.4.5	Optiseen kolmionmittaukseen perustuva laser	14
2.5	Peilijärjestelmät	15
2.5.1	Heiluva oskilloiva peili	15
2.5.2	Pyörivä monikulmio peili	15
2.5.3	Palmer-skanneri	15
2.5.4	Valokuitiskanneri	16
2.5.5	Flash-lidar	16
3	Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät	17
3.1	Pistetiheys	19
3.2	Keilauskulma ja lentokorkeus	20
3.3	Mittausvälineiden sisäinen tarkkuus ja kalibrointi	20
3.4	Paluusignaalin intensiteettiarvo	21
3.5	Laserjalanjälki	22
3.6	Keilausgeometria	23

3.7	Pintamateriaali	23
3.8	Peitteisyys	24
3.9	Lentojonojen väliset virheet	24
4	Pistepilven laadunvarmistus	26
4.1	Pistepilven kalibrointi	26
4.2	Pistepilven laaduntarkistus	26
4.3	Maastomallin laaduntarkistus	26
5	Pistepilven käsittely	27
5.1	Pistepilven kalibrointi ja koordinaattimuunnos	28
5.2	Pistepilven luokittelu	28
5.2.1	Maanpinnan alapuoliset pisteet (low points)	29
5.2.2	Maanpinnan pisteet	29
5.2.3	Kasvillisuuspisteet	29
5.2.4	Manuaalisesti luokiteltavat pisteet	29
5.2.5	Rakennuspisteet	30
6	Pistepilven käyttökohteet	30
6.1	Korkeuskäyrät	31
6.2	Tilavuuslaskenta	37
6.3	Tulvakartoitus	38
6.4	Maastokohteen muuttumisen seuraaminen	41
6.5	Infrarakentaminen	43
6.6	Kaavoituksen 3D-visualisointi	44
7	Maastomittaukset	50
	Lähteet	53

## Lyhenteet

<b>Bufferi</b>	Bufferi on paikkatieto-ohjelmissä käytettävä sanonta elementin ympärille tehdystä alueesta.
<b>Kantakartta</b>	Kantakartalla esitetään kaikki rakentamiselle ja suunnittelulle tärkeät elementit, kuten kiinteistöt, liikenneväylät ja rakennukset.
<b>Kaukokartoitus</b>	Kohteen tutkimista ja mittaamista koskematta siihen. Kartoittamisessa hyödynnetään yleensä sähkömagneettista säteilyä.
<b>Keilauskulma</b>	Kulma, jonka keilain mittaa. Ilmoitetaan poikkeamana nadiirista.
<b>Korkeusmalli</b>	Maanpinnan korkeutta kuvaava malli
<b>Maastomalli</b>	Maanpintaa kuvaava topografinen malli.
<b>Ortoilmakuva</b>	Korkeusmallin avulla karttaprojektioon oikaistu ilmakekuva.
<b>Pintamalli</b>	Pintamalli on rautalankamalli , joka kuvaa kohteen muotoja.
<b>Rasteri</b>	Rasteri on kuvamuotoista paikkatietoaineistoa.
<b>Vektori</b>	Esittää paikkatiedon koordinaattien avulla pistemäisinä kohteina, useampien pisteiden yhdistävinä viivoina tai viivojen rajaamina alueina.

## 1 Yleistä laserkeilauksesta

Laserkeilauksella tuotetaan maastosta tai tutkittavasta kohteesta kolmiulotteista paikatieta. Laserkeilauksen perusidea on yksinkertainen. Laserkeilain lähettää laserpulssein kohteeseen ja sensori mittaa laserpulssin kulkeman ajan keilaimesta kohteeseen ja takaisin. Laserpulssin kulkeman ajan perusteella lasketaan etäisyys kohteeseen. Kun laserkeilaimen paikka ja kallistuma tunnetaan tarkasti, voidaan mitatulle kohteelle laskea koordinaatit. Jokaisen laserpulssin kulkeman ajan ja lähtösuunnan avulla jokaiselle pisteelle saadaan laskettua x-, y-, ja z-koordinaatit. Jokaisesta laserpulssista tallentuu myös kohteen intensiteettitieto, eli pulssin voimakkuus. Intensiteettitiedolla saadaan tunnistettua ja eroteltua eri pintamateriaaleja toisistaan. [19, s. 1.]

Laserkeilaamalla mitattua pisteaineistoa kutsutaan pistepilveksi. Pistepilvi kiinnitetään maaston referenssipisteiden avulla koordinaattijärjestelmään. Pistepilvelle tehdään automaattisia korjauksia ja pisteluokitteluita ennen kuin aineistoa voidaan tehokkaasti hyödyntää. Pistepilvestä tuotetaan useimmiten lopputuotteena jonkinlainen pintamalli maanpinnasta tai muista kohteista.

### 1.1 Laserkeilauksen historia

Ensimmäiset säteilyn kulkemaa matka-aikaa mittaavat radiotekniset mittausslaitteet käyttivät radioaaltoja kohteen etäisyyden ja muodon selvittämiseen. Radioteknistien mittausslaitteiden kehittäminen alkoi 1880-luvulla, joiden tulosten avulla kehitettiin myöhemmin radioaaltotutkat. Laserilla toimivien mittauskojeiden kehittäminen alkoi 1950-luvulla, jonka avulla päästiin radioaaltomittausta selvästi tarkempiin mittaustuloksiin ja laadukkaampaan kohteen muodon muodostamiseen. Kaikkien kaukokartoitusinstrumenttien teoreettinen toimintatapa on samanlainen. Mittauslaitteet käyttävät elektromagneettista säteilyä kohteen mittaamiseen ja tutkimiseen.

### 1.2 Laserkeilauksen hyödyt

Fotogrammetriseen mittaukseen verrattuna laserkeilauksella saavutetaan huomattavasti suurempi pistetiheys ja mittaustavan etuna on myös sääolosuhteiden pienempi merkitys mittausten suorittamiseen ja tarkkuuteen. Fotogrammetriassa peitteisiltä alu-

eilta saadaan hajapisteitä mitattua vain kymmenien metrien välein. Laserkeilauksella saavutetaan peitteisilläkin alueilla useita pisteitä neliometriä kohdin. Peitteisillä alueilla laserkeilauksella tuotettu maastomalli on ylivoimainen, koska laserpulsit tunkeutuvat kohtuullisen hyvin kasvillisuuden läpi verrattuna muihin mittaustapoihin. [18, s. 7.]

Perinteisessä fotogrammetrisessä stereokartoituksessa korkeusmalli tuotetaan stereoilmakuvista, joista sama kohde voidaan mitata kahdelta eri kuvalta [18, s. 7]. Stereokartoituksen haasteena ovat peitteiset alueet, kuten metsät, joiden alueelta ei voida mitata tarkasti maanpinnan korkeutta. Laserkeilauksen etuna stereokartoitukseen pidetäänkin sen mittaustarkkuutta peitteisillä alueilla, sillä säteet tunkeutuvat kohtalaisen hyvin metsäiseen alueeseen. Laserkeilaimen nopeasti ja laajasti keräämän korkeustiedon lisäksi keilain kerää kolmiulotteista tietoa kaikista maanpäällisistä kohteista, kuten rakennuksista ja metsistä. [7, s. 1–2.] Laserkeilaamalla saadaan tuotettua tarkimmat korkeustiedot digitaalisiin pintamalleihin ja muihin mittaustapoihin verrattuna kaikista mittaustavoista nopeimmin ja tarkimmin sekä suuremmille alueille kustannustehokkaimmin [26, s. 2]. Laadukkaat pistepilviaineistot mahdollistavat maastotöiden määrän karsimista, koska tarvittavat mittaustulokset saadaan yleensä suoraan laserkeilausaineistosta.

Ilmalaserkeilauksella päästään helikopterilla mitattaessa senttimetrien korkeus- ja tasotarkkuuteen sekä yli 50 pisteeseen neliometrillä. Lentokoneesta laserkeilaamalla saadaan suurempi alue mitattua nopeasti ja tarkkuus vaihtelee 0,05–0,20 metrin korkeustarkkuuden ja 0,20–1,00 metrin tasotarkkuuden välillä. [1, s. 35.]

Laserkeilain tuottaa ja lähettää aktiivisena sensorina itse tarvitsemansa energian, jota tarvitaan kohteen mittaamiseen ja havaitsemiseen. Laserkeilausmittauksia voidaan suorittaa fotogrammetriasta poiketen myös yöaikaan eikä auringonvalosta varjostuneet alueet haittaa mittausten laatua. [7, s. 1–2.]

### 1.3 Laserkeilauksen ongelmat

#### *Uusi mittausten menetelmä*

Laserkeilaus on vasta yleistymässä maanmittauskäytössä, jolloin alan toimijat ovat vielä kohtalaisen tietämättömiä uudesta tekniikasta. Laserkeilauksen perusteet saate-



taan tietää hyvin, mutta uuden tekniikan mahdollistamista käyttökohteista ja mahdollisuuksista tiedetään kohtalaisen vähän.

Laserkeilaamisen kustannukset ovat vielä etenkin itse mitattaessa kohtalaisen suuret. Hyvän laserkeilaimen hankkiminen maksaa 50 000–150 000 euroa ja yksittäiset ohjelmistot maksavat noin 10 000–25 000 euroa sekä vuosittaiset lisenssimaksut, jotka ovat ohjelmasta riippuen noin 1 000–3 000 euroa vuodessa yhtä ohjelmalisenssiä kohden. Laserkeilauskoulutustilaisuudet voivat maksaa tuhansia euroja. Laserkeilausyritysten kautta hankitut laserkeilauslopputuotteet alkavat kuitenkin olla jo hyvin kustannustehokkaita, varsinkin suuremmilla mittausalueilla.

### *Osaamisen puute*

Laserkeilaus osaamista ja alan asiantuntijoita ei Suomesta löydy kuin muutamalta harvalta toimijalta eikä kattavaa laserkeilauskoulutusta ole vielä laajasti saatavilla. Maa-hantuoajat antavat usein peruskurssin laserkeilainmense ja ohjelmien käytöstä, mutta laserkeilausmittauksiin vaadittavaa osaamista on mahdoton saada lyhyistä perehdyttämiskursseista. Laserkeilausprojektiin vaadittava tieto ja ammattitaito maanmittauksen perusteista, mittauskaluston ja ohjelmistojen ominaisuuksista sekä mittaustavan virhelähteistä on suuri. Tulevaisuudessa ohjelmistoista tehdään toivottavasti helppokäyttöisempiä ja edullisempia sekä parannetaan koulutuksen saatavuutta, jolloin mahdollistettaisiin tehokkaampi laserkeilausaineistojen hyödyntäminen maanmittausyrityksissä.

### *Pistepilven käsittely*

Pistepilven käsittelyyn vaaditaan oikeat ohjelmistot ja pistepilven käsittely kestää huomattavan kauan. Pistepilvi sisältää hirvittävän määrän pisteitä, jolloin virhepisteiden määrä ja tiedostokoot kasvavat valtaviksi. Nykyisien ohjelmistojen automaatio on nopeuttanut laserkeilausaineiston prosessointia jonkin verran, mutta silti noin tunnin ilma-laserkeilausaineiston käsittelyyn tarvitaan noin 20–30 tuntia aineiston käsittelyä. Pistepilvien työlään muokkaamisen takia työvoimaa tarvitaan paljon, joka rajoittaa itse suoritettavien laserkeilausmittausten määrää. Pisteiden suuren määrän takia niiden käsittely olisi lähes mahdotonta nykypäivän tietokoneille, ellei ohjelmistoilla voitaisi harventaa pistepilveä tai jakaa käsiteltävä aineisto pienempiin osiin.

### *Tekniikan heikkoudet*

Ilmalaserkeilaimen haittoina voidaan pitää mittaamiseen vaadittavaa kohtalaisen kirkasta ja esteetöntä keliä. Laserpulssi ei esimerkiksi läpäise sumua, pilviä tai todella tiheää kasvustoa. Vaikka ilmalaserkeilaimen laserpulssit tunkeutuvat lehtien lävitse maanpinnalle kohtalaisen hyvin, kannattaa Ilmalaserkeilaimella tehtävät mittaukset ajoittaa kuitenkin kevääseen, loppusyksyyn tai talveen, jotta puiden lehtien aiheuttamat katvealueet vähenevät merkittävästi. Laserkeilaimen laserpulssi ei läpäise juurikaan todella tiheää havumetsää. Pintoihin, johon on kertynyt vettä saattaa näkyä tyhjänä kohtana pistepilviaineistossa, koska lasersäde kokonaisuudessaan kosteasta pinnasta, eikä säde kimpoa takaisin laserkeilaimen vastaanottimeen (säde keräävään peiliin tai muu). [1, s. 35.]

Puutteista huolimatta ilmalaserkeilaus on silti kustannustehokasta ja tarpeeksi tarkkaa mitta-aineistoa, jonka avulla saadaan tuotettua laadukkaita maastomalleja. Ilmalaserkeilauslento voidaan tarvittaessa suorittaa yölläkin, sillä laserkeilain lähettää tutkan tavoin sähkömagneettista säteilyä. [7, s. 1–2.]

#### 1.4 Tilaajan kannalta tärkeää

Laserkeilausaineiston hankinnan lähtökohtana tulisi aina olla, että mahdollisimman monet tahot voisivat käyttää aineistoa tarkoituksiinsa, kuten viranomaiset ja yksityiset rakentajat. Laserkeilausaineistoa voidaan myydä eteenpäin esimerkiksi liikennevirastolle, ELY-keskuksille tulvaselvityksiä varten, teollisuudelle ja yksityisille rakentajille. Laserkeilausaineistoa ei kannata siis hankkia vain pelkän karttatuotannon takia. Hankitun aineiston käyttömahdollisuutta kannattaa mainostaa organisaation sisällä ja mahdollisesti myös ulkopuolisille organisaatioille. Hankintamenettelyssä kannattaa olla tarkka ja täsmällinen, jolloin tuotteesta saadaan tarpeenmukainen. Turhan tarkkoja vaatimuksia ja suoritustapoja ei kannata kuitenkaan asettaa, koska se rajoittaa kilpailua ja nostaa aineiston hintaa. Tilaajan kannattaa omaksi edukseen tietää laserkeilauksen ja järjestelmän peruseräperiaatteet, joita tässäkin opinnäytetyössä selostetaan. Erityistapauksissa kannattaa kääntyä hankkeen ulkopuolisen asiantuntijan puoleen. [31, s. 36–38.]

Tilaaajan tulee tarjouspyynnössä määrittää vähintään haluttu pistetiheys ja digitaalikuvi-  
en pikselikoko sekä vaatia pistepilven kalibrointia, jossa eri lentolinjojen pistepilvet yh-  
distetään saumattomaksi kokonaisuudeksi sekä muidenkin virheiden pienentämistä.  
Keilattavan alueen tulee olla myös yhtenäinen ja suorakaiteen muotoinen. Kaupunki-  
alueilla 10–30 pistettä/m<sup>2</sup> voidaan pitää kohtuullisena vaatimuksena mittausten pisteti-  
heydeksi. Hyvät ilmakuvat ovat tärkeitä lopputuotteita ja yhdyskuntasuunnittelun kan-  
nalta pikselikoon tulisi olla vähintään 10 cm tai alle. Kyseisillä pikselikoolla erotetaan  
kadusta reunakivet, kaivojen kannet ja muut yksityiskohtat. Kuvia tarvitaan myös pis-  
teiden luokittelun helpottamiseksi, varmistamiseksi ja laadunvalvonnan avuksi. Ortoil-  
makuvien avulla pisteet voidaan siirtää oikeaan kohtaan tasossa, joka olisi ilman ilma-  
kuvaa todella hankalaa tai jopa mahdotonta. Tarjouspyynnössä sovelletaan muissa  
tarkkuusparametreissa yleisiä kaukokartoituksen vaatimuksia, kuten maastomallin ja  
kuvausten tarkkuutta. Suomessa laserkeilauksen suorittamiselle ei ole vielä tehty viral-  
lisiä kansallisia ohjeita. [31, s. 36–37.]

## 1.5 Kustannustehokkuus

Ilmalaserkeilaamalla saadaan alue mitattua nykyään kustannustehokkaasti, jos mitat-  
tava alue on tarpeeksi suuri. Lentokoneella suoritettavien mittausten koko tulisi olla  
vähintään 50–100 km<sup>2</sup>, jotta mittaukset ovat edullisia ja kustannustehokkaita. Helikop-  
terista mitattaessa alueen tulisi olla vähintään 2 km<sup>2</sup>. Yksittäisiä kohteita ei ilmalaser-  
keilauksella kannata mitata kalliiden aloitus- ja operointikustannusten takia.

Metsäalueiden maastonpinnan muodot voidaan mitata ainoastaan laserkeilauksella  
kustannustehokkaasti, nopeasti ja tarpeeksi tarkasti [31, s. 37]. Laserkeilaaminen mak-  
saa suurilla alueilla nykyisin noin 10–15 €/km<sup>2</sup>, jos mittausalue on vähintään noin  
100 km<sup>2</sup> ja mittaustarkkuus noin 10–30 senttimetriä [26, s. 3]. Ilmakuvauksen kanssa  
kannattaa aina vakavasti harkita myös ilmalaserkeilauksen mukaan ottamista, koska  
kalliit aloituskustannukset ovat jo suurimmilta osin mukana ilmakuvien kustannuksissa.  
Ilmakuvien ja laserkeilauksen yhteis- ja erillishintoja kannattaa aina kysyä ilmakuvien  
tuottajalta. Lopputuotteiden hinnat vaihtelevat hyvin tapauskohtaisesti.

Suuremmalla pistetiheydellä mitattaessa saavutetaan parempi kohteiden erotuskyky,  
jolloin mittauskohteista erotetaan enemmän yksityiskohtia. Pistetiheys kannattaa olla  
tarpeeksi suuri, koska automaattinen pisteiden luokittelu helpottuu ja pistepilven muok-  
kaamiseen tarvitaan vähemmän manuaalista työtä. Manuaalisen työn vähentäminen

pienentää puolestaan mittausten kustannuksia. Pistetiheyden ollessa 2–3 pistettä/m<sup>2</sup> voidaan automaatiota lisätä merkittävästi:

- pistepilven automaattisessa luokittelussa, kuten rakennuksissa
- yksittäisten puiden ja puualueiden rajaus eri ryhmiin. Esimerkiksi taimikot voidaan erottaa täysikasvuisesta metsästä
- kohteen muutostulkinnassa.

Tulevaisuudessa voikin olla kannattavampaa keilata mittausalue suuremmalla pistetiheydellä, jolloin manuaalisen työn tarve vähenee ja automaattisen prosessoinnin työ määrän osuus kasvaa.

Ylivieskan kaupunki tilasi sen keskustojen laserkeilaamisen vuonna 2004, jonka pistetiheys oli noin 10 p/m<sup>2</sup> ja ilmakuvien pikselikoko 10 cm. Ylivieskan keilaus on pitkällä aikavälillä tuottanut itsenä monin verroin takaisin ilmalaserkeilaamisen kustannuksiin verrattuna. Aineistoa on käytetty kunnan sisällä useissa suunnittelukohteissa sekä kantakarttojen päivittämisessä ja pistepilviaineistoa on jälleenmyyty useille ulkopuolisille käyttäjille ja yrityksille.

## **2 Laserkeilamen toimintaperiaate ja luokittelu**

### **2.1 Laserin perusteet**

Laser on näkyvän tai infrapunasäteilyn aallonpituusalueen sähkömagneettista säteilyä, jota on vahvistettu stimuloitun emission avulla. Laser on koherenttia valoa, jonka tuottama säteily on samanpituista, taajuista ja ne värähtelevät samansuuntaisesti. Ensimmäinen toimiva laser kehitettiin Yhdysvalloissa vuonna 1960. Laseria käytetään arkipäivän laitteissa, kuten viivakoodinlukijoissa, maanmittausalan mittaustyövälineissä, kuten takymetrissä ja laserkeilaimessa. [1, s. 24–25.]

## 2.2 Laserkeilaimen ominaisuuksia

Laserkeilaimilla mitataan kohteen etäisyyttä mittauslaitteesta. Kohde havaitaan sitä koskematta ja käyttämättä heijastimien avulla toimivaa elektro-optista etäisyysmittaria. Useimmat kaupalliset laserkeilaimet toimivat 500 ja 1550 nanometrin välisellä aallonpituusalueella, eli karkeasti vihreästä aallonpituusalueesta infrapuna-alueelle. [20, s. 22.] Tyypillinen spektrin leveys vaihtelee välillä 0,1–0,5 nm , eli laserkeilain lähettää lähes yhden aallonpituusalueen laserpulssia [1, s. 25]. Laserkeilaimet luokitellaan käytettävien etäisyysmittarin toimintaperiaatteiden mukaan, jotka vaikuttavat huomattavasti keilaimen maksimimittausetäisyyteen, tarkkuuteen ja samalla käytettävyyteen. Laserkeilaimen etäisyysmittaukseen käytetään pääasiallisesti kolmea eri tekniikka [20, s. 22–23]:

- Edestakaisen laserpulssin kulkuajanmittaus mittauslaitteesta kohteeseen
- Lasersignaalin jatkuva vaihe-eromittaus
- Optiseen kolmionmittaukseen perustuvaa laseria, jossa mitataan valon tulokulman muutoksia

Mitattavan kohteen heijastuvuus riippuu laserkeilaimen käyttämästä aallonpituudesta. Laserkeilaimen valinnassa tuleekin ottaa huomioon sen suunniteltu käyttötarkoitus, koska tietyt laitteet sopivat tiettyihin mittaustarkoituksiin paremmin kuin toiset. Ilmalaserkeilauksessa käytetään useimmiten 1064 nm: laserkeilainta, koska tällä mittaustaajuudella ilmakehän aiheuttamat virheet ja säteilyn heikentävä vaikutus on pieni. [1, s. 25.]

Esimerkiksi noin 1550 nm:n laserkeilain ei sovi lumialueiden paksuuden tai laajuuden selvittämiseen, koska tällainen aallonpituus ei heijastu juurikaan lumesta tai jäädä takaisin laserkeilausinstrumenttiin. Lähempänä näkyvän valon aluetta (<800 nm) vesi absorboi lähes kaiken säteilystä, eikä veden korkeutta saada mitattua suoraan vedestä tai rannoilta.

## 2.3 Laserkeilaintyytit

### 2.3.1 Ilmalaserkeilaus

Ilmalaserkeilauksella kerätään tietoa maastosta lentokoneella tai helikopterilla. Ilmalaserkeilauksessa käytetään lyhyitä laserpulsseja (4–10 ns), jotka lähetetään maahan suurella taajuudella. Nykyisissä ilmalaserkeilaimissa taajuus vaihtelee 50:n ja 400 kHz:n välillä. Uusimmat laserkeilaimet lähettävät siis parhaimmillaan jopa satoja tuhansia mittauspisteitä sekunnissa, eli ne kykenevät mittaamaan nopeasti suuria määriä pisteitä maastoon. [11, s. 199–200.]

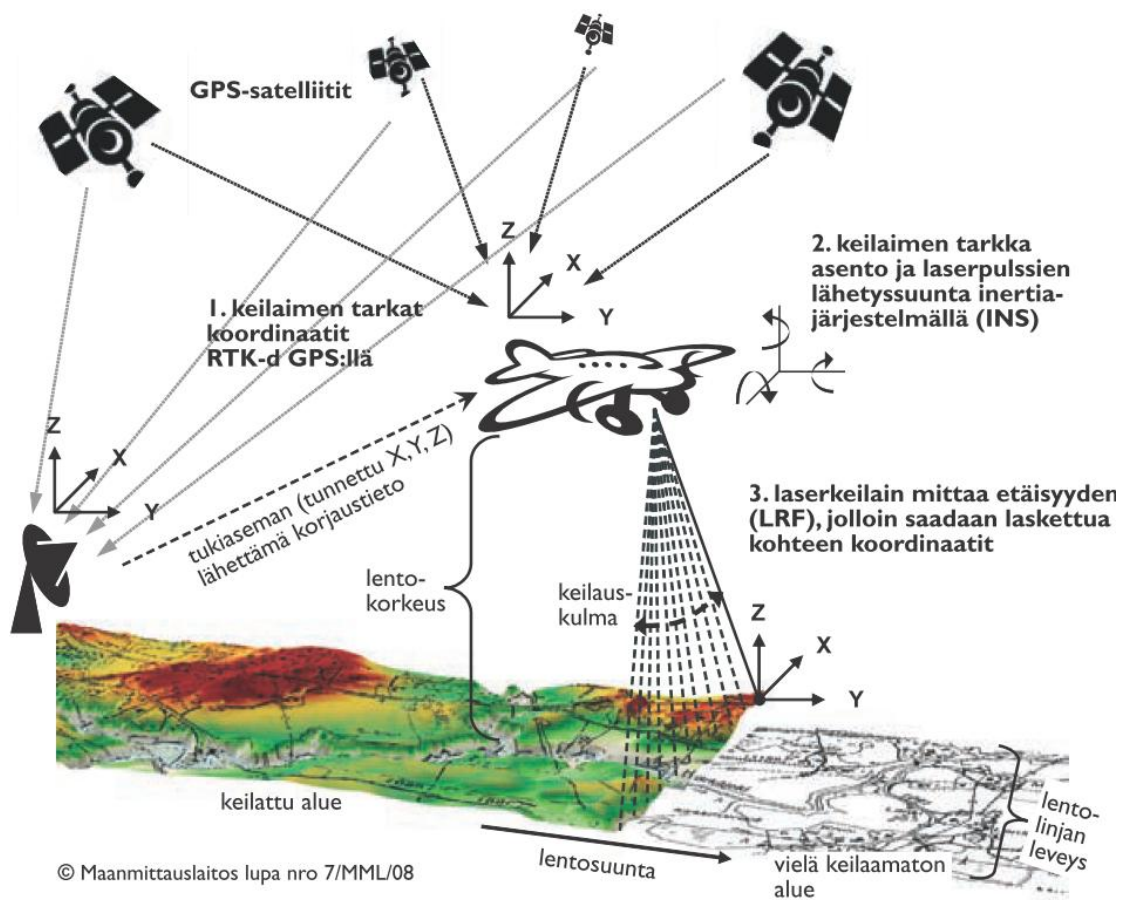
Ilmalaserkeilauksessa käytetään useita keilausmenetelmiä, kuten erilaisia peilijärjestelmiä, keilauskulmia ja mittauskalustoa (kuva 1). Ilmalaserkeilauksessa suoritettavaan kalustoon kuuluu:

1. Laserkeilain, joka mittaa koordinaattipisteitä maastoon.
2. GPS mittaa ja tallentaa laserkeilauksen lentoradan, jonka avulla saadaan laserkeilauspisteille kohtalaiset koordinaatit. Pelkkiä GPS-satelliitteja käytettäessä tulee ajanjaksoja, jolloin satelliittipaikannus ei toimi vaadittavalla tasolla. Tämän takia ilmalaserkeilauksen lentoratatiedot tuotetaan GNSS-järjestelmällä. Suomessa lentoratalaskenta perustuu usein VRS-verkkopalvelun tukiasemadataan. Mittaushetken satelliittigeometrialla on suuri vaikutus aineiston laadun kannalta. [7, s. 4.]
3. Inertian mittaaja (kaltevuusmittari) laskee laserkeilaimen, lentokoneen tai helikopterin kaltevuuskulman maahan nähden. Lentokoneen kääntyessä tai turbulenssista johtuen lentokone heilahtelee, joka aiheuttaisi suuria virheitä laserkeilauspisteiden koordinaatteihin, jos kaltevuuskulmien virheitä ei huomioitaisi. [11, s. 199–200.]

Pintakohteista saadaan tuotettua tarkkaa 3D-pistepilviaineistoa, kun laserpulssein kulkuaika, mittauskaluston sisäinen koordinaatisto ja lentokoneen kallistuma tunnetaan tarkasti [26, s. 4].

Ensimmäinen kaupallinen ilmalaserkeilain pystyi mittaamaan ainoastaan yhden takaisin palanneen lasersäteen kerralla ja mittaamaan kohteen etäisyyden. Silloin ei

ollut mahdollista erottaa eri maanpinnan kohteista kimmonneita laserpulsseja toisistaan. Nykyiset ilmalaserkeilaimet pystyvät mittaamaan samanaikaisesti 4–7 saman pulssin paluupulsseja. Tämän avulla maanpinnan kohteita voidaan erottaa toisistaan, esimerkiksi metsäisellä alueella voidaan päätellä ensiksi takaisin kimmonneen pulssin olevan puun latvoja ja viimeiseksi palaava pulssi voidaan olettaa maanpinnaksi. Tasaiselta pinnalta saadaan vain yksi mitattu piste. [26, s. 4.]



Kuva 1. Ilmalaserkeilauksen peruseriaatteen ja tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Laserpisteiden intensiteetti, eli paluupulssin teho mitataan jokaiselle pulssille ja aaltomuodolle erikseen. Intensiteetin voimakkuuteen vaikuttavat lennon muuttuvat tekijät ja mittauskohteiden ominaisuudet, jolloin maanpinnan kohteiden intensiteettiarvot pitää kalibroida. Yksittäisille laserpulseille, jotka eivät hyödynnä aaltomuoto-tekniikka, on mahdollista määrittää kalibroidut maanpinnan kohteiden intensiteettiarvot. [26, s. 4.]

### 2.3.2 Maalaserkeilaus

Maalaserkeilaimilla saadaan mitattua pienemmiltä alueilta ilmalaserkeilausta tarkempaa ja tiheämpää pistepilviaineistoa. Maalaserkeilain pystytetään kolmijalkojen päälle ja maalaserkeilaimella päästään parhaimmillaan 1–2 millimetrin tarkkuuksiin sekä mitausnopeudessa jopa miljoonaan pisteeseen sekunnissa. Maalaserkeilain lähettää laserpulsseja määritellyllä keilauskulmalla ja keilaimen ominaiskeilauskuviolla. Keskipitkille etäisyyksille tarkoitetuilla maalaserkeilaimilla voidaan mitata kohteita 2–800 metrin välillä. Maalaserkeilattaessa käytetään usein kuvia tuomaan lisäinformaatiota mittauskohteesta sekä helpottamaan kohteiden tunnistamista. Maalaserkeilaus on halvempaa pienillä alueilla kuin ilmalaserkeilaus. Maalaserkeilausta käytetäänkin yleisimmin pienen mittakaavan kohteissa, kuten infrarakennuskohteissa. [26, s. 6.]

### 2.3.3 Mobiililaserkeilaus

Mobiililaserkeilaus suoritetaan liikkuvasta maanpäällisestä ajoneuvosta. Laserkeilain sijoitetaan GNSS-IMU-laitteistoon ja yhdistetään autoon tai veneeseen, jolloin liikkuvan maalaserkeilauksen avulla pystytään kartoittamaan nopeasti ja tarkasti laajempia alueita kuin staattisella maalaserkeilauksella. [26, s. 6-7.]

## 2.4 Laserkeilaimen mittaustyypit

Laserkeilaimissa käytetään kahta erilaista aktiivisoptista mittaustapaa 3D-mallin mittaamiseen. Havaittavaa kohdetta voidaan mitata määrittämällä laserkeilaimen lähettämän säteilyn ja sen kohteesta kimmonneen matkan ajalliseen määrittämiseen.

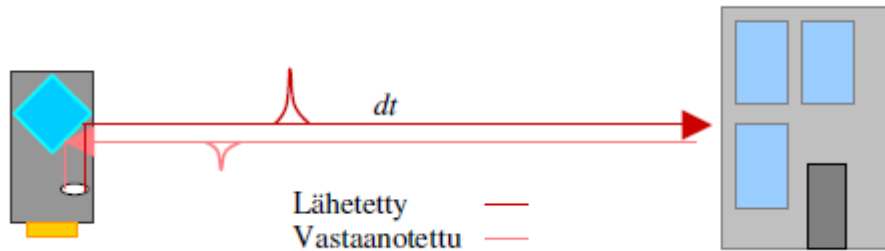
Laserkeilaimet voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan kolmeen eri pääryhmään: Pulssi- eli aikaerolasereihin, vaihe-erolaseriin ja täydenaallonmuodon lasereihin.

### 2.4.1 Pulssi- eli aikaerolaserit

Pulssi- eli aikaerolaserit lähettävät kohteeseen laserdiodin tuottaman energiapulssin, jonka suuntakulma sekä pulssin kulkema edestakainen kulku-aika laserkeilaimen ja kohteen välillä mitataan (kuva 2). Mitatun aikaeron tarkkuus riippuu ajanmäärityksen tarkkuudesta sekä mittauskohteen ja pulssin ominaisuuksista. Ympäristöstä saadaan muodostettua kolmiulotteinen kokonaisuus mittaamalla useita pulsseja eri suuntiin. [23,



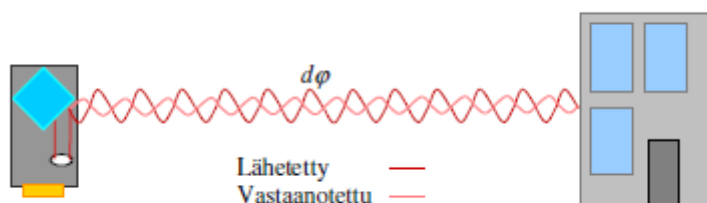
s. 6–7.] Pulssilaserilla voidaan mitata kohdetta sadoista metreistä kilometreihin. Tyypillisesti pulssilaseria käytetään kuitenkin muutamien satojen metrien etäisyydellä kohteesta. Mittausetäisyyden maksimi riippuu laitteen lähettämän pulssin intensiteetistä ja toistotaajuuden määrästä enimmäiskulkuajasta. Toistotaajuudella tarkoitetaan mitaushavaintojen määrää sekunnissa. Pulssilaseri saavuttaa vain muutaman tuhannen havainnon mittauksen sekunnissa, mikä rajaa sen käytön mahdollisuuksia. [4, s. 12; 1, s. 23–24.]



Kuva 2. Pulssilaserin toimintaperiaate [23].

#### 2.4.2 Vaihe-erolaserit

Vaihe-erolaser, toisin kuin pulssilaser, lähettää jatkuvaa sähkömagneettista säteilyä mitattavaan kohteeseen (kuva 3). Kohteesta heijastuneen säteilyn ja laserkeilaimen välinen vaihe-ero mitataan, jolloin kokonaislukutuntemattoman ja vaihe-eron avulla saadaan laskettua kohteen etäisyys. Vaihe-erolaserin lähettämien säteiden intensiteettiä moduloidaan siniaalloilla tai vaihtoehtoisesti useampia kanta-aallonpituuksia sisältäviä signaaleja. Useamman aallonpituuden moduloinnilla voidaan ratkaista kantaalto. Vaihe-erolaserit pystyvät mittaamaan jopa 250 000–400 000 mittausta sekunnissa ja pulssilaseriin verrattuna etäisyysresoluutio on laadukkaampi. Maksimimittausetäisyys on yleensä alle 100 metriä. Mittausetäisyys riippuu laserkeilaimen lähetystehosta ja kanta-aallon moduloinnista. [4, s. 12; 1 s. 23–24.]

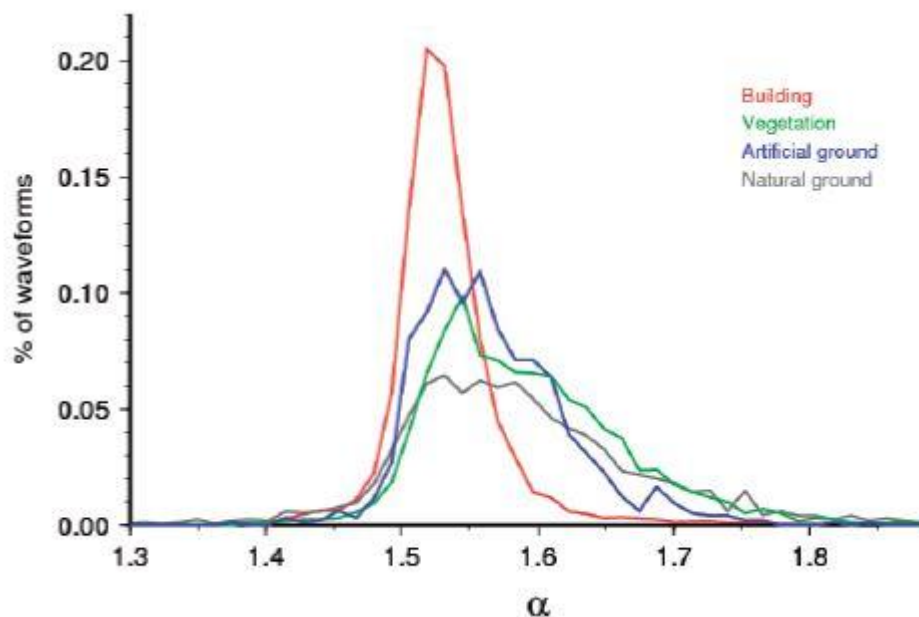


Kuva 3. Vaihe-erolaserin toimintaperiaate [23].

### 2.4.3 Täysi aallonmuoto (full-waveform)

Pulssilaserkeilaimia on kahdenlaisia; diskreettejä ja täyden aallonmuodon laitteita. Suurin osa nykyisistä laserkeilaimista ovat analogisia, jolloin mittauspisteet ovat diskreettejä pisteitä, joita on yksi tai useampi lähtevää pulssia kohden. Mitattavalle pisteelle voidaan määrittää koordinaatit paluukaiusta monesta eri kohdasta. [27] Diskreetteisissä laserkeilaimissa pulssien vastaanottajainstrumentti analysoi itse paluusignaalin [1, s. 222]. Diskreetteisissä laitteissa koordinaattien määrittäminen saadaan automaattisesti, eikä jälkianalyysiin vaadittavia tietoja saada ulos mittaustiedoista [27].

Täyden aallonmuodon laserkeilaimilla saavutetaan tarkempi mittaustulos ja ne antavat lisätietoa ja -arvoa mittauskohdeesta. [27] Esimerkiksi täydenaallonmuodon laserkeilaimet läpäisevät paremmin puustoa verrattuna pulssilaserihin ja saavat diskreettisiä laserkeilaimia paremmin selville aluskasvillisuuden korkeuden, jolloin maanpinnaksi luokiteltujen virhepisteiden määrä vähenee [1, s. 223–224]. Mittauskohdeesta voidaan koordinaattien ja aikaleiman lisäksi määrittää myös mittauksen sisäinen orientointi sekä radiometrinen ja systeemin vasteen kalibrointi. Täyden aaltomuodon tekniikan avulla epästabiilin järjestelmän, aikaleiman, lähetyskulmien ja digitoitujen kaikkujen aiheuttamat virheet voidaan minimoida tai kokonaan poistaa. Lopputuotteena laserpulssista saadaan takaisinsironneen signaalin amplitudi ja muodon hajonta sekä kalibroitu muoto, reflektanssi ja kaiun leveys. Näitä parametrejä voidaan käyttää esimerkiksi pistepilviaineiston luokitteluun (kuva 4). [27]



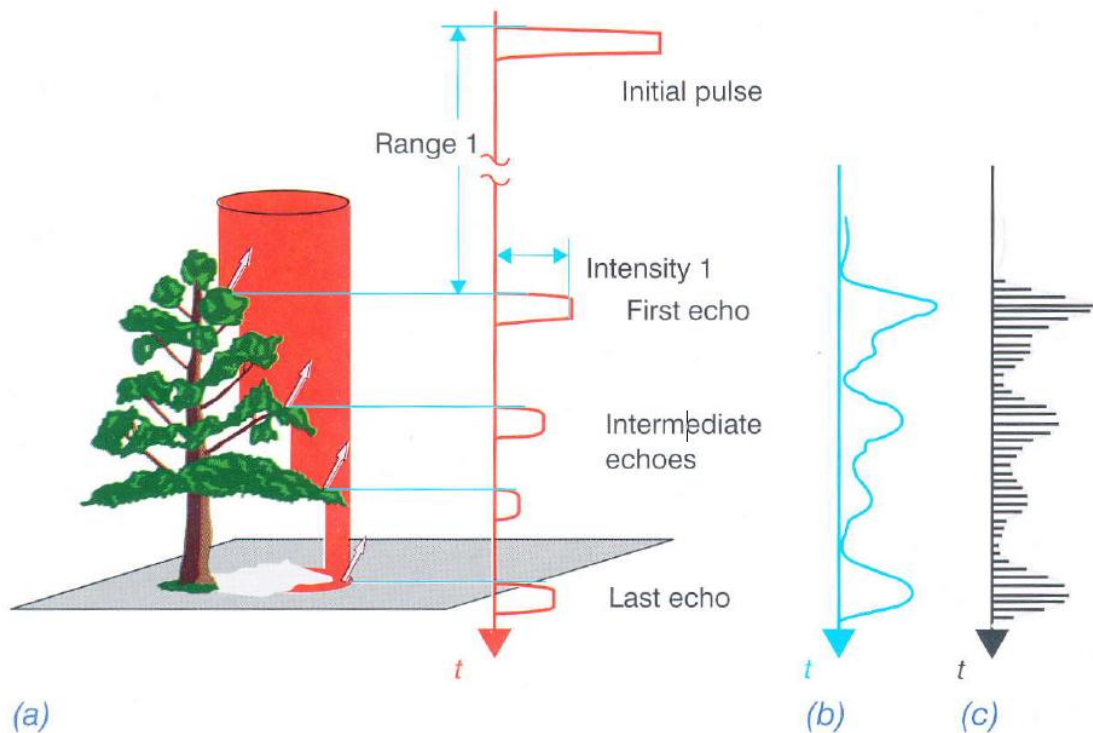
Kuva 4. Kasvillisuus, rakennukset ja ihmisen rakentama maanpinta (esim. asfaltti) saadaan eroteltua toisistaan takaisinsironnan muodosta johdetun alfa-arvon avulla [27].

#### 2.4.4 Paluupulssit ja -kaiut

Paluupulssien ja -kaiujen määrä riippuu kohteen laadusta ja muodosta. Täydennaal-  
tomuodon tekniikka mahdollistaa paluukaikujen analysoinnin gigahertsin resoluutiolla.  
Paluukaiusta saadaan selville kohteen muoto, toisin kuin aikaerolasereilla, jotka muo-  
dostavat vain pysähtyneensignaalin tietylle paluukaiun nousuajalle. [1, s. 28–29.]

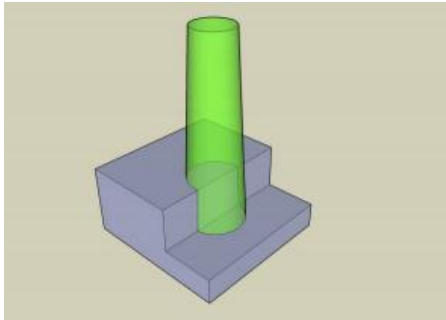
Kuvassa 5 (a) on esitetty paluupulssin käyttäytymistä puun eri kerroksissa. Ensimmäi-  
nen pulssi osuu puun latvustoon ja muodostaa paluupulssin sekä kyseisen kaikupulssin  
amplituditiedon. Puun keskivaiheilla syntyy uusia paluupulsseja eri korkeuksilla ja  
viimeinen pulssi saadaan maanpinnasta, jos puu läpäisee pulssin tarpeeksi hyvin. Ku-  
van (b) kohdassa esitetään täyden aallonmuodon kulkeutumista ja kohdassa (c) digita-  
lisoitua aallonmuotoa puun eri kohdissa. [1, s. 28–29.]

Mittauskohteesta saadaan yleensä 4–6 paluupulssia. Paluupulsseista voidaan havaita  
eri kohteiksi vain objektit, jotka ovat vähintään pulssin leveyden etäisyydellä toisistaan.  
5 nanosekunnin pulssileveydelle etäisyys on noin 0,75 metriä ja aallonmuodon vas-  
taanottimissa päästään 0,075–0,15 metrin erotuskykyyn (0,5–1,0 ns). [1, s. 29.]



Kuva 5. Kuvassa esitetään kaikujen periaatteet ja täydellisen aallonmuodon kulkeutuminen puun eri kohdissa [1, s. 29].

Diskreettisellä laserkeilaimella syntyy ongelmia, jos laserpulssi osuu elementin rajakohtaan (kuva 6). Puolet pulssista osuu reunan ylä- ja toinen alakohtaan. Laserpulssista saadaan paluutietona vain yhden laserpulssin tiedot, joka on kuitenkin tullut kahdesta eri kohdasta. Kyseisen pisteen koordinaatit lasketaan laserkeilaimesta riippuen joko ylä-, keski-, tai alakohdasta, jolloin koordinaatit muodostuvat väärään kohtaan. [5, s. 29–30.] Täydenaallonmuodon tarkastelussa havaitaan sekä ylä-, että alakohdasta eriliset paluukaiut, joille voidaan laskea luotettavat koordinaatit [1, s. 28].



Kuva 6. Laserpulssin jalanjäljen osuminen elementtien nurkkakohteisiin aiheuttaa ongelmia luotettavien koordinaattien laskentaan diskreettisillä laserkeilaimilla, muttei täydenaallonmuodon keilaimilla. [5]

#### 2.4.5 Optiseen kolmiointimittaukseen perustuva laser

Optista kolmiointimittaukseen perustuvaa laseria käytetään tarkemmissa laserkeilauksissa, kuten teollisuusmittauksissa. Toisin kuin useiden kymmenien tai satojen metrien etäisyydeltä toimivat pulssi- tai vaihe-erolaserkeilaimilla, voidaan kolmiointitekniikalla mitata kohdetta vain muutamien metrien päästä. Kolmiointimittauksessa syntyy myös paljon muita tekniikoita enemmän katvealueita. [1]

Kolmiomittauslaserkeilaimet muodostavat valopisteen, jolla tähdätään mitattavaan kohteeseen. Kohteesta kojeeseen takaisin heijastuva valopiste kulkee linssin lävitse sensorin pinnalle, jolloin pisteen sijainti tallentuu. Kohteen etäisyys saadaan laskettua havaittavan valon tulokulman sekä valonlähteen ja sensorin välisen etäisyyden perusteella. [4, s. 12.] Mittaustapa perustuu normaaliin kolmiointitapaan, jossa kaksi kulmaa ja yhden sivun pituus tunnetaan tai toisin päin. Ratkaisut voidaan laskea sini- ja kosinikaavojen avulla [5 s. 19].

## 2.5 Peilijärjestelmät

Keräävän peilin heiluminen mallinnetaan. Virhe peilin mallintamisessa voi aiheuttaa suuria virheitä laserkeilausaineistoon. Jokaisella peilijärjestelmällä on erilaiset keilausgeometriat, vahvuudet ja heikkoudet. [22]

### 2.5.1 Heiluva oskilloiva peili

Oskilloiva peili muodostaa kapean keilauskulman. Kääntyvä ja pyörähtelevä peili kerää laserpulsseja molemmista pyörähdyssuunnista ja kerää laserpulssit ”koko peilin alueelta kaistaleelle”. Laserkeilaimen liikuessa muodostuu mittausjäljestä siksakkia, jossa reunoilla mitatut laserpisteet ovat tiheämpänä ryppäänä kuin keskellä mittauslinjaa sijaitsevat pisteet. Tämä johtuu peilin kiihtyvästä ja hidastuvasta liikkeestä, jossa peilin ääriasennossa peilin kiihtyvyys on nolla ja keskiasennossa peilin nopeus on suurin.

Oskiloivan peilin suurimpana etuna on sen muokattavuus käyttötarkoitukseen sopivaksi. Oskiloivaa peiliä voidaan käyttää noin 100–6 000 metrin korkeudella maasta ja peilin keilauskulmaa ja -nopeutta voidaan säätää sopivaksi eri korkeuksille. Monet kaupalliset ilmalaserkeilaimet käyttävät oskilloivaa peiliä juuri sen monipuolisuuden ja muokattavuuden takia. [1, s. 16–18.]

### 2.5.2 Pyörivä monikulmio peili

Polygoni-peilityypissä pyörivä monikulmionmallinen peili kerää säteet sensoriin. Keilauslinjat ovat yhdensuuntaisia ja keilauspisteet ovat rinnakkain toisistaan, jolloin keilausjäljestä muodostuu tasaisesti levinyt pistepilvi. Keilaimella voidaan halutessa mitata pisteitä täsmälleen tasaisin väliajoin lentosuuntaan päin tai lentosuuntaa vastaisesti. Pyörivällä peilillä saavutetaan 30–60 asteen mittauskulma. [1, s. 18.]

### 2.5.3 Palmer-skanneri

Palmer-skannereita käytetään pääasiallisesti maalaserkeilaimissa. Skannerissa peilijärjestelmä on rakennettu siten, ettei peilin pinta ja pyörivä akseli muodosta milloinkaan kulmaa, joka olisi tasan 90 astetta. Palmer-skannerin muodostama mittausjälki on ellipsinen, eli soikea. Skanneri mittaa kohdetta edestakaisella liikkeellä, jolloin lentokoneesta tehdyistä mittauksista samaa kohdetta mitataan useamman kerran eri kulumista. Näin

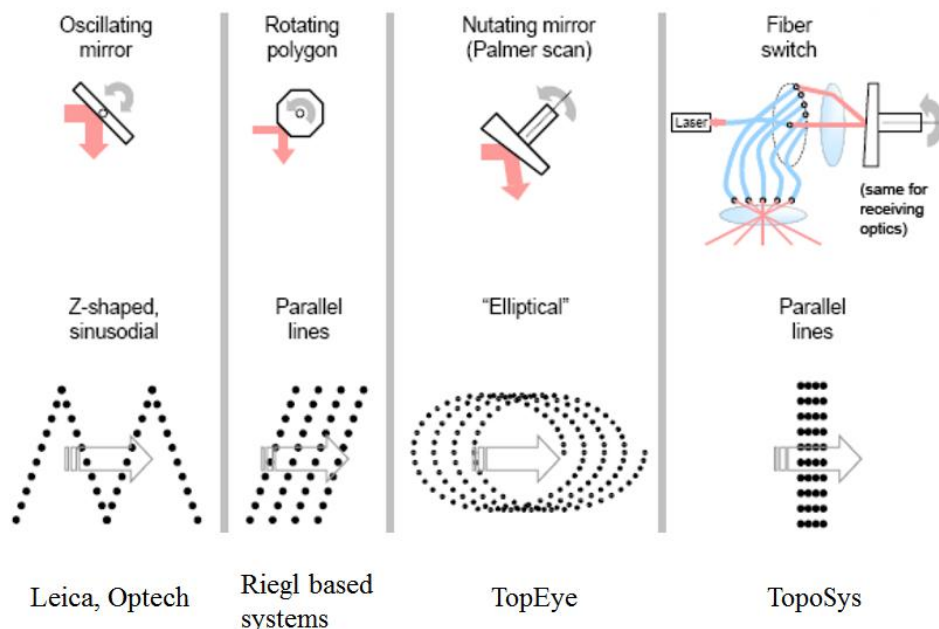
mittausalueelta muodostuu vähemmän varjoalueita, jolloin saadaan tarkempi maasto- ja kohdemalli. [1, s. 18–19.]

#### 2.5.4 Valokuitiskanneri

Skanneripeili lähettää yksittäisiä laserpulsseja vierekkäisiin valokuituihin. Valokuidut on kasattu lineaarisiin riviin ja ne osoittavat suoraan maata kohti. Tämän teknologian hyvänä puolena on mittausmekanismin vakaa ja vankka rakenne, jolloin keilain on pitkäikäisempi ja luotettavampi. Tyypillisessä valokuituskannerissa on 128 lasikuitua ja nykyisillä keilaimella saavutetaan noin 14 asteen mittauskulma. [1, s. 19.]

#### 2.5.5 Flash-lidar

Flash-lidarissa käytetään hyväksi LEDejä sekä laserdiodeja. Muista keilaintyypeistä poiketen Flash-lidar-teknologialla saadaan kohteesta muodostettua 3D-kuva yhdellä kuvauksella, hieman kuten normaalilla digitaalikameralla. Teknologiassa ei käytetä ollenkaan mekaanisia osia. Teknologian heikkoutena on spatiaalisen resoluution heikkeneminen, joka vaikeuttaa kohteiden tunnistamista ja heikentää aineiston käyttökelpoisuutta. Ongelma johtuu säteen leviämisestä suuremmalle alueelle, riippuen kuinka etäältä kohdetta mitataan. Tämän takia Flash-lidar soveltuu tällä hetkellä muita tekniikoita huonommin ilmalaserkeilaukseen. [1, s. 19.]



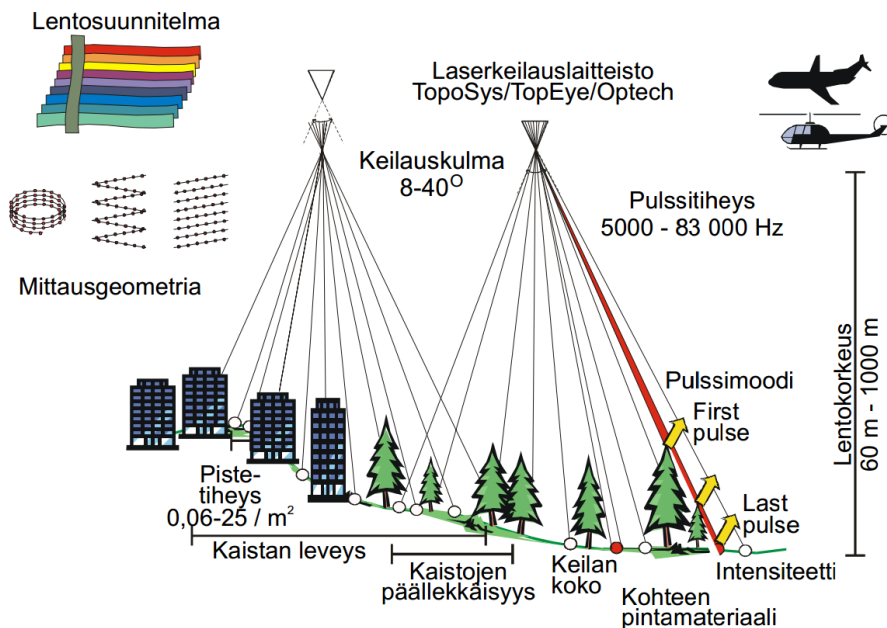
Kuva 7. Peilijärjestelmien eroavaisuuksia keilausgeometriassa [3. s. 10]

### 3 Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät

Laserkeilauksen laatuun vaikuttaa olennaisesti tilaajan vaatimukset vaadittavista ominaisuuksista. Tilaajan tulisi tarkentaa pistepilviaineiston toimittajalle tärkeimmät keilausparametrit, jolloin laserkeilausaineistosta tulisi halutunlainen ja käyttöä varten optimoitua. Tärkeimpiin laserkeilausparametreihin kuuluu esimerkiksi; pistepilven tarkkuus ja tiheys, maksimi keilauskulma, keilainleveys sekä pisteiden riippumattomuus toisistaan. [8, s. 4.] Jokaisella laserkeilaimella on oman suuruiset virhearvonsa, jotka pitää selvittää kalibrointien avulla laserkeilainkohtaisesti.

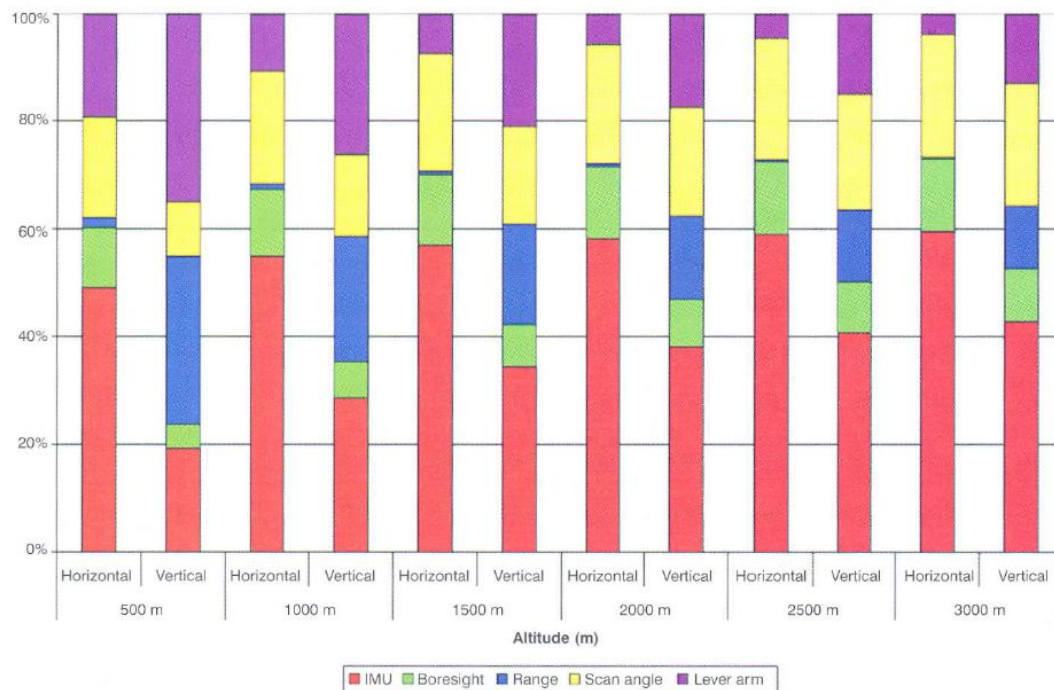
Käytännössä ilmalaserkeilaamalla päästään 0,05–0,2 metrin korkeustarkkuuteen ja 0,2–1,0 metrin tasotarkkuuteen, jos lentokorkeus on vähintään 2 000 metriä [1, s. 29]. Pistepilven laatuun vaikuttaa mittaushetkellä ja jälkikäsittelyssä useita virhelähteitä, joita pyritään korjaamaan ja virheitä minimoimaan (kuva 8). Virhelähteet voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin [24, s. 21]:

1. Mittausvälineiden virheet (laserkeilain, GPS ja IMU)
2. Laserkeilausparametrien ja lentonopeuden vaikutukset laserkeilauspisteisiin. Pistetiheys, lentokorkeus, keilauskulma yms.
3. Tietojen käsittely ja sen parametrit liittyen pisteiden tasoitukseen, interpolointiin, suodattamiseen, pehmentämiseen yms.
4. Mitattavan kohteen ominaisuudet, kuten maaston laatu, tasaisuus ja kasvuston tiheys.



Kuva 8. Laserkeilauksen laatuun vaikuttavat tekijät [8, s. 6]

Keilauksessa syntyvien yksittäisten virheiden summasta saadaan mittausten kokonaisvirhe selvitettyä. Kuvassa 9 esitetään yksittäisten virheiden suuruus kokonaisvirheeseen verrattuna. Kuvasta huomataan, että lentokoneesta suoritettavan laserkeilauksen tasovirheestä johtuu laserkeilaimen suuntaamisvirheistä. IMU- ja antennivirheet kattavat noin 60–75 % tasotarkkuuden virheistä, riippuen lentokorkeudesta. Kyseiset virheet aiheuttavat myös korkeustarkkuuteen suhteellisen paljon virhettä. Helikopterista keilatuna suurimmat virheet aiheutuvat keilaimen kulmavirheistä, jotka johtuvat pääasiallisesti laserpulssien poikkeavuuksista. [30, s. 9.]



Kuva 9. Mittausparametrien virhesuurudet kokonaisvirheestä prosentteina [1, s. 108].

Tilaaajan tulisi aina saada laserkeilausprojektin tekijältä tarvittavat tiedot suoritettua mittauksesta ja projektin mittausparametreista. Laserkeilausaineiston tuottaja vastaa mittausten laadusta ja niistä tehdyt mittausraportit tulee antaa tilaajalle luettavaksi ja tutkittavaksi. Tuotteen tilaajalle tulisi antaa tiedoksi vähintään [30, s. 6]:

- käytetyt mittausvälineet ja -kalustot
- mittausparametrit ja dokumentointi, kuten päivämäärä- ja lentokorkeustiedot
- täydelliset lentoratatiedot
- mittaushetken sääolot, erityisesti sumuisuus ja sademäärä
- käsittelyprosessin toimintatavat ja niiden dokumentointi, mukaan lukien käytetyt ohjelmistot ja käytetyt tekniikat
- käytetyn projektion tiedot

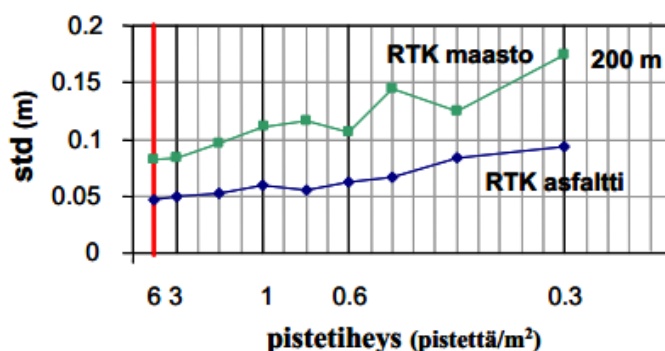


- mittausalueen kattavuuskartta, josta selviää, ettei mittausalue sisällä tyhjiä kohtia
- todisteet mittausten taso- ja korkeustarkkuudesta.
- mittausten pistetiheys
- LAS-tiedostojen sisältö. Onko pisteet luokiteltu tai sisältääkö tiedon keilauskulmasta?

### 3.1 Pistetiheys

Pistepilven mallintamisen laatuun vaikuttaa etenkin pistetiheys, joka määrittää aineiston yksityiskohtien määrään ja kokonaistarkkuuden. Suuri pisteiden määrä neliometriä kohti muodostaa hyvän erotuskyvyn, joka mahdollistaa yksittäisten kohteiden ominaisuuksien määrittelyn. Pistepilven tiheyttä voidaan parantaa keilaamalla sama alue useampaan kertaan matalalta, jolloin pistepilvien yhdistämisessä tulee ensin korjata keilauslinjojen systemaattiset virheet. Ilmalaserkeilauksen pistetiheys vaihtelee tyypillisesti välillä 0,5–50 pistettä/m<sup>2</sup>. Laserpulssin koko ja muoto vaikuttavat myös kohteen yksityiskohtien ja itse kohteen näkyvyyteen. [8, s. 4–5] Tiheä pistepilvi ei yksinään takaa parempaa tarkkuutta, jos pisteiden geometrinen tarkkuus on huono [4, s. 19].

Hyypä & Hyypä analysoivat laserkeilausaineiston pistetiheyden vaikutusta aineiston tarkkuuteen. Tutkimuksissa huomattiin, ettei pistetiheydellä ollut juurikaan vaikutusta tarkkuuteen, jos alue on tasainen. Tasaisen alueen ero 6 pisteestä neliometrillä 0.6 pisteeseen neliometrillä heikensi tuloksia vain muutamalla sentillä (kuva 10). Epätasaisessa maastossa pistetiheyden vähentämisen seurauksena virheet olivat jo huomattavasti suurempia. Kumpuilevassa maastossa päästiin vain alle 20 senttimetrin satunnaisvirheeseen. [8, s. 4–5.]



Kuva 10. Pistetiheyden vaikutus laserkeilauksen korkeustarkkuuteen.

### 3.2 Keilauskulma ja lentokorkeus

Lentokorkeus vaikuttaa oleellisesti laserkeilauspisteiden korkeus- ja tasotarkkuuteen. Paluusignaalin voimakkuus heikkenee mittausetäisyyden kasvaessa. Lentokorkeuden kasvattaminen heikentää enemmän taso- kuin korkeustarkkuutta, varsinkin pienemmillä keilauskulmilla. Lentokorkeuden ja keilauskulman lisääminen nostaa myös satunnaisvirheiden määrää korkeus- ja tasokoordinaateissa. Tutkimuksissa on todettu, että lentokorkeuden nostaminen 2000 metristä 3000 metriin lisää korkeusarvojen keskihajontaa 10 senttimetristä 15 senttimetriin 25 asteen keilauskulmaa käyttämällä. [24, s. 22.]

Keilauskulma ja maaston epätasaisuus vaikuttavat pisteiden tarkkuuteen. Leveämmällä keilauskulmalla saavutetaan nopeampi mittausprosessi, koska keilattu alue on leveämpi ja keilauslinjoja tarvitaan vähemmän peittämään haluttu mittausalue. Tutkimuksissa on havaittu laserkeilauslinjan reunapisteiden tasovirheiden olevan jopa kaksinkertaiset keilauslinjan keskikohdan pisteisiin verrattuna. Virheiden suuruus määräytyy keilauskulman leveyden ja käytettävän keilaimen mukaan. [24, s. 24.]

Tiheillä metsäisillä alueilla keilauskulman kasvattaminen aiheuttaa laserpulssin heikentymistä, koska pulssin ja maanpinnan välillä on enemmän metsän biomassaa. Tiheä metsä vaikeuttaa pulssin tunkeutumista maanpinnalle saakka ja heikentää maanpinnan tarkkuutta peitteisillä alueilla. Keilauskulman kasvattaminen ei kuitenkaan vaikuta paljoakaan metsäalueella mitattuun maanpinnan tarkkuuteen vaan tarkkuuteen vaikuttaa enemmän metsän tiheys. Suurilla alueilla kannattaakin taloudellisista syistä keilata mahdollisimman suurella keilauskulmalla, koska maanpinnan pisteiden tarkkuus ei heikkene merkittävästi, kunhan keilauskulma pysyy kohtuullisena ( $<40\text{--}50^\circ$ ). [24, s. 31.]

### 3.3 Mittausvälineiden sisäinen tarkkuus ja kalibrointi

Useat ilmalaserkeilaimen osat vaikuttavat mittausten tarkkuuteen. Ilmalaserkeilauksen eri osien asetteleminen ja laserkeilausinstrumentin tarkan paikan määrittäminen on erityisen tärkeää mittausten tarkkuuden kannalta. Pienikin virhe instrumentin lentokoneen paikallisessa koordinaatistossa aiheuttaa suuria virheitä maaston mitattaviin kohtiin. Virheet voivat aiheuttaa mittaustuloksiin senteistä jopa useisiin metreihin virhettä, riippuen laserkeilaimen asennuksesta ja spatiaalisesta georeferoinnista. Kaikki lento-

koneessa tai helikopterissa olevat mittausvälineet tulee kiinnittää tukevasti runkoon, jotta ne eivät pääse liikkumaan mittausten aikana. [1]

Laserkeilain lähettää mitattavaan kohteeseen laserpulssin, jonka edestakainen kulku-aika tallennetaan tarkoilla kelloilla. Kohteen etäisyys saadaan laskettua kertomalla kulku-aika valonnopeudella.

$$s = c \cdot (t/2)$$

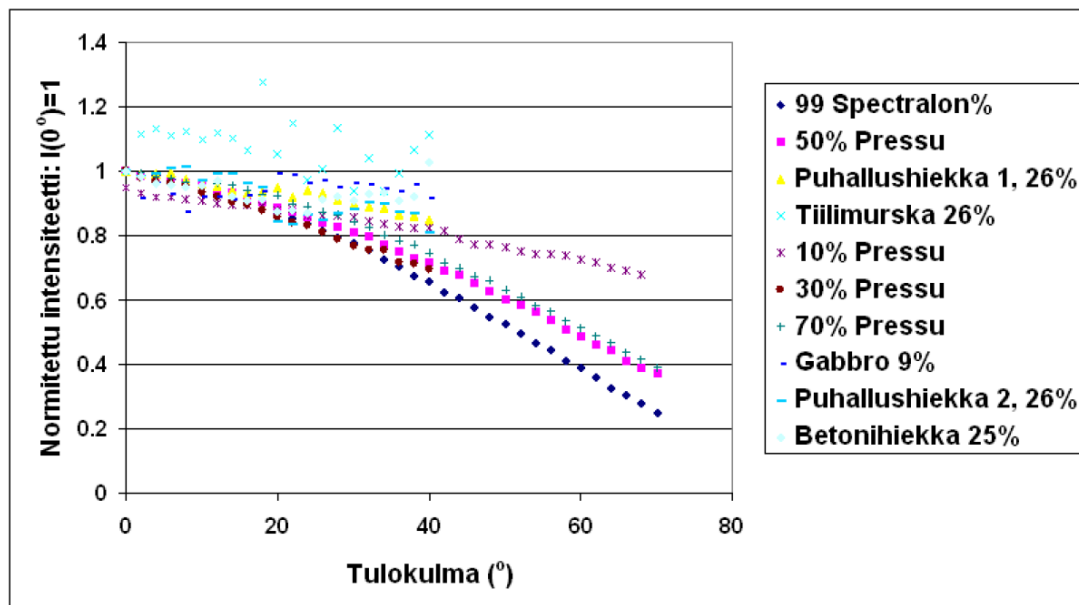
Etäisyys  $s$  voidaan laskea koska valonnopeudella etenevät pulssin nopeus  $c$  tunnetaan ja kellon tallentama kulku-aika  $t$  on mitattu. Valonnopeuden,  $c = 299\,792\,458$  m/s, täytyy kellon olla todella tarkka ja kulkea tasaisesti. Nanosekunninkin ( $10^{-9}$ ) virhe aiheuttaa etäisyysmittauksiin jopa 15 senttimetrin virheen. [21, s. 23.] Ilmalaserkeilauksessa virheen suuruus kasvaa entisestään, koska lentokone liikkuu kovaa vauhtia mittausten aikana [22]. Etäisyyden mittaustarkkuus riippuukin suurelta osin laserkeilaimen kellon tarkkuudesta ja sen tasaisesta käynnistä. Etäisyyden mittauksen tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti myös mittausetäisyys. [21, s. 23.]

### 3.4 Paluusignaalin intensiteettiarvo

Laserkeilaimeen takaisin palaavien signaalien intensiteettiin, eli voimakkuuteen, vaikuttaa eniten mitattavan kohteen etäisyys laserkeilaimesta, mittauskulma kohteeseen nähden sekä kohteen pinnan muoto ja laatu. Eri pinnoissa signaalien intensiteettiarvot eroavat jonkin verran toisistaan, koska signaali palautuu eri tavalla laserkeilaimeen. Jotkin laserkeilaimet tallentavat koordinaattitietojen lisäksi myös paluusignaalin intensiteettiarvon, jolloin saadaan selville luotettavimmat mittauspisteet. Yksittäisten signaalien voimakkuudet voidaan visualisoida värieroina tai harmaasävy eroilla, jolloin kerättyä pistepilviaineistoa on helpompi tarkastella. Signaalien intensiteettiarvon avulla voidaan määrittää kohteen pinnan muotoja ja tekstuureja, koska jokainen pinta lähettää hieman eri intensiivistä paluusignaalia (kuva 11). [4, s. 19.]

Ilmalaserkeilauksessa on huomioitava ilmakehän vaikutus signaalien intensiteettiarvoon. Intensiteettiarvojen kalibroimiseen käytetään Suomessa muun muassa Geodeettisen laitoksen kalibroitintenttää. Kentälle on sijoitettu useita eri materiaaleja, kuten soraa, hiekkaa ja pressuja, joiden mahdollisimman tarkat intensiteettiarvot on määritetty laboratoriossa. Laserkeilauspisteiden kalibrointi on edennyt ilmakuvien radiometrinen, eli

kirkkausarvojen ja harmaasävyjen, kalibrointien pohjalta. Laserkeilainten intensiteettiarvojen erotuskykyä tullaan kehittämään tulevaisuudessa selvästi nykyistä tarkemmaksi. [6, s. 160–161.] Intensiteettien kalibrointi on kuitenkin erittäin vaikeaa tai lähes mahdotonta, koska jokaisella mittausalueella on eri mittausparametrit.



Kuva 11. Kuvassa nähdään mitattavan kohteen laadun ja muodon sekä signaalin tulokulman vaikutus paluusignaalin intensiteettiarvoon. Kohteen intensiteettiarvon avulla voidaan tunnistaa kohteen ominaisuuksia. Prosenttiluvut kuvaavat 785 nm:n aallonpituuden ja 0-tulokulman heijastusominaisuuksia. [6, s. 163.]

### 3.5 Laserjalanjälki

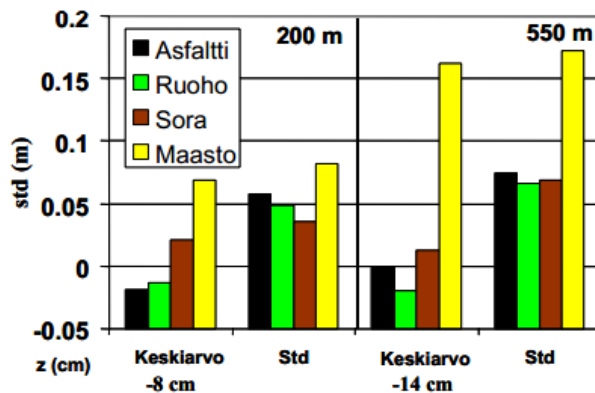
Lasersäde muodostaa mitattavaan kohteeseen pinta-alaltaan vaihtelevan ellipsin muotoisen pisteen, jota kutsutaan laserjalanjäljeksi. Mittausetäisyyden kasvaessa lasersäde laajenee ja pisteen kohdalle voi mahtua useita etäisyysvaihteluita. Heijastuneesta pulssista muodostuu useita kaikuja eri etäisyyksillä. Etäisyshavainnon määrittely vaihtelee laskentatavoittain ja havaintoihin otetaan mukaan joko kaikki kaiut erikseen tai vain niiden keskiarvot. Laserjalanjäljen kasvusta syntyy myös suuntahavainnon epävarmuutta, koska todellinen etäisyshavainnon suunta voi sijaita missä tahansa lasersäteen pinta-alan sisällä. Varsinkin ilmalaserkeilauksessa virhe korostuu moninkertaiseksi, sillä laserjalanjäljen halkaisija voi olla useita metrejä, riippuen lentokorkeudesta. Esimerkiksi 4,5 mm:n jalanjälki suurenee 100 metrin etäisyydellä 2,5 senttimetrin kokoiseksi pisteeksi. [20, s. 24.]

### 3.6 Keilausgeometria

Keilausgeometria on suuri merkitys laserkeilauksen mittausvirheisiin. Jos kohteesta halutaan tuottaa tarkka maastomalli, joudutaan harkitsemaan tarkkaan minkälaisella geometrialla aluetta mitataan. Varsinkin jyrkkä maasto ja suuri laserpulssin tulokulma aiheuttavat merkittäviä virheitä tasotarkkuudessa. [1, s. 108–109.] Jos pistetiheys on pieni ja keilausgeometria on yhdensuuntaista, saattaa esimerkiksi rakennusten kattolinjojen määrittämiseen syntyä ongelmia, mikäli rakennuksen seinälinjat ovat samansuuntaisia kuin keilausgeometria.

### 3.7 Pintamateriaali

Hyyppä & Hyyppä huomasivat eri pintamateriaalien välillä vain pieniä systemaattisia eroja. Huomioiden mahdolliset yksitäisten pisteiden virheet ja keilauslinjojen systemaattiset virheet, on materiaalien välinen tarkkuusero hyvin pieni. Eri materiaalien satunnaisvirhe mitattaessa 200 metrin korkeudesta vaihteli vain 4–6 senttimetrin välillä. Mittaukset tehtiin ja prosessoitiin kuitenkin hyvin tarkasti, jolloin mittaustilanne suoritettiin optimiolosuhteissa. [8, s. 6–8.]



Kuva 12. Maastonpinnanlaadun vaikutus laserkeilausaineiston tarkkuuteen.

Pintamateriaalien vaihtelevat reflektanssiarvot aiheuttavat etäisyysmittauksissa virhelähteitä. Eri pintamateriaalien reflektanssi aiheuttaa erisuuruisen takaisinsironnan. Mittattavien pintojen reflektanssiarvot vaihtelevat suuresti eri pintamateriaaleilla, jolloin reflektanssin suuntariippuvuutta ei tunneta tarpeeksi tarkasti. [20, s. 26.] Hyvin heijastavista pinnoista saadaan tarkemmat etäisyyshavainnot kuin huonosti heijastavista pinnoista. Vaaleiden ja tummien pintojen välillä voi siis esiintyä systemaattista etäisyys siirtymää. [8, s. 6–8].

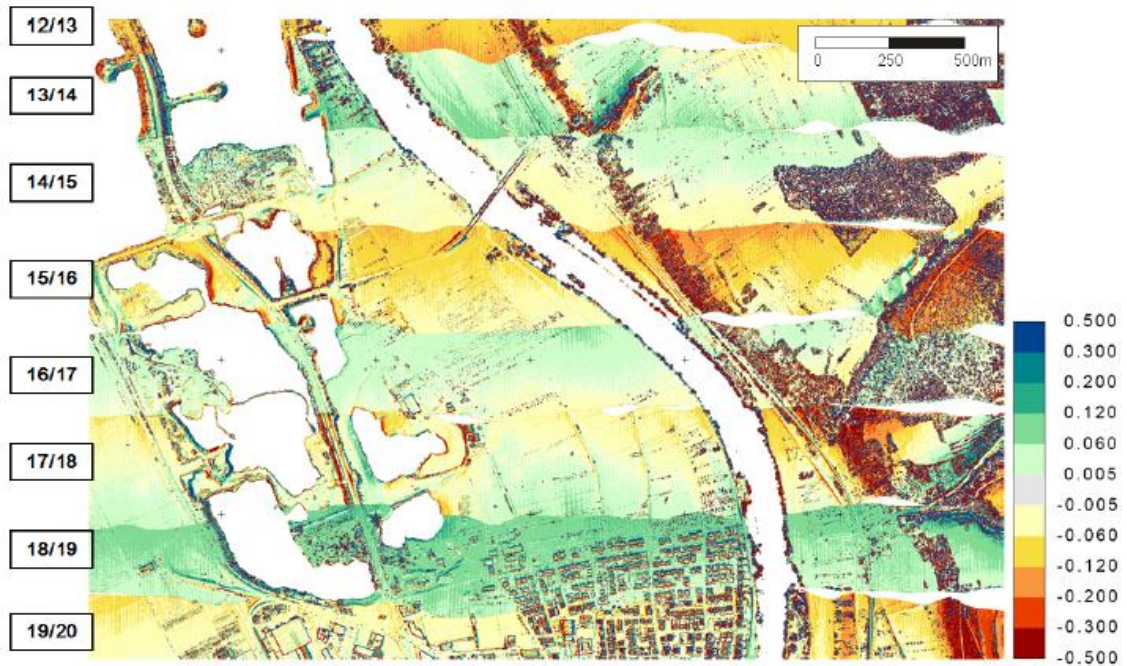
Laserkeilaimen etäisyshavaintojen tarkkuus ja varmuus heikkenee mittausetäisyyden kasvaessa. Kauemmista kohteista voidaan havaita joissakin tilanteissa vain hyvin heijastavat ja laserjalanjälkeä suuremmat kohteet. Huonosti heijastavista ja pienistä kohteista saadaan paluupulssina heikompi teho, jolloin mittaustarkkuus ja mittausten luotettavuus heikkenee. [20, s. 27.]

### 3.8 Peitteisyys

Maanpinnan tarkkuuteen vaikuttaa suurimpana yksittäisenä tekijänä kasvillisuus ja erityisesti puusto. Mittaustarkkuus ja laserpulssin läpäisevyys vaihtelee puuston tiheyden, puulajin, mittausajankohdan, aluskasvillisuuden ja pinnan kaltevuuden mukaan. Suomen metsissä keskimääräinen tarkkuus on noin 20 senttimetrin luokkaa ja kovilla pinnoilla, kuten asfaltilla, noin 10 senttimetrin suuruusluokkaa. Suurimmat virheet syntyvät tiheässä ja rinteisessä kuusimetsässä sekä tiheään aluskasvillisuuden metsissä. Erittäin tuuhean aluskasvillisuuden metsissä laserpulssit eivät läpäise kasvillisuutta ja maanpinnan malliin syntyy kasvuston pituuden verran korkeusvirhettä. Laserkeilaus kannattaakin suorittaa ennen lehtien tuloa tai niiden putoamisen jälkeen. Tarkan maastomallin keilauksia ei kannata tehdä peltoviljelyiden takia kesäkuun puolenvälin ja elokuun loppuun aikana. [18, s. 8.]

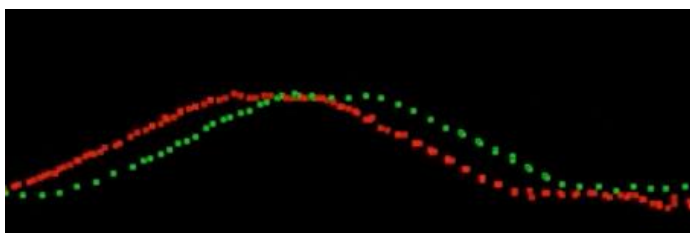
### 3.9 Lentojonojen väliset virheet

Eri lentojonojen keräämien pistepilvien välille syntyy geometrisiä virheitä, johtuen esimerkiksi laserkeilainpeilin systemaattisesta virheestä tai GNSS-IMU-kalibroinneista tai laskennallisista virheistä. Myös keilaimen ja inertiamittauslaitteen välisessä asennossa havaitaan usein epävakaisuutta. Jokaisella lentojonolla on yksilöllinen systemaattinen virheensä. Virheistä johtuen vierekkäisten lentojonojen päällekkäisillä peittoalueilla havaitaan pisteiden välillä ristiriitaa korkeus- tai tasokoordinaateissa (kuva 13).



Kuva 13. Lentolinjojen päällekkäisten alueiden koordinaattieroja visuaalisesti esitettynä [34].

Lentojonojen väliset peittoalueet aiheuttavat virheitä tai hankaloittavat pistepilven automaattista pisteluokittelua [7, s. 5–6]. Linjojen välillä voi olla jopa 20–30 cm:n eroja (kuva 14). Tyypillisesti systemaattiset erot ovat noin 10 cm. [8, s. 4-5.] Koko laserkeilausaineiston laatu heikkenee, jos systemaattisia virheitä ei poisteta. Näin mittausaineiston tarkkuus heikkenee sentteistä jopa kymmeneen senttimetriin. Lentojonojen väliset geometriset virheet minimoidaan tasoittamalla jonot yhteensopiviksi. Jonot sovitaan yhteen maastotukipisteiden avulla, jotka mitataan tarpeeksi tiheästi tasaiseen maastoon, kuten tasaiselle asfalttialueelle. [7, s. 5–6.]



Kuva 14. Kahden eri lentojonon systemaattiset koordinaattivirheet. Kuvankaappaus Terrascan-ohjelmasta.

## 4 Pistepilven laadunvarmistus

### 4.1 Pistepilven kalibrointi

Pistepilvi kalibroidaan paikalliseen koordinaatistoon maastossa mitattujen kalibrointipisteiden avulla. Kalibrointipisteinä käytetään erikseen tasotarkkuus- ja korkeuspisteitä, joiden mittaustavat eroavat toisistaan. [10, s. 27.] Kalibrointipisteitä pitää olla mittausalueella tasaisesti. Tarkan lopputuloksen saamiseksi pistepilviaineistoa nostetaan tai lasketaan vertailuraportin antamien tietojen mukaan. [31, s. 37.]

Tasotarkkuuskalibrointipisteitä käytetään korjaamaan laserkeilausaineiston x- ja y-koordinaattien virheet, jolloin laserkeilausaineisto istuu tarkemmin paikalliseen tasokoordinaatistoon. Tasotarkkuuspisteitä on huomattavasti vaikeampi löytää kuin korkeuspisteitä. Tasotarkkuuspisteitä voidaan kerätä esimerkiksi ojan keskilinjojen kohdalta [10, s. 27] tai rakennuskulmien avulla [8, s. 4].

### 4.2 Pistepilven laaduntarkistus

Pistepilven laadun tarkistaminen aloitetaan pikatarkistuksella, jossa harvennetusta pistepilvestä tutkitaan ensimmäisenä jonojen välistä geometriaa sekä verrataan pistepilven korkeutta maastossa vaaittuihin korkeusreferenssipisteisiin tai –pintoihin. Pistepilviaineiston tulee olla tarpeeksi kattava peittääkseen halutun alueen kokonaan. Pistepilveä kannattaa usein verrata myös stereokartoituksen pintamalliin, jolloin karkeat virheet voidaan havaita paremmin. [7, s. 5.]

Laaduntarkistukset kuuluvat keilauslennon suunnittelija- ja toteuttajaorganisaatiolle. Laaduntarkistus kannattaa tehdä heti lennon jälkeen, jolloin aineiston vakavia puutteita voidaan vielä korjata ja suorittaa tarvittaessa uusi keilauslento. Virheiden ollessa riittävän pieniä - - voidaan niitä pienentää tasoittamalla. [7, s. 5.]

### 4.3 Maastomallin laaduntarkistus

Maastomalleja käytetään hyväksi tärkeissä rakentamiskohteissa, jolloin sen tarkkuudesta ja laadusta tulee olla hyvä käsitys. Maastomallin tarkkuutta voidaan tarkastella

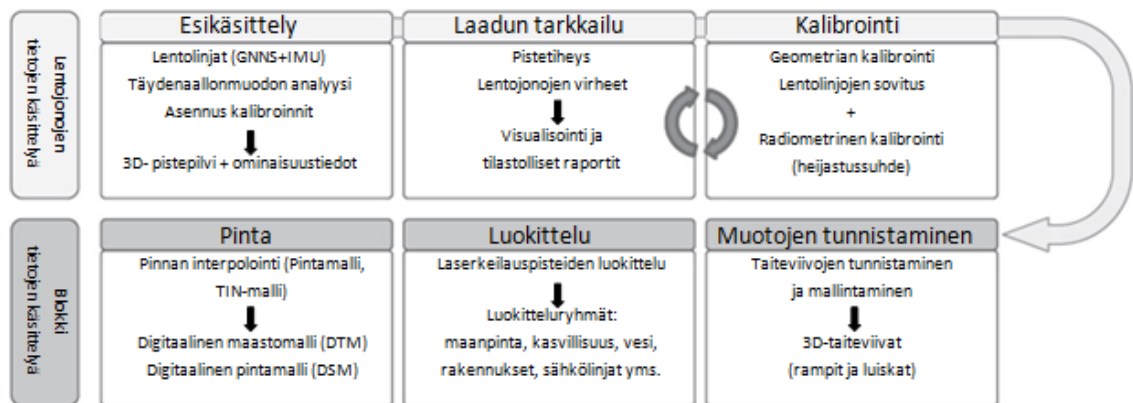


havainnollistamalla pistepilven tiheyttä, tarkkuutta, pisteiden etäisyyksiä toisistaan ja eri laserkeilaimilla tehtyjen mittausten välisten virheiden tutkimista.

## 5 Pistepilven käsittely

Pistepilven käsittely vaatii yleensä useamman sovellusohjelman pistepilven georeferoinnista pistepilven luokitteluun ja lopulta lopputuotteiden tekemiseen (kuva 15). TerraSolidin ohjelmistoilla voidaan tehdä suurin osa laserkeilausaineiston alkukäsittelystä, mutta ohjelmalla ei pysty valmistamaan läheskään kaikkia tarvittavia lopputuotteita.

Ilmalaserkeilauksessa GPS:n, IMU:n ja laserkeilaimen lähettämät tiedot prosessoidaan heti verkossa ja pistepilvitiedot kirjoitetaan samalla automaattisesti kovalevyille. Karkeita laserkeilaustuloksia voidaan siis tarkastella jo keilausvaiheessa – lentokoneessa. Tarkempien tulosten saamiseen joudutaan kuitenkin tekemään pistepilviaineiston jälkikäsittelyä. Jälkikäsittelyssä toteutetaan ja tarkistetaan täydennaallonmuodon signaalit, georeferointi, keilauslinjojen yhteensopivuus sekä sisäinen ja ulkoinen mittaustarkkuus, tarvittaessa mittaustulosten karsiminen sekä pistepilven virhepisteet ja pisteiden luokittelu. Lopuksi aineistolle tehdään tarvittavat korjaustoimenpiteet. [34, s. 2–3.]



Kuva 15. Ilmalaserkeilausaineiston käsittelyvaiheet [35].

Aluksi suoritetaan paluuaallonmuodon radiometrinen kalibrointi, josta saadaan paluuaallonmuodon leveys, amplitudi ja takaisinsironta mitattavan kohteen eri kohdissa selvitettyä. Seuraavaksi jokaisen lentolinjan pistepilvet georeferoidaan, eli aineisto muunnetaan mittausalueen koordinaattijärjestelmään. Seuraavaksi suoritetaan laaduntarkkailua, jossa vaaditaan tarkkaavaista aineiston käsittelyä. Laaduntarkkailussa tarkistetaan aineiston alueellisen kattavuuden ja pistetiheyden riittävyyttä käyttötarkoituksia vastaa-

viksi sekä päällekkäisten lentolinjojen tarkkuutta toisiinsa nähden, esimerkiksi värillisten eroavaisuuskarttojen avulla. Lopulta pistepilvestä muodostetaan pintamalli ja kirjoitetaan kaikkien päällekkäisten lentolinjojen tiedot ylös. Pistepilven taso- ja korkeustarkkuutta verrataan mittausten ulkopuolisiin referenssipisteisiin ja pistepilven korkeus- tai tasoasemaa korjataan tarpeen mukaan referenssipisteitä vastaaviksi. Laaduntarkkailu prosessia jatketaan niin kauan kunnes vaadittava tarkkuus saavutetaan. [34, s. 3.]

Seuraavaksi lentolinjat kootaan yhdeksi pistepilvikokonaisuudeksi ja tarvittaessa pilkotaan pienempiin osiin, jolloin aineistoa on helpompi käsitellä. Tämän jälkeen pisteet luokitellaan maanpinnaksi, kasvustoksi, rakennuksiksi tai muuksi kohteeksi. Aineistosta tunnistetaan ja piirretään tarvittaessa automaattisesti maaston muotojen taiteviivat rakennetuilla- ja maastonpinnoilla. Taiteviivojen tunnistamiseen käytetään geometrian vaihteluita, esimerkiksi jos maanpinnantasojen välissä on tietty kulma tai läheisten pisteiden välissä on tarpeeksi korkeuseroa. Täyden aallonmuodon laserkeilaimilla saadun takaisinsironnan ansiosta aineiston luokittelu on muuttunut tarkemmaksi ja luotettavammaksi. Lopputuotteena pistepilviaineistosta valmistetaan yleensä maasto- tai pintamalli, jota voidaan hyödyntää eri käyttötarkoituksiin. [34, s. 3.]

## 5.1 Pistepilven kalibrointi ja koordinaattimuunnos

Projektikalibroinnilla tarkoitetaan lentojonoittain mitattujen pisteiden yhteensovittamista keskenään ja pisteiden muuntamista haluttuun koordinaattijärjestelmään. Lentojonojen välillä esiintyy ristiriitaa, jolloin virheet tulee korjata. Jonojen väliset virheet poistetaan painottamalla korkeuserojen minimointia. Laserkeilainpisteille lasketaan uudet sijainnit yhteensovituksen lopputuloksena. Yhteen sovitetulle pistepilvelle tehdään viimeiseksi lopullinen koordinaattimuunnos haluttuun koordinaattijärjestelmään. [7, s. 5–6.]

## 5.2 Pistepilven luokittelu

Käsittämättömässä pistepilviaineistossa ei ole tietoa pisteiden kohdetiedoista, eli mitä kohdetta pisteet kuvaavat. Aineiston tehokas hyödyntäminen vaatii pisteiden kohdetiedot. Pistepilven luokittelussa voidaan käyttää hyväksi laserpisteiden koordinaatti-, heijastus-, kaiku- ja mittausaikatietoja. Näiden avulla laserpisteet voidaan luokitella eri maanpinnan kohteiksi, kuten maanpinnaksi, rakennuksiksi ja kasvillisuudeksi. [11, s. 207.] Maanpinnan automaattinen luokittelu perustuu paluupulssien järjestyslukuun [7,

s. 6]. Pisteiden automaattinen luokittelun jälkeen kannattaa aina tarkastaa mahdollisia virheluokitteluita visuaalisesti ja korjata virhepisteet manuaalisesti.

### 5.2.1 Maanpinnan alapuoliset pisteet (low points)

Virheellisten maanpinnan alapuolisten pisteiden poistaminen aineistosta on tärkeää analyysien luottavuuden kannalta. Maanpinnan alapuolisten pisteiden poistaminen suoritetaan ennen maanpinnan luokittelua. Virheelliset pisteet voivat aiheutua kaivoista tai puiden ja rakennusten aiheuttamista moniheijastumista. Virhepoikkeaman aiheuttavat pisteet, jotka ovat määriteltyä arvoa alempana kuin viereiset maastonpinnan pisteet. Terrasolidin pisteiden luokittelumakrossa on asetettu maanpinnan poikkeaman oletusarvoksi puolimetriä (0,5 m). [11, s. 207.]

### 5.2.2 Maanpinnan pisteet

Maanpinnan pisteet luokitellaan pisteiden keskinäisen sijainnin perusteella. TerraScan-sovellus luokittelee maanpinnan pisteiksi kaikki viimeisen paluupulssin pisteet. Maanpinnan pisteiksi luokitellaan siis usein laserkeilausaineiston alimmat mitatut pisteet, kunhan virhepisteet on suodatettu ensin pois aineistosta. TerraScanin luokittelumakro etsii maanpinnan pisteitä tiettyjen parametrien avulla. Makro etsii maanpinnan pisteitä niin kauan, kunnes parametreihin soveltuvia pisteitä ei enää löydy.

### 5.2.3 Kasvillisuuspisteet

Ennen kasvillisuuspisteiden luokittelua täytyy suorittaa maanpinnan pisteiden luokittelu, koska kasvillisuuden pisteet luokitellaan maanpinnan pisteiden korkeussijainnin perusteella. Esimerkiksi aluskasvillisuudeksi voidaan luokitella pisteet, jotka sijaitsevat alle 50 senttimetrin korkeudella maanpinnasta ja keskikorkea kasvillisuus 50–250 senttimetrin korkeudella maanpinnan pisteistä. Yli 250 senttimetrin korkeudelta maanpinnasta voidaan automaattisesti luokitella korkeaksi kasvillisuudeksi.

### 5.2.4 Manuaalisesti luokiteltavat pisteet

Automaattisen luokittelun jälkeen tietyille maastonkohteille toteutetaan vielä manuaalinen luokittelu ja tarkastus. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi sillat, vaka- ja virtavedet. [7, s. 7.] Kyseisten kohteiden manuaaliseen luokitteluun käytetään hyväksi Maastotie-

tokannan vesistötietoja, kuten tietoja rantaviivoista, joista, puroista ja virtaavista vesistä. Pistepilven rantaviivan sijainti lasketaan keilausajankohdan vedenkorkeuden tasolle. Maaston jyrkät kohdat tuottavat ongelmia automaattiselle luokittelulle. Automaattinen luokittelu ei pysty luotettavasti erottamaan jyrkänteiden tai luiskien pensaikkoja maanpinnasta. Automaation tulisi ohittaa jyrkänteet ja ne tulee lisätä maanpinnanluokkaan manuaalisesti. [27, s. 3.]

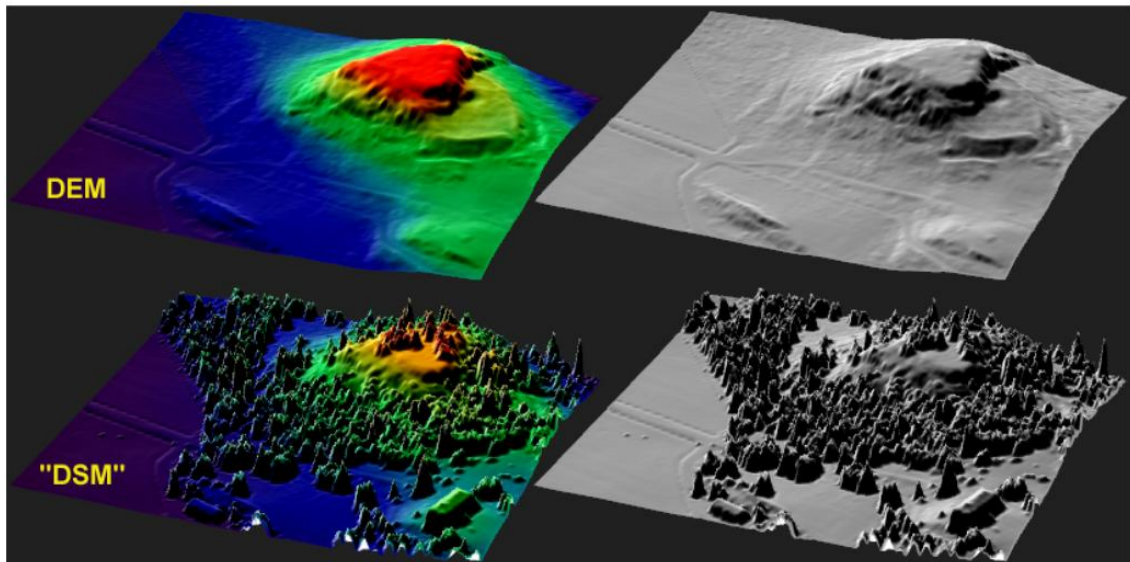
#### 5.2.5 Rakennuspisteet

Rakennuslaserpisteiden automaattinen luokittelu on saatu nykyisillä teknologioilla kohdallaisen tarkaksi ja laadukkaaksi. Rakennuspisteet erotetaan kasvillisuuspisteitä erilaisilla tekniikoilla, kuten tarkastelemalla pinnan tasaisuutta, kohteen muotoa ja kokoa, heijastus- ja intensiteettitietoa sekä vertaamalla ensimmäisen ja viimeisen paluupulssin tietoja. Esimerkiksi kasvillisuudesta kimpoaa takaisin sensorille useita paluupulsseja selvästi eri kohdista, toisin kuin tasaiselta katolta. [11, s. 208.]

## 6 Pistepilven käyttökohteet

Pistepilviaineistojen yleistyessä ja halventuessa, voidaan aineistoa hyödyntää erilaisiin käyttötarkoituksiin. Laserkeilausaineisto on monikäyttöinen lähtöaineisto useisiin paikkatietosovelluksiin, kuten paikkatietoaineistojen ajantasaistamiseen, korkeusmalleihin, tilavuuslaskentaan, tieliikenteen verkkosuunnitteluun, metsäinventaarioon, tietoliikenteen verkkosuunnitteluun, tulvakartoituksiin, kiinteistötalouteen, ympäristövaikutusten arviointiin, meluanalyyseihin ja yhdyskuntatekniikan ja rakentamisen suunnitteluun sekä virtuaalimalleihin ja kaupunkimalleihin. [18, s. 7.]

Laserkeilauksen päätuotteita ovat maanpinnan, kasvuston ja rakennuksien pintamallit ja pisteet sekä ortoilmakuvat. Useimmiten tilaaja käyttää vain maastomallia työssään, mutta muidenkin kohteiden pisteitä ja pintamalleja voidaan hyödyntää (kuva 16). Esimerkiksi yksittäisten rakennuksien ja puiden korkeutta, paikkaa tai muotoa voidaan tarkastella ja käyttää hyväksi metsän inventaariossa sekä tulva- ja meluanalyyseissä. [31, s. 36.]



Kuva 16. Yläpuolella pintamallissa mukana vain maanpinnan pisteet ja alemmassa myös kasvuston pisteet [7].

Ylivieskan kaupungissa sitouduttiin käyttämään laserkeilausaineistoa jokapäiväisessä työssä hyväksi ja kokeilulla saavutettiin merkittävät hyödyt. Pistepilviaineistoa käytettiin kolmen vuoden aikana aktiivisesti yleis- ja asemakaavoitukseen, kunnallistekniikan suunnitteluun, puistojen suunnitteluun ja hoitoon, rakennuslupakäsittelyyn, kanta-karttojen tekoon ja päivittämiseen ja numeerisen viemärikartan tekemiseen. Aineistosta on huomattu olevan apua jopa kiinteistörajaselvityksissä. [31, s. 37.]

## 6.1 Korkeuskäyrät

Korkeuskäyrät ovat perinteinen tapa havainnollistaa kartalla maaston muodot. Korkeuskäyriä on kahdenlaisia; matemaattisesti oikeita ja kartografisesti esitettyjä korkeuskäyriä. Matemaattisesti esitetyt korkeuskäyrät seuraavat tarkasti maanpinnan muodon vaihteluita ja ne kuvaavat tarkasti maanpintaa. Käyristä muodostuu kuitenkin todella teräviä ja sahalaitaisia, jolloin niitä ei voida käyttää karttatuotannossa. Kartografisesti piirretyt korkeuskäyrät ovat sulavia sekä pehmeitä ja ne soveltuvatkin hyvän visuaalisen ilmeensä takia karttapohjiin. Kartografiset korkeuskäyrät eivät esitä maanpintaa absoluuttisen tarkasti, mutta antavat hyvän yleiskäsityksen alueen pinnan muodoista. [13]

Korkeuskäyriä on perinteisesti valmistettu stereokartoituksen avulla. Stereokartoituksessa pisteen koordinaatit saadaan mitattua kahdelta eri ilmakuvalta. Työ on ollut hyvin aikaa vievää ja raskasta verrattuna laserkeilauksella tuotettuihin korkeuskäyriin. Ste-

reokartoituksella ei pystytä mittaamaan maanpintaa tarpeeksi tarkasti metsäalueella, sillä stereokartoituksessa ei voida mitata maanpintaa puiden alta. Jos metsäalueelta ei löydy tarpeeksi avonaisia paikkoja, tulee stereokartoittajan karkeasti arvioida maanpinnan korkeus tai maastomittausryhmä voi käydä tihentämässä maastomallia. Kokeneelta stereokartoittajalta voi kuluu parikin viikkoa 9 neliökilometrin alueen mallintamiseen ja korkeuskäyrien tuotantoon. [12, s. 2.]

Nykyään suurimmaksi osaksi korkeuskäyrät valmistetaan laserkeilauspisteitä käyttämällä. Useat kunnat ovat vaihtamassa tai jo vaihtaneet korkeusjärjestelmänsä N43 tai N60:sta uuteen valtakunnalliseen N2000-järjestelmään, jonka takia tarvitaan uudet korkeuskäyrät. N2000:n ero N60:en vaihtelee kunnittain noin 13–43 senttimetrin välillä. [15, s. 1–2.] Suurin syy erojen suuruuteen on maannousu, joka on kohonnut vuodesta 1960. Tuusulan kunnassa käytetään edelleen vanhempaa N43 korkeusjärjestelmää, mutta parin vuoden sisällä Tuusulassa ollaan siirtymässä uuteen N2000-korkeusjärjestelmään. N43-järjestelmän korkeudet eroavat Tuusulassa N2000:sta noin 30–32 senttimetriä. Maannousun takia korkeusjärjestelmä tulee päivittää noin pari kertaa vuosisadassa. [14, s. 12.]

Tuusulan kunnalle etsittiin tapoja uusien korkeuskäyrien valmistamiseen nykyisestä N43-korkeusjärjestelmästä N2000-järjestelmään. Korkeuskäyrien tuottamiseen N2000-korkeusjärjestelmään käytettiin Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistosta vuodelta 2008. Testikäyttöön tarkoitetut raat korkeuskäyrät tuotettiin ensin FME-Desktop-ohjelmistolla, mutta lopulliseen versioon käyrät tehtiin TerraModeler-ohjelmistolla. Käyrät piirrettiin metrin välein ja joka viides metri korkeuskäyrät piirrettiin vahvemaksi johtokäyräksi, kuten asemakaavan pohjakartan laadintaoppaassa on suositeltu.

Pohjakartalla esitetään digitaalisessa muodossa kohteita ja elementtejä, joiden kohdalla korkeuskäyrät tulee poistaa kartan luettavuuden ja siisteyden parantamiseksi. Manuaalisen työnä korkeuskäyrien muokkaaminen alusta loppuun kestäisi tuhattoman kauan ja se olisi taloudellisesti kannattamatonta. Työn tarkoituksena oli löytää automaattisia tapoja korkeuskäyrien siistimiseen. Automaatiolla päästään vain tiettyyn pisteeseen ja loput korjaukset tulee tehdä manuaalisesti. Kaikkia virheitä ei siis voi millään korjata automaattisin menetelmin.

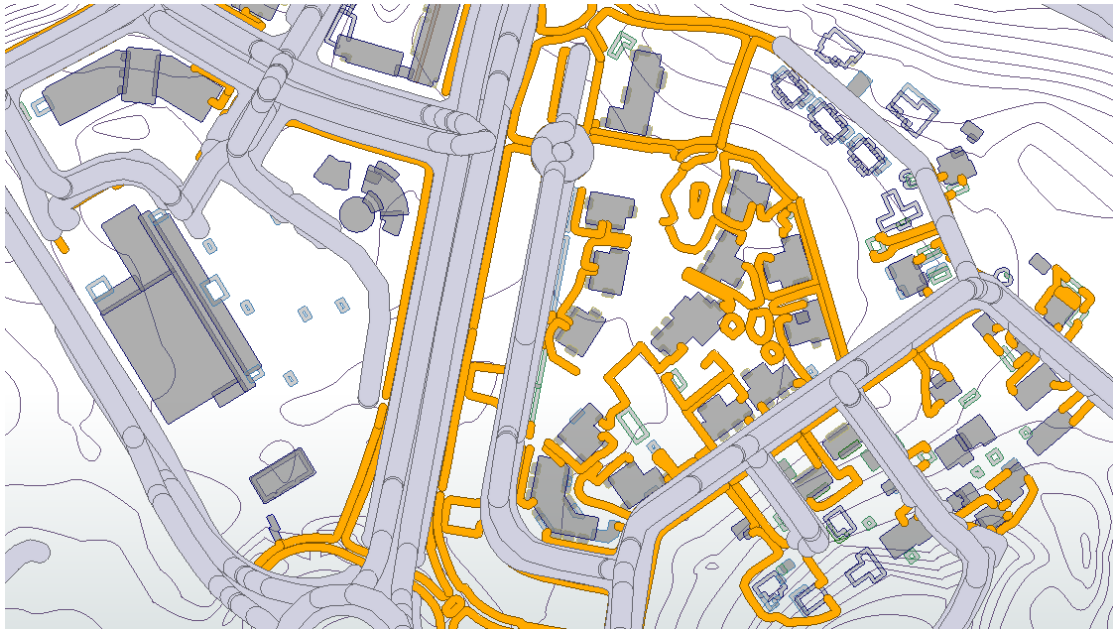
Korkeuskäyrien tulee leikata useita alue- ja viivaelementtejä, kuten rakennuksia ja ajoteitä (kuva 17). Leikattaviksi kohdiksi valittiin kaikki asemakaavan pohjakartan laatimisohjelmien osoittamat kohteet, kuten rakennukset, jyrkänteet, ojat tai purot, luiskat,

tiet sekä täytemaat (taulukko 1). Muut leikattavat elementit valittiin pohjakartan elementteistä. Korkeuskäyrät leikattiin kyseisten ja muiden päätettyjen elementtien kohdalta buffereiden avulla. Bufferin leveys määritti, kuinka etäältä viivaelementistä korkeuskäyrät leikataan. Jokaiselle eri elementille määritettiin bufferin leveys erikseen. Esimerkiksi ajoratojen reunoista leikattiin kaikki korkeuskäyrät, jotka olivat neljän metrin etäisyydellä ajoradan reunasta ja rakennuksista yhden metrin etäisyydeltä. Korkeuskäyrien muokkaaminen toteutettiin FME-desktop-ohjelmistolla.

*Taulukko 1. Käyriä leikkaavien elementtien tiedot*

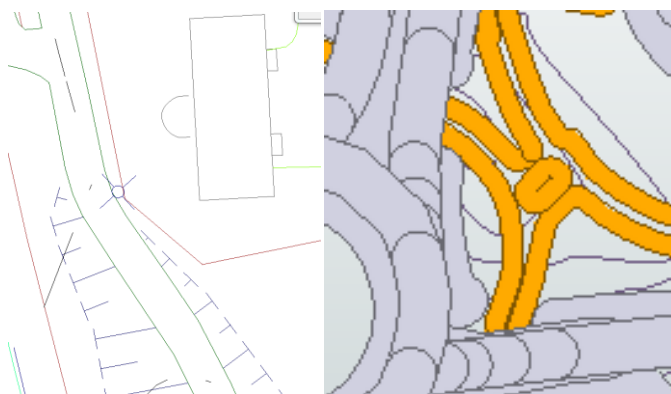
Elementti	Bufferin leveys (m)
Digiroad valta-, kanta-, ja seututiet, kokoojakadut ja liityntäkadut (keskilinja)	4
Digiroad muut yksityistiet	2
Kantakartan ajoradat	4
Kantakartan tien reunat, kivetyksen reunat, asfaltin reunat, päällysteen reunat	2
Kantakartan kevyenliikenteenväylät	2
Kantakartan junaradat	1
Kantakartan rakennukset ja katokset	1
Kantakartan muut kohteet; Luiskat, jyrkänteet, vesialueet, puistotiet, ulkoilutiet, muuntamot	2

Kunnan pohjakartalle on kartoitettu ja piirretty useilla eri elementtityypeillä, jotka kuitenkin vastaavat korkeuskäyrätuotannossa käytännössä samoja elementtejä. Esimerkiksi tien reunaviivat on voitu piirtää ajoradaksi, asfaltin reunaksi, tienreunaksi tai reunakiveksi. Elementtien kirjo on siis hyvin heterogeeninen, ja leikattaviksi elementeiksi piti tarkkaan valita kaikki vaadittavat kohteet.



Kuva 17. Yleiskuva FME-Desktop –ohjelmistolla tehdyistä korkeuskäyrää leikkaavista buffereista. Tumman harmaalla on esitetty rakennukset, vaalean harmaalla ajoradat ja oranssilla kevyen liikenteen väylät.

Ajoratojen bufferileveydeksi valittiin neljä metriä, jolla saatiin poistettua pienempien teiden keskeltä suurin osa korkeuskäyrästä. Suurimpien ajoratojen väliin jäi kuitenkin korkeuskäyriä, koska neljän metrin bufferi ei riittänyt poistamaan käyriä tien keskeltä. Bufferin leveyttä olisi joutunut kasvattamaan tolkkuttoman isoksi, jolloin tärkeitä korkeuskäyriä olisi poistunut ajoradan reunoilta. Tämän takia päätettiin käyttää apuna Digiroad-aineistoa, joka on liikenneviraston ylläpitämää teiden keskilinja-aineistoa. Digiroad-aineiston avulla saatiin korkeuskäyrät leikattua leveämpien teiden keskikohdista.



Kuva 18. Korkeuskäyriä kevyen liikenteenväylän keskellä.

Useisiin kevyen liikenteenväylien keskikohtiin jäi buffereiden jälkeen rakoa, minne korkeuskäyrät eivät saisi piirtyä (kuva 18). Väliin jääneet korkeuskäyrät olivat pääasialli-

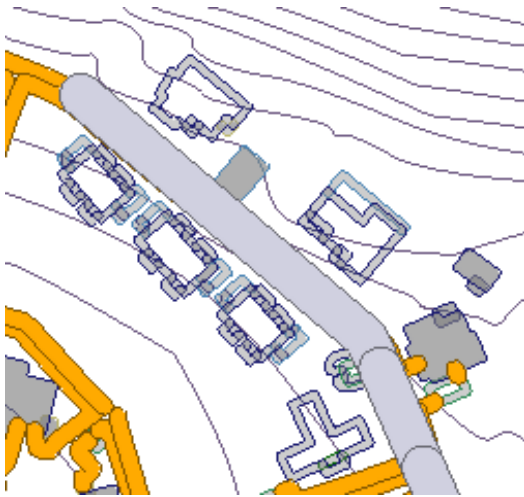


sesti lyhyitä – alle kymmenmetrisiä käyriä. Yhtenä vaihtoehtona olisi ollut poistaa kaikki alle 10-metriset korkeuskäyrät aineistosta, mutta samalla olisi hävinnyt paljon tarkoituksenmukaisia ja tärkeitä käyriä. Ratkaisuksi keksittiin poistaa ainoastaan korkeuskäyrät, jotka leikkaavat vähintään kahta kevyenliikenteenväylän buffer-elementtiä ja ovat alle kahdeksan metriä pitkiä. Menetelmä otti mukaan joitakin sellaisiakin korkeuskäyriä, joiden ei olisi tarvinnut poistua (kuva 19). Etenkin risteyksissä, mistä haarautuu useampi kevyenliikenteenväylä, syntyi eniten virhepoistoja. Ratkaisu poisti kuitenkin suhteellisen vähän hyödyllisiä korkeuskäyriä ja oli selvästi parempi ratkaisu kuin poistaa kaikki korkeuskäyrät, jotka ovat alle 10 metrin pituisia. Samaa tekniikka hyödynnettiin lopulta myös ajoratoihin, koska Digiroads-keskilinja-aineiston jälkeenkin leveimmille tieosuuksille ja liittymiin jäi korkeuskäyriä.



Kuva 19. Korkeuskäyrä kahden kevyenliikenteenväylän välissä, jonka ei olisi tarvinnut poistua (ympyröity punaisella).

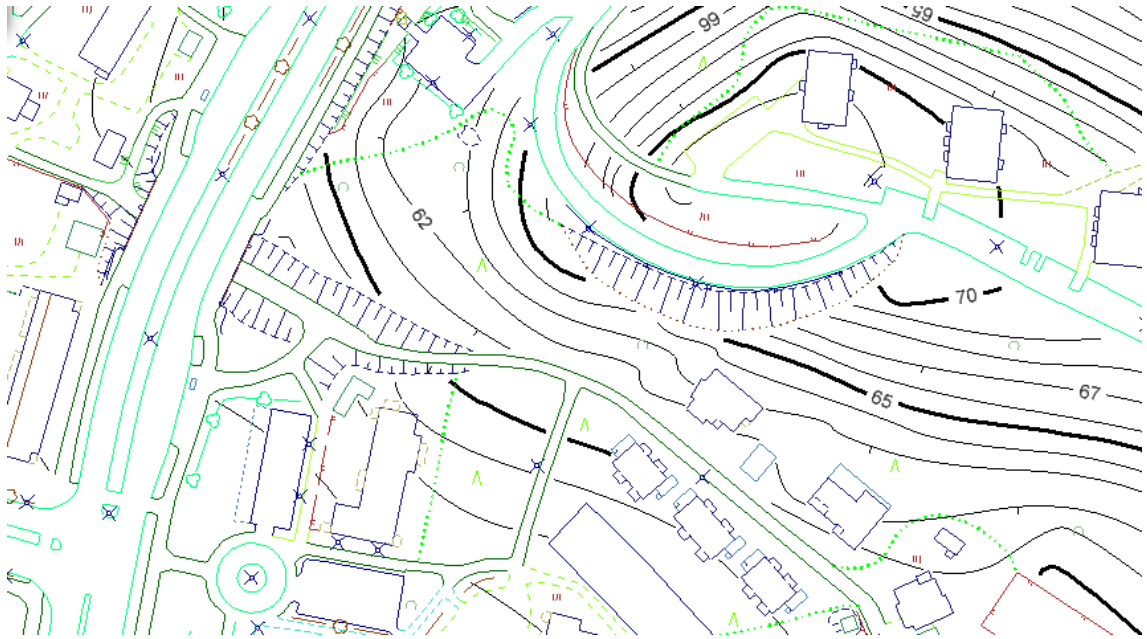
Korkeuskäyrätuotannossa ongelmia aiheuttivat suuret ja laajat alueet, kuten teollisuusalueet ja parkkipaikat. Yleensä tämänkaltaiset alueet merkitään hajakorkeuspistein, jotka on saatu alue kartoittamalla tai suoraan pistepilviaineistosta. Laajojen asfalttialueiden tai vastaavien korkeuskäyrien poistaminen täytyy tehdä manuaalisesti, koska sopivaa automaattista ratkaisua ei löytynyt. Tasaiselle peltoalueelle saattoi ilmestyä laajalle alueelle röpelöistä korkeuskäyrästä ja pieniä korkeuskäyräympyröitä. Korkeuskäyrästä poistettiin automaattisesti kaikki korkeuskäyrät, joiden sulkeutunut pinta-ala oli alle 1 m<sup>2</sup>. Näin saatiin vähennettyä manuaalista työtaakkaa ja määritelty pinta-ala oli tarpeeksi pieni, ettei maastonmuotoja kuvaavia tärkeitä käyriä hävinnyt. Useille peltoalueille tulee tehdä rosoiset korkeuskäyrät uudelleen stereomittaamalla automaattisesti luodun korkeuskäyrän tilalle uusi käyrä.



Kuva 20. Rakennukset eivät ole muodostuneet kokonaiseksi alueeksi.

Yhtenä ongelmana oli, että kaikkia rakennuksia ei ollut piirretty alueina vaan yksittäisinä viivoina (kuva 20). Rakennuksen sisäosaan jäi korkeuskäyriä, koska alue ei ollut sulkeutunut. Rakennukset muutettiin Microstationin työkalulla automaattisesti alueelementeiksi, ja suurimpaan osaan rakennuksista työkalu toimikin hyvin. Muutamia rakennuksia jäi siltikin muodostumatta alueeksi, koska rakennusten seinään oli jäänyt piirtäessä pieni rako ja rakennukseen ei muodostunut yhtenäistä seinälinjaa. FME-desktop-ohjelmalla korjattiin loput rakennukset aluemaisiksi käyttämällä vastaavanlaisia työkalua. Työkalu etsi määritetyltä etäisyydeltä saman luokan elementtiä, joiden välissä oli tietyn suuruinen rako ja yhdisti ne automaattisesti alueeksi.

Ongelmana oli Maanmittauslaitoksen vuodelta 2008 mitattu hieman vanhentunut laserkeilausaineisto, jonka jälkeen maanpinta on muuttunut useilla alueilla radikaalisti. Tuusulassa odotellaankin lopullisten korkeuskäyrien tekemistä siihen saakka, kunnes Maanmittauslaitos keilaa Etelä-Suomen uudestaan 2014–2015 aikana, koska raa'at korkeuskäyrät eivät olleet tarpeeksi tasokkaita. Manuaalista työtä olisi vaadittu huomattava määrä virheiden korjaamiseen eikä kaikkia virheitä olisi välttämättä edes huomattu.



Kuva 21. Lopulliset korkeuskäyrät.

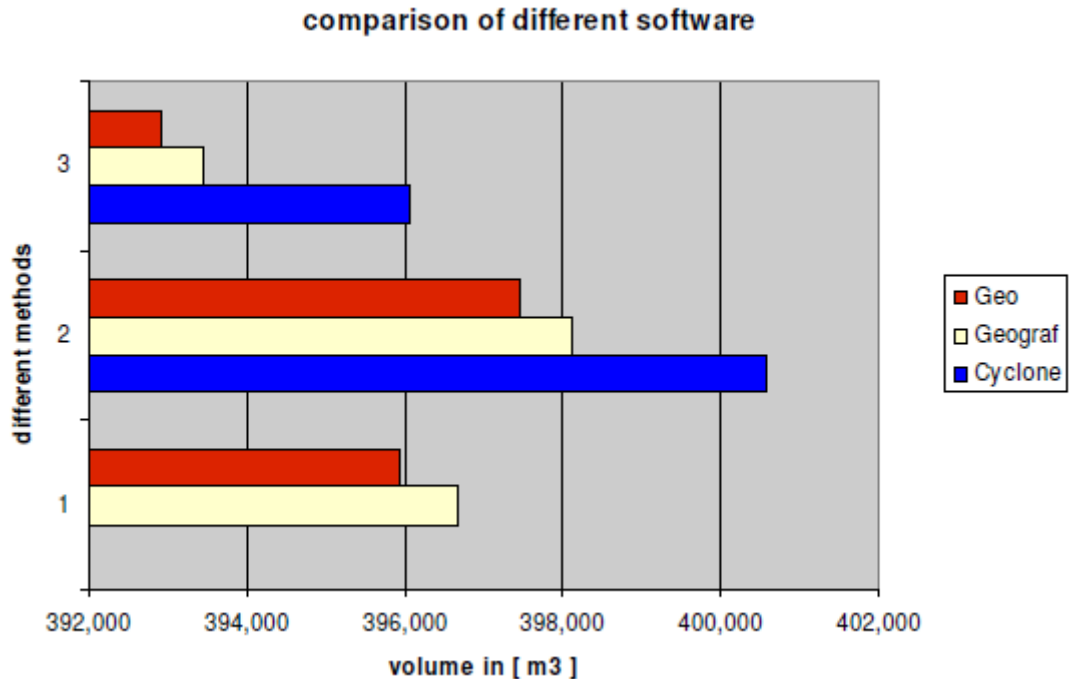
Lopulliset korkeuskäyrät (kuva 21) leikataan aluepiirien mukaan, jotta niitä voidaan tietokoneella sulavasti käyttää. Nykyinen korkeuskäyrästä on jaettu Tuusulassa noin 30 alueosaan. Korkeuskäyrien manuaalinen korjaaminen alkaa joka päivässä ylläpityössä muiden töiden ohella.

## 6.2 Tilavuuslaskenta

Tilavuuden laskemiseen käytetään useita eri tapoja, riippuen mitattavan kohteen muodosta. Tilavuuden mittaustavat voidaan jakaa kahteen ryhmään; lineaaristen ja pinta-kohteiden laskentatapoihin. Esimerkiksi lineaarisiksi kohteiksi lasketaan tiet, junaradat sekä tunnelit ja pintakohteiksi kukkulat, kuopat ja maanottamopaikat. Jokaisella laskentatavalla on omat hyöty- ja haittapuolensa. Laserkeilauksella tuotetusta maastomallista voidaan laskea tilavuuksia neljällä eri tavalla:

1. pisteitä mallintamalla
2. kolmiointiin perustuvalla mallinnuksella
3. ruutuverkkomallinnuksella
4. risteytysmallinnuksella kolmesta mainitusta tavasta.

Useimmin käytetyt mallinnusmenetelmänä hyödynnetään kolmio- ja ruutuverkkoa. Eri metodeja käyttämällä ja eri ohjelmistoilla laskettaessa kokonaistilavuuden laskettu tilavuus saattaa vaihdella jonkin verran (kuva 22). [32]



Kuva 22. Eri ohjelmistojen ja tasoitustapojen vaikutukset laskettuun tilavuuteen.

Laserkeilausmittaukset kestävät maastossa huomattavasti takymetrillä suoritettuihin tilavuusmallinnusmittauksiin huomattavasti vähemmän aikaa, mutta jälkikäsitelyssä takymetriaineisto on nopeampi käsitellä. Jälkikäsitelyn kesto riippuu mitattavan alueen koosta. Laserkeilauksen kustannustehokkuus kasvaa mitattavan alueen suurentuessa ja mitattavan alueen rakenteen monimutkaistuessa. [32]

### 6.3 Tulvakartoitus

Tulvakartoituksen avulla tulviin voidaan varautua etukäteen, jolloin niiden aiheuttamia tuhoja ja riskejä voidaan minimoida. Tulvavaarakartta on oleellinen tekijä tulvariskien hallinnassa ja tuhojen ennalta ehkäisyssä. Tulvavaarakartassa esitetään tulvan peittävyysalue ja veden nousun todennäköisyys. Tulvariskikartat valmistetaan tulvavaarakarttojen pohjalta tarkastelemalla eri karttatasoilla alueen haavoittavuutta, väestöä ja elinkeinoa, jolloin saadaan kokonaiskäsitely tulvariskistä (kuva 23). [16, s. 1.] Tulvakarttoja käytetään mm. tulvariskien hallintasuunnitelmien valmistelussa ja kaavoituksessa, jossa määrätään rakennuksien ja rakennelmien etäisyys tulva-alueesta. Yleensä kaa-

voituksessa rakennukset suunnitellaan niin korkealle vesialueesta tai muusta tulvan aiheuttajasta, että keskimäärin kerran sadassa vuodessa tapahtuva tulva ei aiheuta vahinkoa kaava-alueelle. Tulvariskien hallintasuunnitelmassa voidaan suunnitella etukäteen mm. evakuointialueet ja teiden sulkemiset. [15] Kansallisten ja osittain EU:n säädösten takia Suomessa on tehty merkittäville tulvariskialueille tulvakartat [16, s. 1].



Kuva 23. Tulvariskikartta, esimerkki Rovaniemeltä [28]

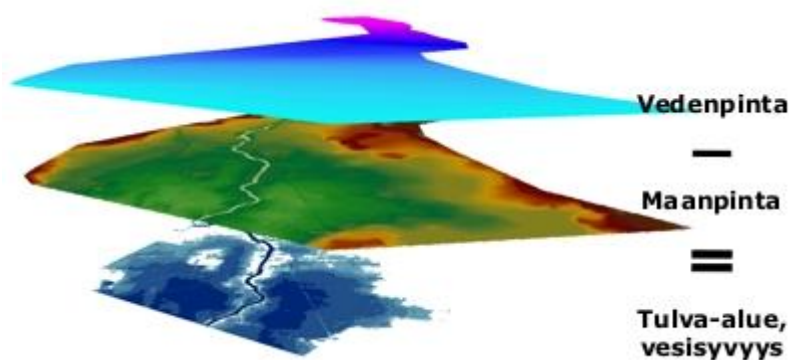
Tulvakartoituksen tekemiseen tarvitaan tiedot alueen vedenpinnan ja maaston korkeusvaihteluista. Tulvakartoitus voidaan luokitella lähtötietojen tarkkuuden perusteella yleispiirteiseksi tai tarkaksi tulvakartoitukseksi, joka tuotetaan virtausmallinnuksen avulla. [16, s. 2.] Yleispiirteinen tulvakartoitus ja tulvavaarakartta antaa yleiskäsityksen mahdollisten tulvien laajuudesta ja vesisyvyydestä. Kartoitukseen ei oteta mukaan rakennuksia, koska yleispiirteisen tulvakartoituksen tarkkuus ja luotettavuus on riittämätön yksityiskohtaisten kohteiden riskien ennakoimiseen. Tiestö ja muut merkittävät tulvariskialueet voidaan kuitenkin esittää kartalla. Tarkimmillaan yleispiirteisen tulvavaarakartta esitetään mittakaavassa 1:50 000.

Yksityiskohtaiset tulvavaarakartat mahdollistavat rakennusten mukaan ottamisen tulvariskitarkasteluun. Taustakarttana käytetään yleensä peruskarttaa 1:20 000 tai tarvittaessa asemakaavaa. Tulvavaarakartat tallennetaan Suomen ympäristökeskuksen tulvatietojärjestelmään. [17, s. 13.]

Tarkan virtausmallin valmistamiseksi tarvitaan ensin arvio maanpinnan karkeudesta. Tarkastelemalla joen karkeutta, geometriaa ja tarkastellun ajan virtaamaa voidaan virtausmallin laskea veden virtausnopeus ja korkeus jokiuoman eri kohdissa. Yleisesti virtausmallit tuotetaan yksi- tai kaksiulotteisina. Yksiulotteisessa mallissa joen oletetaan

kulkevan vain yhteen suuntaan, mutta kaksiulotteisessa mallissa huomioidaan syvyyden vaikutus virtausnopeuksiin ja virtaukset voidaan mallintaa kahteen eri suuntaan. [16, s. 2.]

Yleispiirteisessä tulvakartoituksessa vedenkorkeus esitetään interpoloituna ja kaltevana pintana eikä siihen oteta mukaan virtausmallinnuksia. Pinta asetetaan jokiuomasta tehdyn maastomallin väliin – ennustetun tulvahuipun korkeudelle. Digitaalisen pinnan alle jäävä korkeusmalli peittyy tulvahuipun aikaan veden alle, josta voidaan laskea tulvan peittämät alueet ja vesisyvyudet (kuva 25). Yleispiirteisessä tulvakartoituksessa jätetään huomioimatta joen virtausnopeus, jolloin nopean virtaaman aiheuttamiin maansortumisiin ei voida varautua. [16, s. 2.]



Kuva 24. Vesisyvyys ja tulva-alue saadaan selville vähentämällä veden- ja maanpinnan korkeusmallit toisistaan [28].

Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistolla saavutetaan 15–30 cm:n korkeustarkkuus, joka riittää yleispiirteisen tulvakartoituksen tekemiseen. Virtausmallin tuottamiseen tarvitaan kuitenkin tarkempaa pistetietoa, jolloin ilmalaserkeilaus aineistoa voidaan täydentää maalaserkeilauksella. Maalaserkeilauksella päästään 1–5 cm:n pistetarkkuuteen, jonka avulla jokiuoman maanpinnasta, kasvillisuudesta ja tulvatasangoista saadaan tarkempaa tietoa. Maalaserkeilaus voidaan suorittaa maanpinnalta tai veneestä.

Perinteinen laserkeilauskoje käyttää punaisen aallonpituusalueen laserpulseja, koska ne läpäisevät hyvin ilmakehää, mutta punainen aallonpituus ei läpäise ollenkaan vettä. Jokiuoman geometrian mittaamiseksi tarvitaan vihreän aallonpituusalueen laserkeilainta tai perinteisempää kaikuluotausta. Vihreän aallonpituusalueen laserkeilain sopii hy-

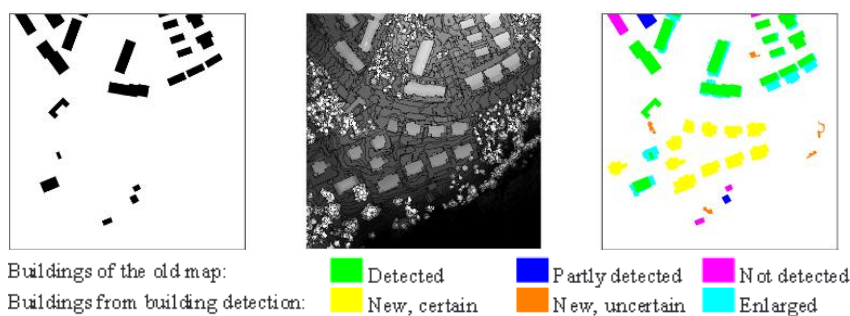
vin kirkasvesisiin jokialueisiin, mutta samea- tai humusvesisistä jokea lasersäde ei läpäise, jolloin joenpohjasta ei saada tietoa.

#### 6.4 Maastokohteen muuttumisen seuraaminen

Laserkeilaus ja ilmakuvat ovat edistäneet huomattavasti automaattisten tulkintamethodien hyödyntämisen kartoituksessa. Kiinnostus on kohdistunut etenkin automaattisten työkalujen avulla tehtyyn kohteen muutostulkintaan. Nykyisin kartta-aineistot ovat yleisimmin digitaalisessa muodossa ja näiden tietojen ylläpitäminen sekä ajantasaistaminen käytännön kartoitustyössä on tärkeää kunnan toiminnan kannalta. Tulevaisuudessa kartalle tulevat kohteet voitaisiin löytää automaattisesti tarpeeksi hyvällä tarkkuudella ja manuaalisessa työssä voitaisiin keskittyä tietojen ylläpitämiseen, digitointiin ja tietojen hyödyntämistä aputietona ajantasaistuksessa. Kartta-aineistojen laatua voitaisiin parantaa ja muutosten tutkimiseen kuluva aikaa vähentää. [25, s. 7.]

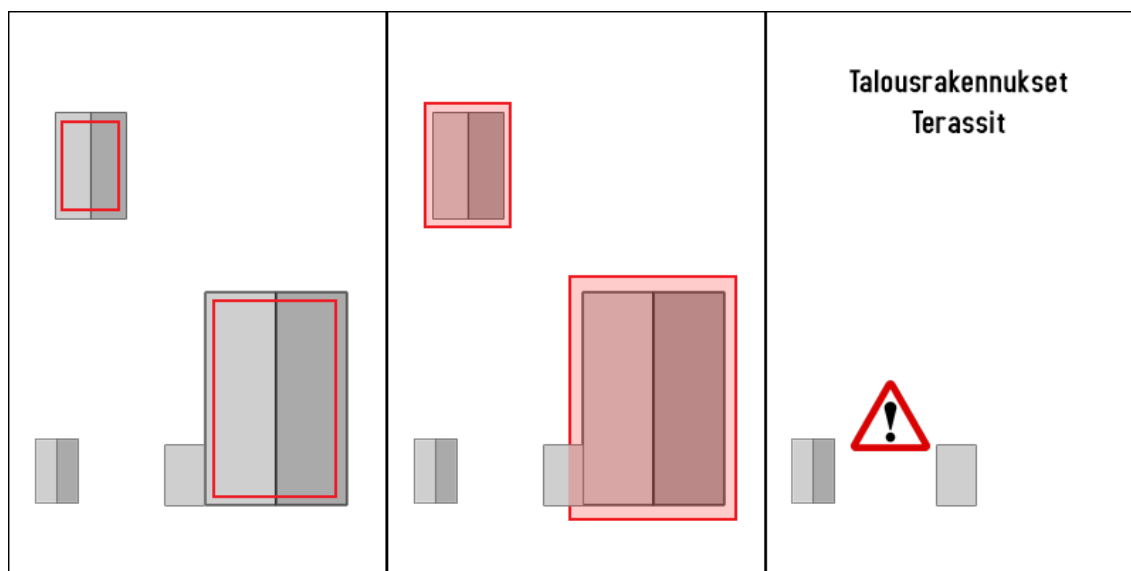
Laserkeilausaineistosta saadaan tunnistettua rakennuksia automaattisesti, joiden tarkempaan löytämiseen käytetään avuksi ilmakuvilta saatujen heijastustietoja ja kasvillisuusindeksejä. Automaattisesti löydettyjä ja vektoroituja rakennuksia voitaisiin käyttää lähtötietona ajantasaistuksessa, 3D-mallinnuksessa ja kartoituksessa. [25, s. 7–8.]

Löydettyjä rakennuksia voidaan verrata nykyisiin, pohjakartoilla oleviin rakennuksiin ja verrata, mitä rakennuksia kartalta puuttuu tai onko rakennuksiin tullut muutoksia (kuva 25). Rakennuksien automaattinen tunnistus helpottaisi ja tehostaisi esimerkiksi rakennusvalvonnan toimintaa (kuva 26). Laittomat rakennelmat löydetäisiin lähes automaattisesti – tekniikan parantuessa myös metsien alta. Ilmalaserkeilaus havaitsee vain kattojen reunat, eikä sokkelin tai rakennuksen seinälinjoja, jolloin virhettä todelliseen tilanteeseen tulee rakennuksesta riippuen 0–0,5 metriä.



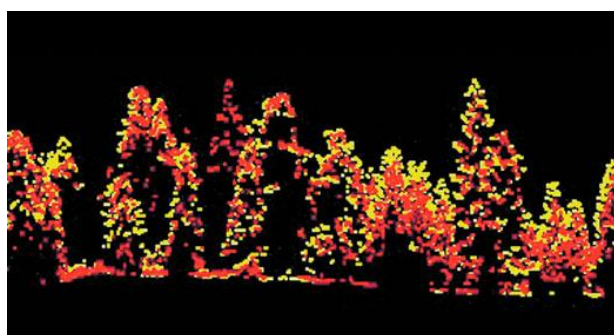
Kuva 25. Rakennusten automaattinen muutostulkinta [29]

Nykyisellä tekniikalla saavutetaan noin 90 %:n oikeellisuus rakennuksien tulkinnessa. Suurimmat tulkintavirheet aiheutuvat pienistä rakennuksista ja toisaalta varmimmin tunnistetaan suuret rakennukset (>200 m<sup>2</sup>). Yli 60 m<sup>2</sup>:n rakennuksissa saavutetaan jopa 96 %:n tulkintatarkkuus. Rakennusten tunnistamiseen vaikuttaa merkittävästi laserkeilausaineiston pistetiheys. Tutkimuksessa käytettiin pistepilviaineistoa, jonka tiheys oli noin 2–4 pistettä neliömetrillä. [25, s. 8–9.] Pienempien rakennuksien luotettavaan havaitsemiseen vaadittaisiin vähintään 10 pistettä/m<sup>2</sup>.



Kuva 26. Peruseriaate laserkeilaamalla havaittujen rakennuksien ja karttakohderakennuksien välinen automaattinen vertailu.

Metsäalueelle voidaan myös tehdä muutostulkintaan puiden kasvamisesta ja hakkuisista. Menetelmässä on määritetty yksittäisten puiden sijainnit, pituus, tilavuus, latvuksen koko ja puulajitiedot. Näiden tietojen avulla saadaan tietoa puuston pituuskasvusta, jos laserkeilaus toteutetaan säännöllisin väliajoin (kuva 27).



Kuva 27. Puiden pituuskasvu vuoden 1998 (punainen) ja 2003 (keltainen) välillä. Kuvassa näkyy myös yksi puu, joka on kaatunut mittausten välissä.



## 6.5 Infrarakentaminen

Laserkeilausta hyödynnetään erityisesti infrahankkeiden suunnittelussa ja ylläpidossa. Suunnitteluvaiheessa laserkeilaamalla kohteesta saadaan tuotettua lähtötiedoksi korkeus- ja maastomalleja. Ylläpito vaiheessa laserkeilauksella voidaan valvoa rakennetun infran muutoksia ajan kuluessa, kuten tien elämistä. Ilmalaserkeilauksella mitattuja lähtötietoja joudutaan usein täydentämään maastomittauksin, jos jostakin suunnittelualueelta halutaan tarkempaa lähtötietoa. Laserkeilausaineistoa voidaan käyttää hankkeiden suunnittelun lähtötietona esimerkiksi tiehankkeisiin, kaavoitushankkeisiin, tulvakartoituksiin, kaatopaikkahankkeisiin, sähkölinjanhankkeisiin.

Laserkeilausaineiston avulla suunnittelualueita voidaan tarkastella kolmiulotteisesti ja suunnitella infrakohteiden sijoittumista havainnollisesti korkeus- ja tasosuunnassa. Suunnitteluvaiheessa huomataan perinteisiä 2D-suunnittelukarttoja ja poikki- tai pituusleikkauksia paremmin mahdolliset infrakohteiden törmäämiskohdat. Esimerkiksi putkilinjojen mahdollisista vanhojen putkien ja rakennusten sekaan voidaan mallintaa suunnitteluvaiheessa etukäteen, jolloin rakennusvaiheen yhteentörmäyksiltä todennäköisemmin vältyttäisiin.

Karttakohteiden puoliautomaattiseen muutostulkintaan voidaan käyttää laserkeilausaineistoa. Nykyisiä pohjakarttoja ylläpidetään suurimmaksi osaksi digitaalisessa muodossa ja perinteisen kartoituksen tavoitteena on ylläpitää pohjakartan tietoja. Esimerkiksi rakennukset voidaan vektoroida laserkeilausaineistosta ja suorittaa muutostulkinta rakennuskarttaan verrattuna. Muutoskohteita tulisi löytää tarpeeksi luotettavasti ja hyvällä tarkkuudella, jotta tuloksia voitaisiin käyttää pohjakartan ajantasaistamisena tai rakennuskartasta poikkeavien rakennusten löytämisenä. Laserkeilauksella tunnistetaan rakennukset myös metsän alta, toisin kuin ilmakuvilta.

Linjamaisia kohteita pystytään kartoittamaan lähes automaattisesti tarpeeksi tiheän pisteisen laserkeilauksen avulla. Esimerkiksi tien reunakiviä pystytään havaitsemaan, kartoittamaan ja mallintamaan, kunhan pistetiheys, -tarkkuus ja lentokorkeus ovat tarkoituksenmukaiset. Esimerkiksi Vosselman & Zhou onnistuivat reunakivien mallintamisessa suorittamalla laserkeilauksen 275 metrin korkeudelta ja pistetiheydellä 20/m<sup>2</sup>. Tien reunojen satunnaisvirheiksi mitattiin 6 millimetriä, keskihajonnaksi 9 millimetriä sekä GPS:n RMS-arvoksi 11 millimetriä. [24, s. 22.]



Kuva 28. Microstation Descartesilla pystyy puoli-automaattisesti löytämään linjamaiset kohteet intensiteetti- tai maaston korkeustietojen avulla.

Kunnan käytössä olevalla Microstation Descartesilla -ohjelmalla tien reunalinjoja ja kaistaviivoja pystytään kartoittamaan puoli-automaattisesti intensiteetti ja korkeustiedon avulla (kuva 28). Ohjelmalla pystyy mallintamaan myös sähkölinjat puoli-automaattisesti. Sähkölinjat saataisiin pohjakartalle 3D-muodossa ja käytettyä hyväksi esimerkiksi voimalinjojen lähellä kasvavien puiden kartoituksessa, jotka aiheuttavat riskin kaatuessaan. Laserkeilauksella pystytään mittamaan yksittäiset puut, jolloin puiden kaatumista voidaan ennakoida ja kaataa mahdolliset riskipuut.

## 6.6 Kaavoituksen 3D-visualisointi

3D-visualisointia käytetään yhä enemmissä määrin kaavakarttojen ja uusien rakennusalueiden havainnollistamiseen kunnan asukkaille ja päättäjille. Tavallinen kunnan asukas saa paljon enemmän irti 3D-visualisoinnista kuin pelkästä kaavakartasta. Visualisoinnilla saadaan usein parannettua asukkaiden suhtautumista uuteen asuinalueeseen ja näin myös vähennettyä valituksien määrää. Itse kaavoittajalle 3D-esityksen näkeminen saattaa tuoda uusia näkemyksiä ja ideoita alueen toteuttamiseen.

Tuusulan kunta ei pääsääntöisesti itse tuota 3D-havainnekuvia kaava-alueista vaan yleensä visualisoinnin tekee palkattu konsultti. Kunnan kaavoittajille ei jää välttämättömien töiden jälkeen riittävästi aikaa luoda virtuaalimallia kaava-alueesta. Kaava-alueesta tehdäänkin usein vain ylhäältä kuvattu 2D-havainnekuva. Havainnekuvaan piirretään kohteiden ympärille varjostusta ja puita sekä muita kohteita kuvataan symbolien avulla.



Kuva 29. 3D-visualisointi Linjapuisto II -alueelta, Kellokoskelta. Tummemmat rakennukset ovat uuden kaava-alueen suunniteltuja rakennuksia ja vaaleammat ovat vanhoja rakennuksia.

Insinööriyössä toteutettiin 3D-visualisointi uudelle kaava-alueelle, käyttäen hyväksi kunnalta löytyvää Bentley Microstation Descartes -ohjelmistoa. 3D-visualisoinnista tehtiin kohtalaisen yksinkertainen, koska rakennusten lopullisen ulkonäön ja muodon päättää lopulta rakennuttaja – noudattaen kaavaohjeissa säänneltyjä rakentamisnormeja.

Kaavoittajat halusivat tulevaisuudessa tehdä kuvan 29 kaltaisia 3D-visualisointeja, joita pystyisi mallintamaan kohtalaisen nopeastikin. 3D-visualisoinnista tehtiinkin kaavoittajille 60-sivuinen visualisointiohje, jossa selitettiin tarkasti työn eri vaiheet ja yksityiskohdat. Kuvassa 30 on esimerkki visualisointiohjeen sisällöstä. Microstation Descartes -ohjelmalla oli joitakin puutteita visualisoinnin suorittamisen suhteen. Maastomallin tekemiseksi käytettiin Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa vuodelta 2008.

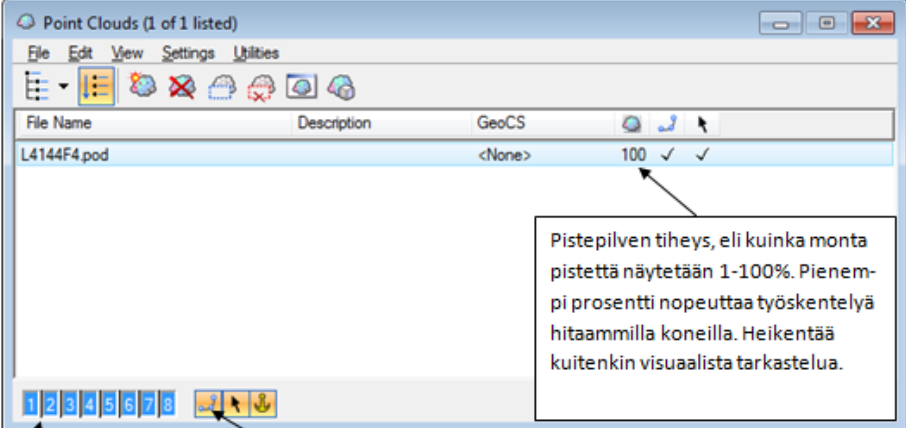
3. Pistepilviaineistot löytyvät "J:\Maastomallit\MML laserkeilausaineisto 2012", joista valitaan \*.pod päätteiset pistepilvitiedostot. **Kopioi tarvitsemasi aineistot omalle levyille tai hakemistoon!**

*.laz* päätteiset pistepilvitiedostot on pakattu LasZip nimisellä ohjelmalla. NIITÄ EI VOI SUORAAN KÄYTTÄÄ OHJELMISSA, ILMAN TIEDOSTOJEN PURKAMISTA SAMAISILLA OHJELMILLA.

*.las* päätteiset tiedostot ovat laajasti käytetty pistepilviformaatti. Internetistä ladattavat MML:n pistepilviaineistot on pakattu .laz formaattiin ja ne purkamalla saadaan .las päätteiset tiedostot.

*.pod* päätteiset tiedostot ovat Microstationin pakkaamia pistepilviaineistoja. Microstationilla avataan pistepilveksi .las tiedostot, jolloin se muuntaa automaattisesti ne .pod päätteisiksi. Las-tiedostot avataan samalla tavalla kuin .pod päätteiset tiedostot. Kunnassa aineistot on valmiiksi muunnettu .pod päätteisiksi, jolloin käytämme niitä suoraan.

4. Tilanteet pitäisi näyttää tältä ja pistepilvien pitäisi olla avattuna ohjelmassa:



File Name	Description	GeoCS		
L4144F4.pod	<None>	100	✓	✓

Pistepilven tiheys, eli kuinka monta pistettä näytetään 1-100%. Pienempi prosentti nopeuttaa työskentelyä hitaammilla koneilla. Heikentää kuitenkin visuaalista tarkastelua.

Määrittää, missä ikkunoissa pisteet näkyvät. Oletuksena pistepilvi näytetään kaikissa ikkunoissa.

Voiko laserkeilauspisteisiin tarttua (kyllä/ei)

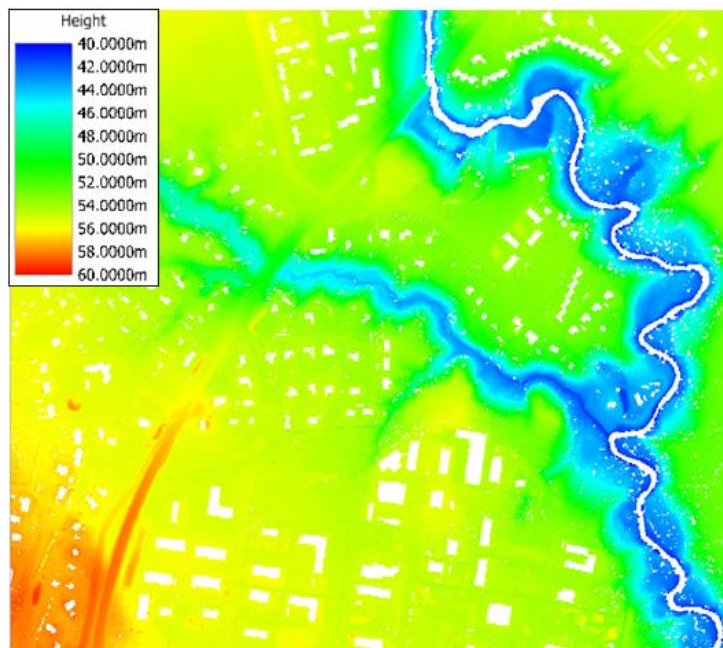
Kuva 30. Kuvankaappaus visualisointiohjeiden sisällöstä.

Visualisointiohjeessa selostettiin tiivistettynä:

1. Lähtöaineistojen koordinaattimuunnokset
2. Pistepilviaineiston avaaminen ja visualisointi, kuten korkeus- ja intensiteetti-visualisointi (kuva 31)
3. Maastomallin luominen ja leikkaaminen
4. Tiedostojen ja taiteviivojen liittäminen kiinni maastomalliin, kuten ilmakehän ja vektoritiedostot

5. Rakennusten mallintaminen ja pintatekstuuriin lisääminen.

6. Valmiin työn tulostaminen



Kuva 31. Korkeusvisualisointi maanpinnasta Tuusulanjoella.

Ohjelmalla pystyi lähtökohtaisesti tekemään vain maanpinnan maastomallin, eikä esimerkiksi puiden pintamalla. Ohjelmalla ei myöskään pystynyt muokkaamaan pistepilven pistetunnuksia (ClassID), jolloin puiden laserkeilauspisteet olisi voinut vaihtaa maanpinnan pisteiksi. Näin ohjelma olisi luullut puita maanpinnaksi ja tehnyt niistä pintamalla. Kaikki pisteet saatiin mukaan pintamalliin poistamalla kaikki luokittelutiedot, joka ei kuitenkaan ollut optimiratkaisu, mutta ohjelman rajoitteet huomioiden hyväksyttävä keino.

TerraSolidin ohjelmilla pisteiden luokittelu ja pintamalla tekeminen kustakin pisteluokasta olisi ollut vaivatonta, mutta kaavoittajat eivät olisi pystyneet näitä ohjelmia käyttämään eikä 3D-visualisointia olisi näin pystynyt kunnolla tekemään. Ilmaisohjelmien, kuten LasToolsin avulla pystyi pisteitä luokittelemaan lähes yhtä laadukkaasti kuin TerraSolidin ohjelmilla, mutta niidenkään pistetunnuksia (ClassID) ei voinut manuaalisesti jälkikäteen vaihtaa. Muuten pelkät puut olisi voinut ottaa erikseen Microstation Descartesin maastomalliin.

Uudella kaavoitetulla alueella kasvoi mäntymetsä, joten siltä kohdin maastomalliin piti ottaa vain maanpinnan pisteet mukaan (kuva 32). Myös ennestään olevien rakennusten alle jätettiin vain maanpinnan pisteet selkeyttämään visualisointia. Kokonaan kaava-alueen ulkopuolelle sekä uusien ja vanhojen rakennusten väliin otettiin mukaan kaikki laserkeilauspisteet. Lopuksi alue rajattiin kattamaan vain kaavan lähialueet.



Kuva 32. Skaalautuvarautalankamalli (STM) Linjapuisto II:sta, jossa maanpinnan maastomalli värjätty mustalla ja kasvillisuus pisteet punaisella. Väliin jätettiin hieman päällekkäisyyttä, ettei maastomalliin tule mistään kulumasta katsottuna rakoja.

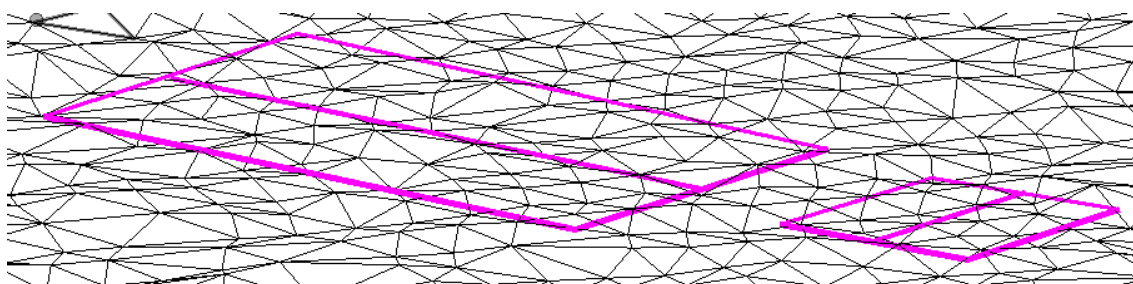
Maastomalliin pystyi liittämään kiinni DGN-elementtejä ja alkuperäisenä tarkoituksena oli liittää DGN-havainnekuva suoraan kiinni maastomalliin, mutta maastomalli ei hyväksynyt elementtejä, jotka muodostivat alueita. Alueet tulikin ensin purkaa, mutta samalla ne menettivät alueen väriarvonsa, eikä DGN-havainnekuva voimut tästä syystä käyttää suoraan maastomallissa. Havainnekuva päätettiin yhdistää kiinni ortoilmakuvaan ja liittää se lopulta maastomalliin.

Kunnan omien TIF-ilmakuvan koordinaattimuunnoksessa oli yllättävän suuria ongelmia, verrattuna DGN-tiedostoihin, jotka menivät suoraan oikeaan koordinaatistoon ja paikkaan kuvalla. Kunnan ilmakuvat olivat ETRS89-FIN/GK25-koordinaatistossa ja maastomalli ETRS-TM35-FIN-koordinaatistossa. Maastomallille ei pystynyt tekemään koordinaattimuunnosta ja muuttaessa pistepilven koordinaattitietoja, menettivät laserkeilauspisteet pistetunnuksensa. Ilmakuva saatiin hetkellisesti oikeaan paikkaan kartalla, mutta se palasi aina takaisin alkuperäiseen koordinaatistoonsa, vaikka ilmakuva tallennettiin vielä erikseen GEOTIFFiksi. GEOTIFFin pitäisi tallentaa ilmakuvatiedostoon myös sen koordinaatit, jolloin kuva osuisi avautuessa suoraan oikeaan koordinaatistoon. Automaattisilla koordinaattimuunnoksilla ilmakuvaa ei saatu millään oikeaan

koordinaatistoon, vaikka kuvan siirtämiseksi kokeiltiin useita eri koordinaattimuunnoskeinoja. Lopulta ilmakuva saatiin kiinni maastomalliin oikealle kohdalle piirtämällä kuva uudelleen GEOTIFFiksi ja piirtämällä kuva uudestaan paikalleen (resample).

Uudet suunnitellut rakennukset tehtiin käsin Microstationin perustyökaluilla Solid-malleiksi ja ennestään olevat rakennukset vektoroitiin automaattisesti TerraModelerilla. Joistakin automaattisesti vektoroiduista rakennuksista tuli hieman epämuodostuneita, joten niitä piti muokata jonkin verran käsin. Pienien asuinrakennuksien automaattisen vektoroinnin hyvän lopputuloksen saamiseksi suositellaan vähimmäislaserkeilauspisteitiheydeksi 5–10 pistettä neliömetrillä, kun Maanmittauslaitoksen keskimääräinen pisteitiheys on vain noin 0,5 pistettä neliömetrillä. Heikko pisteitiheys aiheutti siis automaattisesti vektoroitujen rakennusten epämuodostumisen. Rakennukset sijaitsivat suurelta osin kahden lentolinjan alla, joka entisestään heikensi rakennusten automaattisen vektoroinnin lopputulosta.

Solidi-malleja ei pystynyt pudottamaan automaattisesti kiinni maastomalliin, joten ensin pudotettiin DGN-tiedoston rakennusalueet maastomallin päälle (kuva 33) ja DGN-tiedostojen päälle mallinnettiin rakennukset käsin solidimalleiksi. Yhden kerrosluvun korkeudeksi asetettiin yleisesti käytetty kolme metriä. Rakennuksia mallintaessa täytyi Z-lukon (korkeuslukko) olla päällä, jotta rakennuksista tuli suoria. Lopulta rakennuksia laskettiin 20–30 senttimetriä maahan päin, jotta rakoja maanpinnan ja rakennuksen solidi-mallin väliin ei jäisi jäljelle. Joitakin rakennuksia tuli vielä venyttää manuaalisesti alaspäin rakojen peittämiseksi mäkisillä alueilla.



Kuva 33. DGN-elementti kiinnitetty (snap) maastomalliin. Elementin liittämiseen on käytetty yleistysökalua, jolloin elementti ei täysin seuraa maastomallin muotoja.

3D-kaupunkivisualisointi voidaan toteuttaa myös vinoilmakuvilta, jolloin seiniin saadaan automaattisesti oikeat tekstuurit. Laserkeilauspisteiden ja lentoratatietojen avulla vinoilmakuvat voidaan liittää kiinni automaattisesti vektoroituihin rakennuksiin. Vinoilma-

kuvauksen ongelmana voidaan pitää korkeiden puiden ja muiden korkeiden kohteiden läheisyydestä aiheutuvia tekstuurivirheitä. Esimerkiksi suuri puu voi ilmestyä keskelle rakennuksen seinää, koska kuvattaessa puu oli rakennuksen ja ilmakuvakameran välissä.



Kuva 34. Ylivieskan kaupungissa suoritetun laserkeilausaineiston värjääminen ilmakuvan pikselien väriarvoilla. Toiminto onnistuu myös Microstationin työkaluilla. [36]

## 7 Maastomittaukset

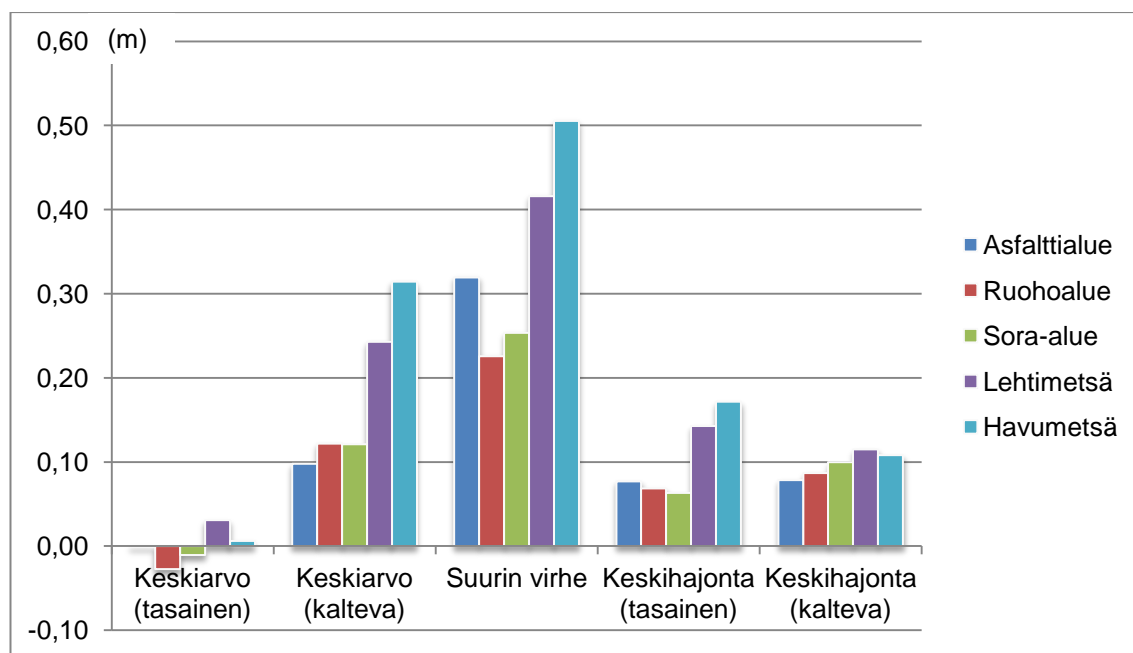
Maastomittauksissa selvitettiin Maanmittauslaitoksen pistepilviaineiston tarkkuutta, laatua ja käyttökelpoisuutta. Maastossa mitattiin kontrollipisteitä, joita verrattiin laserkeilausaineiston pisteisiin. Maanmittauslaitoksen keilausdata on vuodelta 2008, joten referenssipisteiden mittausalueeksi valittiin vuodesta 2008 lähtien vähiten muuttuneet alueet. Pistepilviaineiston tarkkuutta verrattiin eri pintoihin ja pintalaatuihin, kuten asfalttiin, ruuhon, soraan, rakennusten räystäspinta-aloihin sekä metsäiseen, epätasaiseen ja mäkiseen maastoon.

Maastomittaukset suoritettiin takymetrillä ja VRS-GPS:llä viikon kestäneellä mittausjaksolla. VRS-verkossa päästään parhaimmillaan noin yhden (1) senttimetrin korkeus- ja tasotarkkuuteen, joka riittää Maanmittauslaitoksen pistepilven tarkkuuden selvittämiseksi. VRS-GPS etuna on nopea pisteiden mittaaminen, jolloin referenssipisteaineistosta saadaan kattava. Laajasta pisteaineistosta saadaan tuotettua luotettavimmat



analyysit. [8, s. 4.] Referenssipisteitä mitattiin yhteensä noin 1 000 maastopistettä. Jokaiselle maanpinnan tyypille ja kaltevuuksille mitattiin noin 80–120 pistettä. Referenssipisteitä verrattiin laserkeilausaineistosta tuotettuun maastomalliin, johon mitatut pisteet tiputettiin kiinni automaattisesti. Maastomalliin tiputettujen pisteiden ja referenssipisteiden koordinaatit ja pistetiedot siirrettiin Exceliin, jossa lopulliset koordinaattivertailut suoritettiin.

Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston viralliseksi maksimikorkeusvirheeksi on esitetty 15 senttimetriä ja maksimitasovirheeksi 60 senttimetriä [33]. Geodeettinen laitos vertaili testikentällä laserkeilauspisteistä tehdyn maastomallin korkeusarvoja RTK-mittauksella kerättyyn maastomalliin. Testikeilaukset suoritettiin kahdella eri keilaimella ja georeferointi oli tehty eri paikoissa. Siitä huolimatta tulokset olivat hyvin samansuuntaiset. Keskiarvovirheet vaihtelivat  $-7$  cm:n ja  $+14$  cm:n välillä. Eri maastokohteet, kuten asfaltti, metsä ja avoin maasto, vaikuttivat mittausten keskiarvoihin. Tarkin tulos saatiin asfaltoidulla tiellä, jonka tarkkuudeksi mitattiin muutamia senttimetrejä. [7, s. 7.]



Kuva 35. Referenssipisteiden korkeuserot verrattuna laserkeilauspisteisiin.

Maastomittauksissa havaittiin suurempia korkeusvirheitä kuin laserkeilausaineiston metatiedoissa kerrotaan (kuva 35). Maastomittausten ja laserkeilausaineiston mittausten välissä on kuitenkin noin kuusi vuotta, jolloin maanpinnassa on väkisinikin tapahtunut muutoksia muun muassa rakentamisen ja roudan takia. Jotkin maanpinnan pisteitä voivat oikeasti olla aluskasvillisuutta ja yksittäiset maksimivirheet kasvavat tämän takia.

Maastomittausaineistoon pyrittiin ottamaan mukaan vain mahdollisimman muuttumattomia maastonkohteita, mutta joillakin mittausalueilla maasto oli muuttunut. Koordinaatiarvot heittivät laserkeilatusta korkeudesta lähes saman verran ja systemaattiset virheet poistettiin aineistosta. Satunnaisia virheitä oli lähes mahdoton poistaa aineistosta ja tämän takia maksimivirheet kasvavat paljon ilmoitettua suuremmiksi. Laserkeilausaineiston tarkkuuden arvioimisessa on jo lähtötilanteessa niin paljon virhelähteitä, että tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina.

Vertailemalla referenssipisteitä ja laserkeilausaineiston korkeuspisteistä, huomattiin maanpinnan ja kaltevuuden vaikuttavan aineiston tarkkuuteen. Asfaltti-, sora- ja ruohoalueiden välillä ei käytännössä ollut eroa, mutta metsäalueisiin verrattuna eroa laserkeilausaineiston tarkkuudessa syntyi selvästi. Laserkeilauspisteet läpäisevät metsäalueita kohtalaisen heikosti, jolloin maanpinnan pisteitä ei saada tarpeeksi tiheästi ja maastomalliin syntyy tästä johtuen virhettä. Maastomalli ei kuvaa enää kovin tarkasti maanpinnan oikeita korkeusvaihteluita. Kaltevilla alueella virheiden keskiarvo oli suurempi kuin tasaisella, mutta yllättäen keskihajonnat olivat varsinkin metsäalueilla pienempiä. Referenssipisteitä on kuitenkin liian vähän määrittämään tarpeeksi luotettavasti kaltevien pintojen vaikutusta mittauksen tarkkuuteen. Otanta on siis liian pieni minimoimaan aluekohtaiset havaintovirheet. Näiden mittauksen tuloksia katsomalla voidaan todeta, että tasaiset ja avarat maastokohteet ovat kohtalaisen tarkkoja, mutta metsäisillä alueilla virhe kasvaa merkittävästi.

Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston tasotarkkuutta verrattiin takymetrillä ja ortoilmakuvilta mitattuihin rakennuksen räystäs ja harjalinjoihin. Takymetrillä mitattuihin pisteisiin oli eroa keskimäärin noin 30–50 senttimetriä ja ortoilmakuviin verrattuna virhettä oli noin 30–40 senttimetriä. Maksimivirheet olivat 80 senttimetrin suuruisia. Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston pistetiheys oli välttävä rakennusten harja- ja räystäslinjojen määrittämiseen, joka aiheuttaa ennestään virhettä rakennuslinjojen tulkittamiseen. Mitatut tasovirheet olivat maanmittauslaitoksen ilmoittamia maksimivirheitä hieman suurempia, mutta suhteessa tarkempia kuin korkeustarkkuudet, ainakin näiden mittauksen valossa.

## Lähteet

- 1 Vosselman George ja Maas Hans-Gerd. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Florida: CRC Press.
- 2 Shan Jie ja Toth Charles. 2009. Topographic laser ranging and scanning: Principles and Processing. Florida: CRC Press.
- 3 Packalén, Petteri. 2011. Introduction to Lidar and Airborne Laser Scanning. Powerpoint-esitys. Itä-suomen yliopisto.
- 4 Laserkeilauksen käyttöliikennetunneleiden kunnossapidonhallinnassa. 2012. Verkkodokumentti. Liikennevirasto.  
<[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2012-41\\_laserkeilauksen\\_kaytto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf)> Luettu 27.12.2013.
- 5 Genechten B. Van. 2008. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Verkkodokumentti.  
<[http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo\\_Tutorial\\_Final\\_vers5\\_ENGLISH.pdf](http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_ENGLISH.pdf)> Luettu 12.1.2014.
- 6 Kaasalainen Sanna, Kukko Antero ja Hyyppä Hannu. 2011. Intensiiteettitiedon hyödyntäminen laserkeilauksessa. Verkkodokumentti. The Photogrammetric Journal of Finland.  
<[http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Kaasalainen\\_et\\_al.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Kaasalainen_et_al.pdf)>. Luettu 15.1.2014.
- 7 Vilhomaa Juha ja Laaksonen Heli. 2011. Valtakunnallinen laserkeilaus – testityöstä tuotantoon. Verkkodokumentti. The Photogrammetric Journal of Finland.  
<[http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Vilhomaa\\_Laaksonen.pdf](http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Vilhomaa_Laaksonen.pdf)>. Luettu 21.1.2014.
- 8 Hyyppä Hannu ja Hyyppä Juha. 2003. Laserkeilauksen laatu ja sen osatekijät. Verkkodokumentti. Maanmittaustieteiden seura.  
<<http://mts.fgi.fi/paivat/2003/paperit/hyyppa.pdf>>. Luettu 21.1.2014.
- 9 Kaartinen, Hannu. 2013. Benchmarking of airborne laser scanning based feature extraction methods and mobile laser scanning system performance based on high-quality test fields. Verkkodokumentti. Suomen geodeettisen laitoksen julkaisu.  
<<http://lib.tkk.fi/Diss/2013/isbn9789517113052/isbn9789517113052.pdf>>. Luettu 23.1.2014.
- 10 Ruuskanen, Sami. 2010. Ilmasta käsin suoritettavan laserkeilaushankkeen prosessikuvaus konsulttiyrityksessä. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

- 11 Warner Timothy. A., Nellis M. Duane ja Foody Giles M. 2009. The SAGE Handbook of Remote Sensing. California: *SAGE Publications Ltd.*
- 12 Salolahti, Mika. 2010. Advanced use of lidar data – Automatic building vectorization and contour production. Verkkodokumentti. FIG Congress. <[http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/fs04h%5Cfs04h\\_salolahti\\_4689.pdf](http://www.fig.net/pub/fig2010/papers/fs04h%5Cfs04h_salolahti_4689.pdf)>. Luettu 23.2.2014.
- 13 Contour line production. Verkko-dokumentti. Terrasolid Oy. <[http://www.terrasolid.com/solutions/contour\\_production.html](http://www.terrasolid.com/solutions/contour_production.html)>. Luettu 24.2.2014.
- 14 Poutanen, Markku. 2006. Suomen uusi korkeusjärjestelmä. Maankäyttö-lehti, 4/2006, s. 9–12.
- 15 Tulvakartoitus. 2014. Verkkodokumentti. Ympäristöhallinto. <[http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi\\_ja\\_meri/Tulviin\\_varautuminen/Tulvariskien\\_hallinta/Tulvariskien\\_hallinnan\\_suunnittelu/Tulvakartoitus](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi_ja_meri/Tulviin_varautuminen/Tulvariskien_hallinta/Tulvariskien_hallinnan_suunnittelu/Tulvakartoitus)>. Luettu 26.2.2014.
- 16 Alho Petteri, Hyyppä Hannu ja Hyyppä Juha. 2008. Laserkeilaamalla maastomallit tulvakartoitukseen. Positio-lehti, 4/2008, s. 11–14.
- 17 Alho Petteri, Sane Mikko, Huokuna Mikko, Käyhkö Jukka, Lotsari Eliisa ja Lehtiö Laura. 2008. Tulvariskien kartoittaminen. Verkkodokumentti. Ympäristöhallinnon ohjeita. <[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41688/OH\\_2\\_2008.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41688/OH_2_2008.pdf?sequence=1)>. Luettu 11.3.2014.
- 18 Hyyppä Juha ja Hyyppä Hannu. 2007. Kansallisen laserkeilauksen mahdollisuudet. Maankäyttölehti, 1/2007, s. 6–8.
- 19 Nenonen Keijo, Vanne Jouko ja Laaksonen Heli. 2010. Laserkeilaus – uusi menetelmä geologiseen kartoitukseen ja tutkimukseen. Geologi lehti, Numero 62, s. 62–69.
- 20 Simonen, Juho. 2012. Maalaserkeilaus infrarakentamisen mittauksissa. Diplomityö. Aalto Yliopisto.
- 21 Tolonen, Jukka. 2011. Terrestiaalisen laserkeilaimen tosiaikainen orientointi virtuaali-RTK (Real Kinematic) – menetelmällä. Diplomityö. Aalto Yliopisto.
- 22 Omat kurssimuistiinpanot. 2014. Digitaalinen fotogrammetria -kurssi. Kostamo, Miika.
- 23 Kukko, Antero. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Verkkodokumentti. Fotogrammetrian erikoistyö. Institute of Photogramme-

- try and Remote Sensing.  
<[http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero\\_Kukko/Laserkeilaimen\\_valinta\\_lahifotogrammetrisiin\\_mittauksiin.pdf](http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf)>. Luettu 17.5.2014.
- 24 Ahokas, Eero. 2013. Aspects of accuracy, scanning angle optimization and intensity calibration related to nationwide laser scanning. Verkkodokumentti. Geodeettisen laitoksen julkaisu.  
<<http://lib.tkk.fi/Diss/2013/isbn9789517113014/isbn9789517113014.pdf>>. Luettu 2.6.2014.
- 25 Matikainen, Leena. 2009. Rakennusten automaattinen tunnistus ja muutostulkinta laserkeilaus- ja ilmakuva-aineistosta. Maankäyttölehti, 3/2009, s. 7–10.
- 26 Hohenthal Johanna, Alho Petteri, Hyyppä Juha ja Hyyppä Hannu. 2011. Laserscanning applications in fluvial studies. Verkkodokumentti. Sage publications.  
<[https://tuhat.halvi.helsinki.fi/portal/files/19570956/Hohenthal\\_et\\_al\\_2011.pdf](https://tuhat.halvi.helsinki.fi/portal/files/19570956/Hohenthal_et_al_2011.pdf)>. Luettu 2.7.2014.
- 27 Täysi aallonmuoto? 2012. Blogi-kirjoitus. Nordic Geo Center.  
<<http://www.geocenter.fi/blogi/taysi-aallonmuoto/>>. Luettu 21.7.2014.
- 28 Tulvakartoitus. Verkkodokumentti. Ympäristöhallinto. <[http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi\\_ja\\_meri/Tulviin\\_varautuminen/Tulvariskien\\_hallinta/Tulvariskien\\_hallinnan\\_suunnittelu/Tulvakartoitus](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi_ja_meri/Tulviin_varautuminen/Tulvariskien_hallinta/Tulvariskien_hallinnan_suunnittelu/Tulvakartoitus)>. Päivitetty 15.1.2014. Luettu 25.7.2014.
- 29 Matikainen Leena, Hyyppä Juha ja Kaartinen Harri. 2009. Automatic detection of changes from laser scanner and aerial image data for updating building maps. Verkkodokumentti. Geodeettisen laitoksen julkaisu.  
<<http://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm2/papers/168.pdf>>. Luettu 26.7.2014.
- 30 White Joanne C, Wulder Michael A, Varhola Adres, Vastaranta Mikko, Coops Nicholas C, Cook Bruce D, Pitt Doug ja Woods Murray. 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using area-based approach. Verkkodokumentti. Canadian forest service.  
<<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/34887.pdf>>. Luettu 2.8.2014.
- 31 Korpela, Hannu. 2008. Laserkeilaus kannattavampaa. Maankäyttö lehti, 2/2008, s. 36–39.
- 32 Pflipsen, Bettina. 2006. Volume computation – a comparison of total station versus laser scanner and different software. Master Thesis. University of Gävle.
- 33 Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston tiedot. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos. <<http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/laserkeilausaineisto>>. Luettu 3.8.2014.

- 34 Mandlbürger Gottfried, Otepka Johannes, Karel Wilfried, Wagner Wolfgang ja Pfeifer Norbert. 2009. Orientation and processing of airborne laser scanning data (OPALS) – concept and first results of a comprehensive ALS software. Verkkodokumentti. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <<http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/3-w8/papers/p73.pdf>>. Luettu 3.8.2014.
- 35 Pfeifer, Mandlbürger, Otepka ja Karel. 2014. OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. Verkkodokumentti. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. <<http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/3-w8/papers/p73.pdf>>. Luettu 4.8.2014.
- 36 Kari, Veera. 2011. Laserkeilaus ja pistepilven käsittely ydinvoimarakentamisessa. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu