

Maa-57.270, Fotogrammetrian, kuvatulkinnan ja kaukokartoituksen seminaari

# **Puuston muutoksen määrittäminen laserkeilauksen avulla**

*2005*

JYRKI PUUPPONEN

Teknillinen korkeakoulu

Maanmittausosasto

`jyrki.puupponen@hut.fi`

## **Sisällysluettelo**

Puuston muutoksen määrittäminen laserkeilauksen avulla .....	1
Sisällysluettelo .....	2
1. Johdanto .....	4
2. Laserkeilaimen mittausperiaate.....	4
2.1 Laserkeilauksen käyttö metsän havainnoinnissa .....	5
3. Havaintoaineiston keruu metsän muutostulkintaa suoritettaessa.....	6
3.1 Testialueet .....	6
3.2 Käytetty laitteisto ja mittausparametrit .....	7
4. Aineiston käsittely mittauksen jälkeen .....	7
4.1 Latvuston pituusmalli.....	8
4.2 Puuston mallinnus .....	9
5. Puuston muutostulkinta.....	9
5.1 Kaatuneiden puiden tulkinta .....	9
6.2 Metsän kasvu.....	11
6. Yhteenveto .....	11
7. Kehitettävää .....	12
Viitteet.....	13

**Avainsanat.** Laserkeilaus, metsä, muutostulkinta, kasvu

**Tiivistelmä.** Laserkeilaus on kehitetty parisenkymmentä vuotta sitten ja sovelluksia sen hyödyntämiseksi on kehitelty siitä asti. Suomalaiset tutkijat ovat olleet eturintamassa kehittämässä ja tutkimassa sovelluksia tähän verrattain uuteen teknologiaan. Laserkeilauksen idea on yksinkertainen: lähetetään laserpulsseja ja mitataan heijastunut kaiku. Kun lähettimen paikka tiedetään, voidaan kohteen 3D-koordinaatit suurella tarkkuudella määrittää. Heijastuneista kaiuista voidaan mitata kaupunkimalleja tai määrittää jopa yksittäisiä puita. Lukuisia sovelluksia kehitellään jatkuvasti ja tässä seminaariesitelmässä keskitytään laserkeilauksen sovelluksiin liittyen metsän kasvun ja puuston muutoksen havainnointiin. Pohjois-Amerikassa ja Pohjoismaissa on tehty tuoreita tutkimuksia laserkeilauksen soveltuvuudesta metsän muutostulkintaan ja tulokset ovat olleet varsin hyviä. Kehittämistä algoritmeissa ja menetelmissä edelleen on. Metsän muutostulkinnassa laserkeilausta suoritetaan kaksi kappaletta muutaman vuoden välein ja aineistosta määritetään muutos, joka johtuu puuston kasvusta ja puiden kaatumisesta.

Tässä seminaarissa keskitytään pääasiassa kolmeen tuoreeseen tutkimukseen aiheesta metsän muutostulkintaa laserkeilaimen avulla. Tuoreessa suomalaistutkimuksessa (Yu X. ym., 2004) päästiin metsän kasvun tulkinnassa jopa muutamien senttimetrin tarkkuuteen. Myös kaatuneet puut löydettiin suurella tarkkuudella. Norjalaisessa tutkimuksessa (Gopakken T. ja Nässet E., 2004) ja Kanadalaisessa tutkimuksessa (Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma, 2004) päästiin hieman eri menetelmällä ja erilaisessa ympäristössä samansuuntaisiin lopputuloksiin.

## **1. Johdanto**

Laserkeilauksen avulla metsästä voidaan määrittää suurella tarkkuudella monia piirteitä, kuten puuston pituus, runkomäärä, biomassa ja latvuston läpimitta (Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma, 2004, Yu X. ym., 2004). Laserkeilaimien kehityttyä tarkemmiksi 90-luvulla, tuli mahdolliseksi havainnoida jopa yksittäisiä puita. Tämä vaatii korkean pulssitaajuuden (lähetettyjen pulssien määrä sekunnissa) ja kapean keilauskulman. Tällöin osa pulsseista heijastuu latvuksesta ja aina, tiheässäkin metsässä, osa heijastuu maasta puiden välistä (Juha Hyyppä ja Hannu Hyyppä, 2004). Pistepilveä prosessoimalla heijastuneista kaiuista voidaan erottaa maastomalli (DTM, digital terrain model) ja pintamalli (DSM, digital surface model) ja niiden erotuksena saadaan latvuston pituusmalli (CHM, canopy heigh model). (Yu X. ym., 2004).

Toistamalla keilauksia muutaman vuoden välein voidaan latvuston pituusmalleista erottaa kaatuneet puut tai puuryhmät ja puuston kasvu. Tutkimuksissa on päästy jopa viiden senttimetrin tarkkuuteen isomman alueen puuston kasvuestimaatissa. Hakkuukypsien puiden kaatumiset on myös pystytty havaitsemaan erittäin hyvin. Ainoastaan pienempien aluspuiden kaatumista ei kaikissa tapauksissa pystytty automaattisilla menetelmillä paikantamaan. (Yu X. ym., 2004).

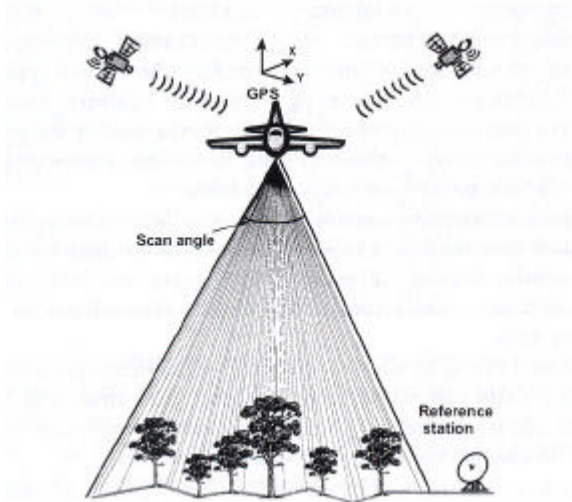
Perinteisessä metsien inventoinnissa näiden ominaisuuksien havainnointi on kallista ja aikaa vievää. Käytännössä kuitenkin lähes kaikki Suomen metsät ovat jonkin asteisen inventoinnin kohteina ja kaukohavainnointiin perustuvia menetelmiä on kehitelty viime aikoina ahkerasti. (Matti Maltamo ja Juho Pitkänen, 2003).

Laserkeilaukseen pohjautuvalla menetelmällä on näin ollen tilaus metsien inventoinnissa ja sitä voidaan pitää tarkimpana kaukokartoitusmenetelmänä metsien havainnoinnissa. Vielä automaattiset menetelmät eivät ole riittävän kehittyneitä ja kehitettävää on muun muassa laserkeilausaineistojen yhteensovittamisessa. Nykyisellään joudutaan käyttämään 2D-kuvien yhteensovittamiseen kehitettyjä menetelmiä. (Yu X. ym., 2004)

## **2. Laserkeilaimen mittausperiaate**

Laserkeilain on tietynlainen aktiivinen tutka eli se lähettää laserpulsseja (optinen / infrapuna) ja mittaan niiden heijastamaa kaikua (kuva 1). Laserpulssin kulkuajasta kohdepisteeseen ja takaisin voidaan määrittää kohdepisteeseen 3D tai 2D + 1D koordinaatit. Laserkeilain pyyhkii maastoa esimerkiksi lentosuuntaa vastaan kohtisuoraan, mutta toki muitakin menetelmiä on. Avauskulmasta ja lentokorkeudesta riippuen voidaan keilata erikokoisia linjoja maastossa. Koko alue saadaan mitattua lentämällä viereisiä linjoja. Menetelmä ei ole riippuvainen vuorokaudenajasta eikä yhtä kriittinen sääolosuhteista kuin optiset kartoitusmenetelmät. (Juha Hyyppä ja Hannu Hyyppä, 2004), (Juha Hyyppä ja Hannu Hyyppä, 2003)

Ilmasta tapahtuvassa mittaamisessa laserkeilain on sijoitettu joko helikopteriin tai lentokoneeseen. Havaintoalustaan on sijoitettu myös satelliittipaikannusjärjestelmä ja inertiaipaikannusjärjestelmä (Benoit St-Onge, Udayalakshmi Vepakomma 2004). Näiden avulla laserin asento ja sijainti pystytään määrittämään ja keilaimen pisteparvet saadaan orientoitua. Virheet paikannuksessa ja orientoinnissa siirtyvät suoraan kohdepisteiden paikannustarkkuuteen ja näin ollen paikannus ja orientointi ovat olennainen osa järjestelmää (K-H Thiel ja A Wehr, 2004).



**Kuva 1.** Laserkeilaimen mittausperiaate (Juha Hyyppä ja Hannu Hyyppä, 2004)

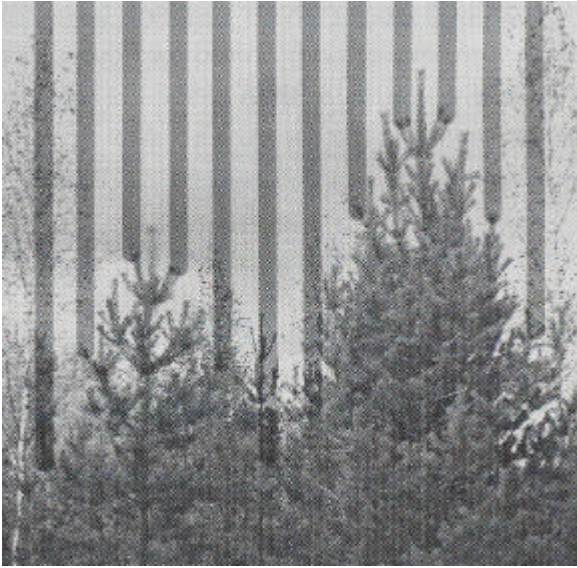
Kohteen erilaiset pintamateriaalit heijastavat takaisinsirontaa hieman eri tavalla ja esimerkiksi eri puulajien latvustot ja eri-ikäinen puusto heijastavat kaikuja eri tavalla. Toisaalta tuuli saattaa aiheuttaa jopa 1,5 metrin tasosiirtymän peräkkäisissä lennoissa. Tällä on merkitystä erityisesti muutostulkinnassa, koska puuta ei välttämättä tunnisteta samaksi eri vuosien aineistoissa. (Juha Hyyppä ja Hannu Hyyppä, 2003)

Laserkeilausta käytettäessä tulee aina kiinnittää huomiota järjestelmän virheisiin ja niiden poistoon. GPS/IMU-järjestelmän virheet aiheuttavat deformaatiota keilauksen linjoihin ja aineistot onkin joka lennon osalta kalibroitava. Laserkeilauksesta aiheutuvat systemaattiset virheet voidaankin osoittaa jokaiselle lennolle, linjalle, GPS-mittaukselle ja laserpisteelle. Mikäli systemaattisia virheitä ei ennen pistepilven prosessointia korjata, heikkenee tarkkuus senttimetrin tarkkuusluokasta desimetrin tai metrin tarkkuusluokkaan. Tällä on merkitystä erityisesti muutostulkinnassa, jossa keilausten väli on vuosia ja pyritään löytämään desimetriluokan muutoksia kasvun havainnoinnissa. Keilauksessa korkeustaso voidaan kalibroida mm. järvien tai muiden tasomaisten kohteiden avulla. Muutenkin muutostulkinnassa laitteistojen ja prosessointimenetelmien olisi hyvä olla samoja molemmissa keilauksissa, jottei esimerkiksi algoritmien eroista tule virhettä tulokseen. (Juha Hyyppä ja Hannu Hyyppä, 2003)

## 2.1 Laserkeilauksen käyttö metsän havainnoinnissa

Laserkeilaimen käyttöä puuston tulkinnassa on tutkittu jo 80-luvulta lähtien. Tärkeimpiä parametreja, joita on pyritty määrittämään, ovat puiden korkeus, runkomäärä ja biomassa. Korkean resoluution ilmakuvat mahdollistivat 90-luvulla hahmojen ja piirteiden tunnistamisen, jota hyväksi käyttäen pystyttiin havaitsemaan jopa yksittäisiä puita. Laserkeilaustekniikkojen kehittyminen 90-luvun lopulla mahdollisti puolestaan jopa yksittäisen puun mittaamisen kolmiulotteisesti. Yksittäisistä puista myös sellaisten parametrien kuin korkeus, latvuston leveys ja puulajin määrittäminen onnistuttiin demonstroimaan. Muutostulkinnassa ilmakuvat eivät ole osoittautuneet riittävän tarkoiksi. Erityisesti vaikeuksia on harvennuksen ja metsätuhojen tulkinnassa. (Yu X. ym., 2004)

Laserkeilaus sen sijaan soveltuu metsän muutosten havainnointiin hyvin. Keilaus tulee suorittaa muutaman vuoden välein samalla alueella, mielellään samanlaisella laitteistolla ja samoin menetelmin.



Muutosten havainnoinnissa voidaan käyttää objektorientoitua muutostulkintaa - objektina yksittäinen puu. Yu X. ym., (2004) esittivät ensimmäisinä tutkimustuloksen ilmasta käytettävän, kapean keilauskulman ja korkean pulssitaajuuden laserskeilaimen käytöstä metsän muutosten tulkinnassa. (Yu X. ym., 2004)

Aina ei ole mahdollista käyttää homogeenista aineistoa muutoksen tutkintaan. Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) tutkivat heterogeenisen aineiston käyttöä metsän muutostulkinnassa.

**Kuva 2.** Laserpulssit eivät välttämättä osu puiden latvoihin, mikä aiheuttaa virhettä latvuston pituusmalline. (Yu X. ym., 2004)

### **3. Havaintoaineiston keruu metsän muutostulkintaa suoritettaessa**

Tutkimuksissa havaintoaineisto on kerätty testialueilta ja maastossa on suoritettu kontrollimittauksia. Tavoite on, että tulevaisuudessa keilaimella voisi mitata laajoja alueita ilman sen suurempaa maastotyötä ja päästä tarkkaan muutostulkintaan. Eri tutkimuksissa aineistoa kerättiin melko erilaisilla laitteilla ja pulssitaajuuksilla.

#### **3.1 Testialueet**

Yu X. ym. (2004) käyttivät testialueena Kalkkisissa (n. 130 km pohjoiseen Helsingistä) sijaitsevaa n. 100 hehtaarin kokoista aluetta. Pääpuulajeina alueella ovat mänty, kuusi ja koivu. Alueelle ei kohdistunut juuri lainkaan metsänhoidollisia toimenpiteitä keilausten välisenä ajankohtana. Metsän puusto on tarkasti inventoitu ja samaa aluetta on käytetty hyväksi useissa eri tutkimuksissa. Kaatuneet ja kaadetut puut paikannettiin maastotutkimuksissa. (Yu X. ym., 2004)

Gopakken T. ja Nässet E. (2004) käyttivät testialueena n. 1000 hehtaarin aluetta Kaakkois-Norjassa Vålerin kunnassa. Alue on melko tasainen ja metsä on tyypillistä norjalaista metsää. Pääpuulajeina ovat mänty ja kuusi. Maastoaineisto alueella kerättiin 1998. Alueella oli 87 ympyrän muotoista 300 neliömetrin kokoista aluetta jakautuneena ympäri testialuetta. Puiden läpimitta ja pituus määritettiin maastotutkimuksissa manuaalisin mittauksin ja puiden pituus ja volyyymi määritettiin erinäisin mallein. (Gopakken T. ja Nässet E., 2004)

Benoit St-Ongen ja Udayalakshmi Vepakomman (2004) käyttämä kuuden neliökilometrin testialue sijaitsee Kanadan Quebecissa. Alueella on mäkiä ja puulajeina Kanadalle tyypillistä havupuustoa: palsamipihtaa, koivua ja haapaa. Pääosa puustosta on hakkuukypsää vanhaa metsää.

### 3.2 Käytetty laitteisto ja mittausparametrit

Mikäli mittaus perustuu yksittäisten puiden havainnointiin, tulee pulssitaajuuden olla riittävän suuri ja keilauskulman riittävän pieni (alle 10°), jotta kohteeseen osuu tarpeellinen määrä pulsseja riittävän tiheään. Pienellä keilauskulmalla puiden aiheuttamia varjostuksia sivuille ei myöskään tule. Samalla kertaan mitataan yleensä sekä ensimmäinen että viimeinen kaiku. Yu X. ym. (2004) käyttivät lentokorkeutena 400 metriä, jotta pulssitiheys saatiin riittävän suureksi yksittäisten puiden havaitsemiseksi. Tällöin keilain keilaa maanpinnalla n. 100 metriä leveän alueen. Paikannuksessa käytettiin kolmea DGPS-laitetta, joista yksi sijaitsi lentoaluksessa ja kaksi tukipisteillä (toinen varalla) kaikki tiedot käyvät esille taulukosta 1. Mittaukset suoritettiin 2-3.9.1998 ja 15.6.2000. (Yu X. ym., 2004)

Norjalaistutkimus perustui hieman eri menetelmään ja heidän käyttämänsä pulssitiheys oli huomattavasti alhaisempi (Gopakken T. ja Nässet E., 2004). Tosin tällöin ei enää pyrittykään tunnistamaan yksittäisiä puita.

Kanadalaisten mittauslaitteisto erosi molemmilla keilauksilla toisistaan. Vuoden 1998 lennolla käytetyllä keilaimella ei pystynyt rekisteröimään kuin yhden kaiun, joten alue jouduttiin keilaamaan kahteen kertaan: ensiksi havaittiin ensimmäinen kaiku latvustosta ja toisella lennolla toinen kaiku maasta. Pulssitaajuus oli myös erittäin pieni, vain 4 kHz. Vuonna 2003 suoritettussa keilauksessa mittaustaajuus oli 50 kHz. (Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma, 2004)

	Yu X. ym.,(2004)	Gopakken T. ja Nässet E., (2004)	Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma, ( 2004)
Laserlaitteisto	Toposys-1	ALTM 1210	ALTM1020/ALTM2050
Lentokorkeus	400m	700m/840m	700m/1000m
Pulssitaajuus	83 000 Hz	10 000 Hz	4 000Hz/50 000 Hz
Pulssitiheys	n. 10m <sup>-2</sup>	1,1m <sup>-2</sup> /0,9m <sup>-2</sup>	0,3m <sup>-2</sup> /3m <sup>-2</sup>
Keilauskulma	±7,1°	14°/15°	10°/15°
Ensimmäinen lento	2-3.9.1998	8-9.6.1999	28.6.1998
Toinen lento	15.6.2000	16-17.7.2001	14-16.8.2003

**Taulukko 1.** Tutkimuksissa käytetyt laitteistot ja mittausparametrit. Kohdissa joissa on kaksi arvoa, tarkoittavat ne eri vuosien arvoja.

### 4. Aineiston käsittely mittauksen jälkeen

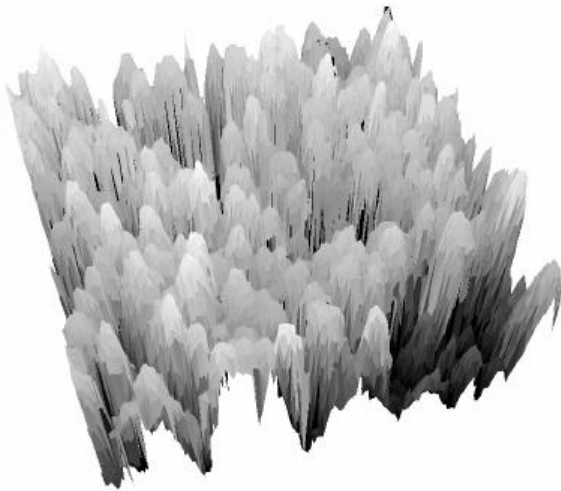
Ennen varsinaista muutostulkintaa aineistoa on käsiteltävä. Aineistosta on laskettava latvuston korkeusmalli ja yksittäisten puiden latvustot on segmentoitava. Periaatteessa tämä on tehtävä kummallekin aineistolle erikseen samalla menetelmällä ja samoilla algoritmeilla. (Yu X. ym., 2004)

Laseraineistosta voi hyödyntää joko yhden kaiun per pulssi tai samasta pulssista voi erottaa useita kaikuja, joista osa heijastuu latvustosta ja osa maasta. Gopakken T. ja Nässet E. (2004) käyttivät aineistosta ensimmäisen ja viimeisen kaiun. Ensimmäinen kaiku tulkittiin heijastuneeksi latvustosta ja viimeistä kaikua käytettiin mallintamaan maan pintaa. Aineiston käsittelyyn he käyttivät BN Mapping (Norway) -ohjelmaa.

Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) käyttivät eri ohjelmistoja eri aikoina tuotetun aineiston käsittelyyn. Vuoden 1998 aineisto käsiteltiin REALM (Ophtech Inc) ohjelmistolla ja jälkimmäinen keilaus Terrascan (Terrasolid Ltd) -ohjelmistolla. Ensimmäisen aineiston käsittelyssä tutkijat eivät edes pystyneet käyttämään alkuperäistä pistepilveä.

## 4.1 Latvuston pituusmalli

Latvuston pituusmalli (canopy height model, CHM) lasketaan digitaalisen pintamallin ja digitaalisen maastomallin avulla. Pintamalli (digital surface model, DSM) muodostetaan latvustosta heijastuneista pulsseista. Se voidaan muodostaa esimerkiksi siten, että jokaisesta pikselistä (0.5 m) otetaan korkein kohta (suurin z-koordinaatti). Kohdissa, joista ei ole heijastunut pulssia, käytetään Delaunay-kolmiointia ja lineaarista interpolointia. (Yu X. ym., 2004)



Maastomallia (digital terrain model, DTM) muodostettaessa täytyy kaikki puista ja rakennuksista heijastuneet pulssit suodattaa pois. Tämä menetelmä on kehitetty geodeettisella laitoksella ja perustuu korkean resoluution ja alhaisen resoluution maastomallien vertailuun, jolloin voidaan järjestyksessä yksilöidä ja poistaa muut kuin maasta heijastuneen kaiut. Alhaisen resoluution (10\*10 m) maastomallista on helppo suodattaa kasvillisuus pois. Jokaisesta 10\*10 m pikselistä valitaan laserpistepilven ”alhaisin” piste (pienin z-koordinaatti). (Yu X. ym., 2004)

**Kuva 3.** Latvuston pituusmalli  
(Matti Maltamo ja Juho Pitkänen, 2003)

Tutkimuksessa, Yu X. ym. (2004), käytettiin aluksi seitsemän ja viiden metrin maastomalleja, jotka generoitiin edellä mainitulla tavalla. Tämän jälkeen viiden metrin maastomalli uudelleengeneroitiin seitsemän metrin maastomallin avulla, jolloin muodostui maastomalli DTM 57. Kun maastopisteitä ei pystytty enää paikallistamaan vertailemalla DTM5 ja DTM 57, DTM 5:n yksilöidyt pisteet korvattiin DTM 57:n jäljellä olevilla maastopisteiksi tulkituilla pisteillä. Edellä mainittua jatkettiin maastomallin resoluutioilla 3 m, 2 m, 1 m aina 0,5 metriin asti. Lopullinen maastomalli luotiin niiden kaikujen avulla, jotka poikkesivat vähemmän kuin puoli metriä tästä ja ovat oletettavimmin heijastuneet maasta. (Yu X. ym., 2004)

Gopakken T. ja Nässet E. (2004) muodostivat aineistosta TIN (epäsäännöllisten kolmioiden muodostama verkko) -maastomallin erilaisella algoritmilla, patentoidun menetelmän avulla BN Mapping (Norway) -ohjelmalla. Heijastuneiden pulssien viimeinen kaiku tulkittiin heijastuneeksi maasta ja käytettiin maastomallin luomiseksi. TIN-mallin tarkkuudeksi arvioitiin noin 25 senttimetriä ja se laskettiin molemmille keilauksille erikseen. Myös pintamalli luotiin TIN-malliksi, mutta tällöin kaikki heijastuneet ensimmäiset pulssit tulkittiin kuuluviksi latvustoon. Tosin alle kahden metrin korkeudesta heijastuneen pulssit jätettiin laskennasta pois. Jokaisen pisteen suhteellinen korkeus - puuston korkeus - laskettiin ensimmäisen kaiun ja maastomallin erotuksena. (Gopakken T. ja Nässet E., 2004)

Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) käyttivät maastomallin luomisessa apuna tarkkaa GPS-kalustoa ja takymetriä. Näiden avulla viimeisen kaiun pulssit pystyttiin lajittelemaan maasta heijastuneiksi. Pintamallin luomisessa tutkijat käyttivät ”ei-maasta” heijastuneita pulsseja. Tämä on hieman arveluttavaa, kuten he itsekin toteavat. Näiden avulla muodostettiin puuston pituusmalli. Vuoden 2003 maastomalli ja pintamalli luotiin puolestaan eri ohjelmistolla ja eri menetelmällä. Maastomalleja ja pintamalleja vertaamalla pystyttiin tosin toteamaan niiden olevan melko hyvin yhtenevät ja täten muutostulkintaa pystyttiin tekemään. Lopullinen maastomalli luotiin



yhdistetystä aineistosta (eri vuosien maastomallien pisteet) ArcGIS v.8.3 -ohjelmistolla. Latvuston pituusmalli molemmille vuosille muodostettiin pintamallien ja lopullisen maastomallin erotuksena. (Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma, 2004)

## 4.2 Puuston mallinnus

Yksittäisten puiden rajaamiseen (segmentointiin) Yu X. ym. (2004) käyttivät kaupallista ohjelmistoa (Arboreal Forest Inventory Tools of Arbonaut). Segmentoinnin aikana määritettiin puiden latvuston muoto ja sijainti. Yksittäisten puiden sijainti määritettiin alipäästösuodattamalla latvuston pituusmallia, jolloin paikalliset maksimiarvot ilmaisivat yksittäisten puiden sijainnin. Tämän jälkeen vastakkaistyyllisen (watershed-type) segmentoinnin avulla pystyttiin esittämään yksittäisen puun latvus. (Yu X. ym., 2004)

Gopakken T. ja Nässet E. (2004) eivät tutkimuksessaan pyrkineet mallintamaan yksittäisiä puita. Heidän menetelmänsä perustui tilastomatematiikkaan. Puuston korkeuksista laskettiin erilaisia jakaumia. Latvustoon tulkitut osumat jaettiin erilaisiin tilastoihin, jotka kohdistuivat edellä mainittuihin koealoihin. Koealat oli referenssiksi inventoitu myös maastotutkimuksissa. Tilastoina latvuston korkeusluokille jokaiselle koealalle käytettiin 10 % ( $h_{10}$ ), 50 % ( $h_{50}$ ) ja 90 % ( $h_{90}$ ). Myös maksimiarvojen ( $h_{max}$ ) ja keskimääräisten ( $h_{mean}$ ) korkeuksien jakauma laskettiin. Lisäksi saatiin tietoa latvuston tiheydestä. Alhaisimman latvuston (> 2 m) korkeusmallin ja korkeimman latvuston korkeusmallin väli jaettiin kymmeneen yhtä suureen väliin. Latvuston tiheys määritettiin siten, että pulssien osuminen edellä mainittuihin 0...9 väliin laskettiin. Näistä muutostulkinnassa käytettiin hyväksi välejä #1 ( $d_1$ ), #5 ( $d_5$ ) ja #9 ( $d_9$ ).

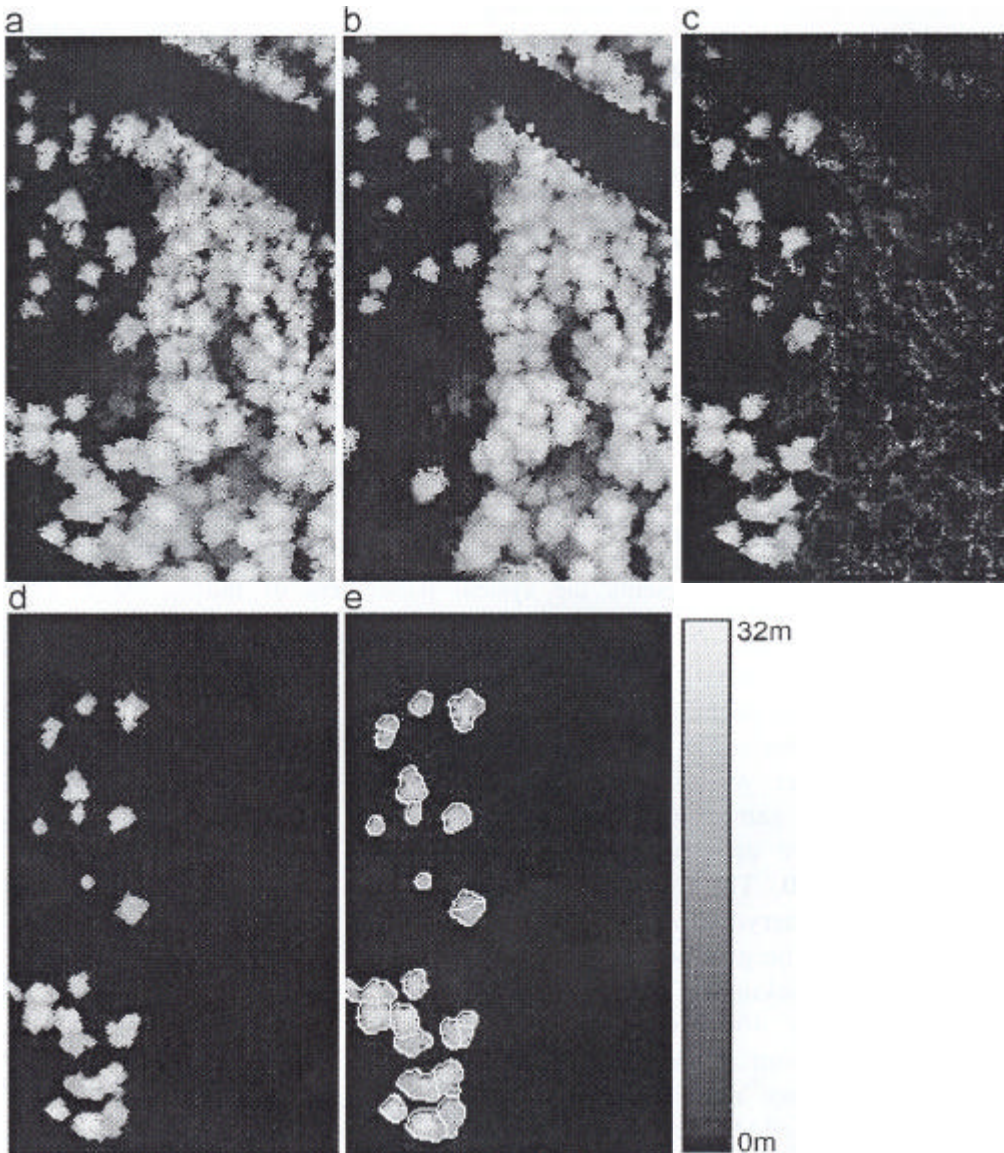
Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) eivät myöskään yrittäneet mallintaa yksittäisiä puita, mikä ei ensimmäisen keilauksen pienestä näytteenottajaajuudesta johtuen olisi mitenkään ollut mahdollista. Puuston pituusmallia tosin käytettiin kaatuneiden puuryhmien havaitsemiseen ja kasvun tulkintaan. Vertailukohtana he käyttivät videokuva-aineistoa ja kaukokartoitusatelliittien kuvia.

## 5. Puuston muutostulkinta

Puuston muutostulkinnassa käsitellään kaatuneiden puiden ja puiden kasvun aiheuttamaa muutosta. Vain Yu X. ym. (2004) käsitelivät tutkimuksessaan kaatuneiden yksittäisten puiden tunnistamista ja laskemista. Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) pyrkivät löytämään useampien puiden kaatumisesta johtuvia aukkoja metsikössä.

### 5.1 Kaatuneiden puiden tulkinta

Puuston muutostulkintaa pystytään tutkimaan, kun samalla alueella on eri ajanhetkinä tehty laserkeilauksia. Menetelmä, jolla pyritään määrittämään kaadetut puut, perustuu erotuskuviin. Myöhemmästä keilauksesta muodostettu latvuston korkeusmallikuvan pikselien arvoja vähennetään aikaisemman kuvauksen vastaavista pikseliarvoista. Saatu erotuskuva kuvastaa pikselin tarkkuudella muutosta ajanhetkien välillä. Korkeat positiiviset erotusarvot kertovat kaadetuista tai kaatuneista puista. Yu X. ym. (2004) kehittivät tutkimuksessaan automaattisen menetelmän kaatuneiden puiden identifiointiin. Ensin määrätään sopiva kynnyсарvo, jotta saadaan merkittävät eroavaisuudet selville (kaatuneet puut erotettua muista eroavaisuuksista). Sen jälkeen morfologiset aukot pyrittiin määrittämään siten, että kohinan aiheuttama vaihtelu pystyttiin poistamaan. Kaatuneet puut segmentoitiin lopuksi näiltä käsitellyiltä erotuskuvilta, jolloin niiden lukumäärä ja sijainti pystyttiin määrittämään. (Yu X. ym., 2004)



**Kuva 4.** Kaatuneiden puiden määrittäminen erotuskuvilta ( Yu X. ym., 2004)

Kuvassa kolme on kuvasarja menetelmästä. Kuva a on puuston pituusmalli, joka on muodostettu 1998 suoritetusta laserkeilauksesta ja kuvassa b on vastaava pituusmalli tuotettu vuoden 2000 aineistosta. Kuvassa c on erotuskuva, joka on muodostettu vähentämällä a-kuvasta b-kuva pikseli pikseliltä. Suuret positiiviset arvot erotuskuvalla ilmiantavat kaadetut puut. Kuvassa d on suoritettu erotuskuvalle suodatusta, jolloin muu kohina on saatu hävitettyä. Kuvassa e yksittäiset kaatuneet puut on vielä segmentoitu. (Yu X. ym., 2004)

Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) eivät pyrkineet segmentoimaan ja löytämään yksittäisten puiden kaatumisia, mutta isompien puuryhmien kaatumisesta aiheutuvia aukkoja metsässä pyrittiin löytämään eri vuosien aineistoista. Tämän he suorittivat yksinkertaisen algoritmin avulla, joka vertailee puuston pituusmalleja keskenään ja jos havaitaan suuria muutoksia pituusmallissa, tulkitaan ne uusiksi aukkoiksi metsikössä.

## 6.2 Metsän kasvu

Metsän kasvun tulkinta on vaikea muutostulkintatehtävä. Tällöin ei ole enää järkevää pyrkiä tutkimaan yksittäisen puun kasvua. Ensinnäkin se on lähes mahdotonta (jos mittauksen välissä on vain muutama vuosi) ja toiseksi sille ei ole tarvetta. Sen sijaan järkevää on tutkia metsän kasvua kuviotasolla. Tämä voidaan laskea ottamalla kaikkien puiden keskimääräinen korkeus molemmista keilauksista ja niiden erotus voidaan tulkita metsän kasvuksi. Tämän menetelmän käytössä tosin täytyy olla tarkkana, koska metsän harvennus kyseisellä kuviolla keilausten välillä saattaa johtaa vääriin tulkiin ja systemaattisiin virheisiin. Yu X. ym. (2004) päätyivätkin tutkimuksessaan käyttämään toisenlaista lähestymistapaa. Siinä yksittäiset puut erotettiin latvuston pituusmallista ottamalla mukaan jokaisen segmentoidun puun korkein piste (suurin z-koordinaatti). Puun sijainti määritettiin tämän segmentoidun puun korkeimpaan kohtaan. Jos vielä kahden segmentin korkeimmat pisteet olivat liian lähellä toisiaan (0,5 m), tulkittiin ne yhdeksi segmentiksi. Puuston kasvun tulkinnassa käytettiin sitten vain niitä puita, jotka pystyttiin identifioimaan samoiksi molempina ajanhetkinä. Metsän kasvuksi saatiin tällöin näiden puiden keskimääräinen pituuden lisäys, jota tarkasteltiin tilastollisesti. Keskimääräisestä pituuden kasvusta pystyttiin keskivirheen avulla määrittämään kasvun mallinnuksen tarkkuus. (Yu X. ym., 2004)

Gopakken T. ja Nässet E. (2004) lähestyivät metsän kasvun tulkintaa tilastollisesta näkökulmasta. Havaintodata jaettiin tilastollisiin luokkiin (ks. 5.2), joiden tilastollisen muutoksen avulla pyrittiin tulkitsemaan puuston kasvua. Metsän kasvun mittarina käytettiin keskimääräisiä eroja eri korkeuskerroksien tiheyksien keskiarvoista lasketuilla parillisen t-testin arvoilla eri vuosina kerätyistä aineistoista. Puuston tyyppin vaikutusta mittauksen tulokseen tutkittiin laskemalla keskimääräisiä eroja korkeuskerroksien tiheyksissä eri vuosina kerätyistä aineistoista. Latvuston korkeus ja tiheyskerrokset laskettiin 87 testialalle. Kaikki tilastollisesti määritetyt korkeusluokat ( $h_{10}$ ,  $h_{50}$ ,  $h_{90}$ ) pystyttiin todistamaan tilastollisesti merkityksellisesti kasvaneiksi.

Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) pääsivät metsän kasvussa edellisten tutkimusten kanssa samansuuntaiseen lopputulokseen. Ensimmäisen keilausten pienestä pulssitaajuudesta johtuen aineiston taso oli huomattavasti heikompi kuin edellä mainituissa tutkimuksissa. Toisaalta heidän keilaustensa aikaväli oli viisi vuotta, jolloin puusto oli kasvanut huomattavasti enemmän ja kasvun tulkinta siten helpompi.

## 6. Yhteenveto

Yu X. ym. (2004) kehittämä automaattinen menetelmä puiden tunnistamiseksi laserkeilausaineistosta toimi melko hyvin. Ongelmia tuottivat lähinnä lähekkäin toisiaan kasvaneet puut, jotka segmentoitiin yhdeksi. Myös pienten lehtipuiden segmentointi aiheutti ongelmia. Kaadetuista puista onnistuttiin tunnistamaan automaattisesti lähes 75 prosenttia tapauksista. Vain pienehköt (latvuksen halkaisija alle metrin) kaatuneet puut tuottivat ongelmia. (Yu X. ym., 2004)

Yu X. ym. (2004) käyttivät kahtakymmentä kuviota analysoidessaan metsän kasvua edellä kuvatulla menetelmällä. Niiden puiden määrä, jotka pystyttiin tunnistamaan molemmista aineistoista oikein ja käyttämään kasvun laskennassa vaihteli 39 - 70 % välillä. Suuri vaihteluväli johtui kuvioiden eri-ikäisestä puustosta. Kasvulle saatiin selkeä yhteys puulajin ja puuston korkeuden funktiona kuviotasolla. Mikäli kuviolta pystyttiin segmentoimaan ja yhteen sovittamaan molemmissa keilauksissa yli 100 puuta, päästiin alle viiden senttimetrin tarkkuuteen kuviotasossa. (Yu X. ym., 2004)

Laserkeilausta käytettäessä virhettä syntyy latvuston pituusmalliin ja sitä kautta puuston kasvun muutostulkintaan. Laserkeilauksessa laserpulssit eivät osu välttämättä puiden korkeimpiin kohtiin (ks. kuva 1) ja tästä aiheutuu systemaattista virhettä tai maastomalli on liian ”korkealla” johtuen aluskasvillisuuteen osuneista pulsseista. Näistä aiheutuva virhe latvuston pituusmallissa on suuruudeltaan reilut puoli metriä. Latvuston pintamalli antaa siis hieman liian pienen tuloksen, joka on korjattavissa. (Yu X. ym., 2004)

Gopakken T. ja Nässet E. (2004) tutkimuksessa kaikki tilastollisesti määritetyt korkeusluokat ( $h_{10}$ ,  $h_{50}$ ,  $h_{90}$ ) pystyttiin todistamaan tilastollisesti merkityksellisesti kasvaneiksi. Kasvu vaihteli 40 senttimetrinä 132 senttimetriin.

Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) pääsivät odotetunlaiseen tulokseen muutosten tulkinnassa ja pystyivät ainakin osittain vakuuttamaan myös pienemmän pulssitaajuuden keilaimen käyttömahdollisuuden metsän muutostulkinnassa. Keilausten väli oli viisi vuotta ja jopa kasvu pystyttiin tiettyssä määrin määrittämään heidänkin aineistostaan.

Nuoren metsän tapauksessa muutostulkinta on luonnollisesti vaikeampaa. Tämä selviää Gopakken T. ja Nässet E. (2004) tutkimuksessa nuoren metsän osalta suurempana keskihajontana ja Yu X. ym. (2004) tutkimuksessa nuorten puiden heikompana segmentointina ja samoiksi tunnistamisena. Kaikissa menetelmissä tutkittua muutostulkintaa voi pitää merkittävänä.

Kaikki eri menetelmillä tehdyt tutkimukset todistavat samaa: metsän muutostulkintaa pystyy tekemään hyvällä tarkkuudella laserkeilauksen avulla. Menetelmä soveltuu erityisesti suurien homogeenisten metsäalueiden muutostulkintaan. Yu X. ym. (2004) todistivat kiistatta korkean pulssitaajuuden keilaimen mahdollisuudet. Gopakken T. ja Nässet E. (2004) esittelivät tilastomatematiikan keinot ja niiden käyttömahdollisuuden muutostulkinnassa. Tällöin voidaan tinkiä pulssitaajuudesta ja mahdollisesti suurempia alueita voidaan keilata kerralla. Benoit St-Onge ja Udayalakshmi Vepakomma (2004) puolestaan osoittivat, että aineiston ei välttämättä tarvitse olla samanlaisella laitteistolla tuotettu ja sittenkin voidaan tilastollisesti nähdä kasvu.

## **7. Kehitettävää**

Yu X. ym. (2004) toteavat, että tulevaisuudessa kehitettävää olisi erityisesti segmentointialgoritmeissa. Tutkimuksessaan he käyttivät algoritmia, joka perustui yksinkertaisesti korkeimpien kohtien geometriseen etäisyyteen. Tästä seurasi, että kaikkia lähekkäisiä puita ei segmentoitu yksittäisiksi puiksi ja toisaalta joitakin laajoja yksittäisiä puita segmentoititiin useammaksi puuksi. Suurin osa laserkeilainaineistojen segmentointialgoritmeista on kehitetty 2D-kuville, eivätkä ne näin ollen sovellu kovin hyvin 3D-pistepilvien segmentointiin. Kehitettävää on myös puiden yhteensovitusalgoritmeissa, jotta eri aikoina suoritetuilta keilauksilta voitaisiin tunnistaa samat puut. Tulevaisuudessa puut olisi sovitettava yhteen suoraan 3D-pistepilvien avulla. (Yu X. ym., 2004)

Kaikissa tutkimuksissa korostettiin lisätutkimuksen tarvetta, jotta menetelmä saataisiin laajamittaiseen operationaaliseen käyttöön. Ongelmia tuottivat eri puulajien ja eri-ikäisten metsien tuottamat erilaiset pistepilvet

## **Viitteet**

T. Gopakken, E. Nässet (2004). Effects of forest growth on laser derived canopy metrics, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVI-8/W2, s.224-227

Benoit St-Onge, Udayalakshmi Vepakomma,(2004).Assessing forest gap dynamics and growth using multi-temporal laser-scanner data, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVI-8/W2, s.173-178

Xiaowei Yu, Juha Hyypä, Harri Kaartinen, Matti Maltamo, (2004). Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanner, Remote Sensing of Environment 90, s. 451-462

Juha Hyypä ja Hannu Hyypä (2004). Kaukokartoitusaineistot metsien arvioinnissa – aineistoverailuja, Poligonin teemapäivä; Metsien kaukokartoitus

Juha Hyypä, Hannu Hyypä (2003). Laserkeilauksen laatu ja sen osatekijät, Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu 40 – Maanmittaustieteiden päivät 2003-

Matti Maltamo, Juho Pitkänen, Laserkeilauksen metsätaloudelliset sovellusmahdollisuudet, Maanmittaustieteiden Seuran julkaisu 40 – Maanmittaustieteiden päivät 2003-

K-H Thiel, A Wehr (2004).Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVI-8/W2 s.14- 18