

# **MÄNNYN (*Pinus sylvestris*) LAATUTUNNUSTEN ESTIMOINTITARKKUUS MAASTOLASERKEILAUSAINEISTOSTA**

Marianna Joensuu

Metsävaratieteen ja -tekniikan pro gradu -tutkielma

Helsingin yliopisto  
Metsätieteiden laitos

2013



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author Marianna Joensuu			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Männyn ( <i>Pinus sylvestris</i> ) laatutunnusten estimointitarkkuus maastolaserkeilausaineistosta			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsävaratiede ja -teknologia			
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma	Aika/Datum – Month and year Marraskuu 2013	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 57 sivua + liitteet 2 sivua	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Metsien inventoinnissa pyritään saamaan jatkuvasti tarkempaa tietoa puustosta niin valtakunnan kuin yksityismetsien tasolla. Nykyisellään metsien suunnittelussa laatuominaisuuksia kuvaavia tietoja ei juuri mitata pystyjuista, sillä tarkkoihin puustomittauksiin ei ole resurssi- ja kustannussyistä mahdollisuuksia.</p> <p>Tämän tutkimuksen ensimmäisenä päätavoitteena oli selvittää, millä tarkkuudella tukkikokoisen männyn ulkoisesti tarkasteltavia sisäisen puuaineen laatua ennustavia ominaisuuksia pystytään mittaamaan manuaalisella yhden maastolaserkeilausaineiston tarkastelulla. Tarkasteltavia tunnuksia olivat puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta sekä alimman kuivan ja tuoreen oksan korkeudet. Toisena päätavoitteena oli selvittää, millä tarkkuudella rungon yleislaatua kuvaava puuluokka (VMI) voidaan ennustaa maastolaserkeilausaineistosta mitattujen ja niistä johdettujen puutunnusten perusteella. Johdettuja tunnuksia olivat puun tilavuus, latvussuhde, kuivaoksaisten ja oksattoman rungonosan suhde puun pituuteen sekä muotoluku. Ennustamiseen käytettiin lähimmän naapurin menetelmää, missä lähimpien naapurien etsintä suoritettiin Random Forest -menetelmän avulla.</p> <p>Maastolaserkeilausaineiston suhteellinen mittaustarkkuus (RMSE %) referenssinä toimineeseen maastoaineistoon nähden oli pituudella 7,54 % (suhteellinen harha -6,16 %), rinnankorkeusläpimitalla 6,39 % (-2,46 %), yläläpimitalla 10,01 % (0,40 %), alimman tuoreen oksan korkeudella 9,21 % (-5,99 %) ja alimman kuivan oksan korkeudella 34,95 % (-1,47 %). Rungon laatua ilmentävän puuluokan ennustuksessa maastolaserkeilausaineistosta päästiin 78 % ennustustarkkuuteen (5 puuluokkaa). Karkeammalla kolmen puuluokan luokituksella päästiin 87 % ennustustarkkuuteen. Tulosten perusteella voidaan todeta, että laatutunnuksia, kuten oksarajoja voidaan tulkita maastolaserkeilausaineistosta melko hyvällä tarkkuudella. Myös puuluokan ennustaminen onnistuu kohtuullisesti (5 luokkaa) ja karkeammalla luokituksella (3 luokkaa) hyvin.</p> <p>Tässä työssä kuvattua ennustemenetelmää on mahdollista vielä kehittää esimerkiksi maastolaserkeilauksen automaattisen tulkinnan avulla sekä yhdistämällä useita keilausaineistoja tarkasteltavasta kohteesta. Potentiaalisin lähitulevaisuuden käytännön sovellus on, että TLS-aineisto voi toimia referenssinä lentolaserkeilaukselle, sillä tähän tarkoitukseen karkeamman luokituksen tarkkuus vaikuttaa jo varsin lupaavalta.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Maastolaserkeilaus, mänty, laatu, puuluokka, puuluokan ennustus, Random Forest -menetelmä			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikin tiedekirjasto ja Metsätieteiden laitos			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Ohjaajat: Markus Holopainen, Mikko Vastaranta, Marketta Sipi, Juha Rikala			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Forest Sciences	
Tekijä/Författare – Author Marianna Joensuu			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Estimation accuracy of the quality factors of pine ( <i>Pinus sylvestris</i> ) using Terrestrial Laser Scanning			
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest Resource Science and Technology			
Työn laji/Arbetets art – Level Master’s thesis	Aika/Datum – Month and year November 2013	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 57 pages + appendix 2 pages	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>In forest inventories, more and more detailed information about the constantly growing stock is intended to obtain both at national and at private forests level. At present, in forest planning the features describing wood quality are rarely estimated from standing trees since there are limited resources for the precise measurements of the trees due to high expenses.</p> <p>The principal aim of this study was to determine the precision whereby the externally reviewed predictive features of the internal quality of a log-size pine wood can be estimated manually using Terrestrial Laser Scanning (TLS). The examined features were tree height, diameter at breast height, upper diameter as well as the heights of the lowest dead and living branch. The second main objective was to determine the precision whereby the tree class can be predicted based on measured and derived tree attributes. The derived attributes were the volume of the wood, crown ratio, the relation of dead branched and branch free part of the tree to the tree height, and form factor. For forecasting the nearest neighbor method was used where the search for the nearest neighbors was performed using the Random Forest -method.</p> <p>The relative accuracy (RMSE %) of TLS data in relation to the reference field data was found to be 7.54% (bias -6.16%) for the tree height, 6.39% (-2.46%) for the breast height diameter, 10.01% (0.40%) for the upper diameter, 9.21% (-5.99%) for the height of the lowest living branch and 34.95% (-1.47%) for the height of the lowest dead branch. On the prediction of the tree class indicating the stem quality, the TLS data reached 78 % classification accuracy (5 tree classes). With harsher three tree class categorization 87% classification accuracy was reached. Based on the results can be said that quality factors, such as the lowest branches can be measured from the TLS data with reasonably adequate accuracy. Also the prediction of the tree class turns out decently (5 classes) and with harsher categorization (3 classes) well.</p> <p>The forecasting method described in this study can still be improved for example by the automatic interpretation of the laser scanning data, as well as combining several laser scanning points from the examined target. The most potential near future application is that TLS data can work as reference for airborne laser scanning because for this purpose the harsher categorization accuracy seems to be already very promising.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Terrestrial Laser Scanning (TLS), pine, tree class, prediction of quality, Random Forest			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikki Science Library and Department of Forest Sciences			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Supervisors Markus Holopainen, Mikko Vastaranta, Marketta Sipi, Juha Rikala			

## **Alkusanat**

Tämä tutkimus on tehty osana akatemiahanketta (PRECISEFOR, Science and Technology Towards Precision Forestry), jossa kehitetään uusia mittausmenetelmiä entistä tarkemman inventointitiedon tuottamiseksi metsäsuunnittelun päätöksenteon tueksi. Hankkeeseen osallistuivat Helsingin yliopiston lisäksi Geodeettinen laitos sekä Hämeen ammattikorkeakoulu.

Kiitän seuraavia yhteistyötahojen edustajia pro gradu -työn mahdollistamisesta: Markus Holopainen (HY), Mikko Vastaranta (HY) ja Juha Hyyppä (Geodeettinen laitos), Risto Viitala (HAMK), Marketta Sipi (HY) sekä Juha Rikala (HY).

Lausun kiitokset myös Ville Kankareelle (HY) sekä Anssi Krooksille (Geodeettinen laitos) avusta aineiston käsittelyssä.

Lopuksi kiitokset kannustuksesta ja tuesta rakkaalle Antille ja perheelleni.

Helsingissä 6.11.2013,

Marianna Joensuu

## Sisällysluettelo

1	JOHDANTO .....	6
2	KIRJALLISUUSKATSAUS.....	7
2.1	Mänty ( <i>Pinus sylvestris</i> ) puulajina .....	7
2.2	Männyn laatuun vaikuttavat tekijät .....	8
2.2.1	Rungon laadun määritelmä .....	8
2.2.2	Oksat .....	9
2.2.3	Haaraisuus .....	11
2.2.4	Epäsuoruus ja epäpyöreys .....	11
2.2.5	Haavat, korot ja laho .....	12
2.3	Metsänhoidon vaikutus puuston laatuun .....	13
2.3.1	Laatukasvatus .....	13
2.3.2	Laadun vaikutus pystypuun arvoon .....	14
2.4	Laadun arviointi maastossa .....	15
2.5	Maastolasermittaukset puuston tarkastelussa .....	16
3	AINEISTO JA MENETELMÄT .....	18
3.1	Tutkimusalue ja koepuut .....	18
3.2	Mitatut puutunnukset.....	19
3.3	Maastolaserkeilaus .....	21
3.4	Johdetut puutunnukset .....	22
3.5	Puutunnusten analysointi .....	23
3.6	Laadun ennustaminen .....	24
4	TULOKSET .....	26
4.1	Mitattujen puutunnusten tarkastelu .....	26
4.2	Johdettujen puutunnusten tarkastelu.....	31
4.3	Laadun silmämääräinen tarkastelu .....	33
4.3.1	Maastossa määritetty puuluokka .....	33
4.3.2	Puuluokka TLS-aineistosta arvioituna .....	35
4.4	Puun laadun ennustaminen .....	36
4.4.1	Ennustaminen maastoaineistolla .....	37
4.4.2	Ennustaminen TLS-aineistolla .....	38
4.4.3	Puuluokkien ryhmittely .....	39
5	TULOSTEN TARKASTELU .....	40
5.1	Puutunnusten tarkastelu .....	40
5.1.1	Läpimitta .....	40
5.1.2	Pituus.....	42
5.1.3	Alimman kuivan oksan korkeus.....	42
5.1.4	Alimman tuoreen oksan korkeus.....	43
5.1.5	Johdetut puutunnukset.....	43
5.2	Laadun silmämääräinen arviointi .....	44
5.3	Laadun ennustaminen.....	46
5.4	Virhelähteitä ja muita havaintoja.....	48
5.5	Lisätutkimusaiheita.....	50
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	51
	LÄHTEET .....	53
	LIITTEET .....	58

# 1 JOHDANTO

Puuston laadun tuntemuksella on oleellinen merkitys lopputuotteiden jalostusasteen kehittämisessä, sillä pystypuiden laatuominaisuudet heijastuvat suoraan metsäteollisuuden lopputuotteisiin ja niiden arvoon (Lukkarinen ym. 1998). Nykyisellään metsien suunnittelussa laatuominaisuuksia kuvaavia tietoja ei juuri mitata pystypuista, sillä tarkkoihin puustomittauksiin ei ole resurssi- ja kustannussyistä mahdollisuuksia. Näin ollen puustotiedon sisältö ja laatu eivät täysin vastaa tuotelähtöisen puunhankinnan vaatimuksia.

Entistä tarkemman inventointitiedon avulla voitaisiin parantaa jalostusketjun tehokkuutta ja sen tuottamaa arvoa. Laatutunnusten estimointi leimikolle keskimääräisinä tunnuksina tai puukohtaisesti olisi varsin tärkeää operatiivisen metsäsuunnittelun ja tuotelähtöisyyden kannalta. Perinteisesti puuston laatua on arvioitu silmämääräisesti maastomittauksiin perustuvan kuvioittaisen arvioinnin sekä puukauppojen yhteydessä (Hujo ja Poikela 2008). Laatutunnusten silmämääräinen arviointi pystypuista ei kuitenkaan ole ollut riittävää tai tarpeeksi objektiivista etenkin leimikkosuunnittelun, puunkorjuun, logistiikan tai loppukäyttäjien näkökulmasta (Piira ym. 2007).

Kaukokartoitusmenetelmät tarjoavat nykyisellään mahdollisuuksia tarkkoihin puustotunnusten mittauksiin niin metsikkötasolla kuin yksittäisistä puista. Maastolaserkeilauksen tuottamasta pistepilviaineistosta voidaan mitata hyvällä tarkkuudella puun runkoon liittyviä tunnuksia kuten biomassa ja runkokäyrä, lisäksi se mahdollistaa jopa oksatason tarkastelun (Kankare ym. 2013; Liang ym. 2013; Raunonen ym. 2013). Maastolaserkeilaus voisikin mahdollistaa myös puun laatuun liitettyjen tunnusten arvioinnin ja sitä kautta laatuluokituksen pystypuille. Varsinaisesti puuston laadun arviointiin keskittyviä tutkimuksia kaukokartoituspuolella ei ole toistaiseksi juurikaan tehty.

Tämän pro gradu –tutkimuksen ensimmäisenä päätavoitteena on selvittää, millä tarkkuudella laatutunnuksia pystytään mittaamaan maastolaserkeilausaineistosta manuaalisella tarkastelulla. Tutkimus keskittyy uudistuskypsässä iässä olevien mäntyjen laadun arviointiin, sillä kotimaisista puulajeista kyseisellä lajilla laadun

vaikutus rungon arvoon ja käyttökelpoisuuteen metsäteollisuuden kannalta on merkittävää. Toisena päätavoitteena on selvittää, millä tarkkuudella mäntyrungon laatua pystytään ennustamaan mitattujen ja niistä johdettujen puutunnusten perusteella. Aineistona käytetään maastolaserkeilausdataa sekä maastossa silmämääräisesti määritettyä referenssiaineistoa. Puiden laadun arvioinnissa noudatetaan 11. valtakunnan metsien inventoinnissa käytettyä laatuluokitusta. Saatujen tuloksien tarkkuus selvitetään vertailemalla laserkeilausdatasta irrotettuja laatuluokitukseen liittyviä piirteitä maastoreferenssiin.

Tutkielma koostuu kirjallisuuskatsauksesta sekä varsinaisesta tutkimusosioista. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään mäntyyn ja sen ulkoisesti havaittavissa oleviin laatutekijöihin sekä maastolaserkeilaukseen puuston tarkastelussa. Tutkimusosio on jaoteltu aineiston ja menetelmien esittelyyn, tuloksiin ja niiden tarkasteluun sekä johtopäätöksiin.

## **2 KIRJALLISUUSKATSAUS**

### **2.1 Mänty (*Pinus sylvestris*) puulajina**

Mänty (*Pinus sylvestris*) on havupuusukuun kuuluva puulaji, jonka levinneisyysalue maapallolla kattaa Keski-Euroopan, valtaosan Siperiaa sekä Vähä-Aasian (Kujala 1958). Suomessa sen levinneisyysalue ulottuu aina Etelä-Suomesta Pohjois-Lappiin lukuun ottamatta tunturialueita sekä uloimpia Itämeren luotoja (Fagerstedt ym. 2004). Mänty on Suomen yleisin puulaji. Kaikkiaan mäntyvaltaisten metsiköiden osuus koko Suomen metsäpinta-alasta on 67 % (Parviainen ja Västilä 2011). Puuston tilavuudesta mäntyä on 50 %, eli noin 1150 miljoonaa kuutiometriä (Metsäntutkimuslaitos 2012a).

Mänty on pioneeripuulaji, jonka kasvun edellytyksenä on riittävä valon saanti. Kasvupaikkansa suhteen laji on monipuolinen. Laji viihtyy parhaiten kuivilla ja niukkaravinteisilla hiekka- ja moreenimailla, kivikoissa sekä kallioilla. Toisaalta tuoreilla kasvupaikoilla männyn kasvu ja tuotos on voimakkainta. Suotuisilla kasvupaikoilla mänty kasvaa 15 – 30 m pitkäksi. Hyvä männikkö tuottaa Etelä-

Suomessa keskimäärin 7,5 m<sup>3</sup>/ha/v ja parhaimmillaan jopa 10 m<sup>3</sup>/ha/v (Kujala 1958). Nykyaikaisilla kasvatustekniikoilla lajien päätehakkuuikä vaihtelee Etelä-Suomessa 70-90 vuoden välillä (Fagerstedt ym. 2004, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006). Mänty suositellaan uudistettavaksi, kun sen keskiläpimitta on metsätyypistä riippuen 22-32 cm (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006).

Mänty on sekä saha- että paperiteollisuuden keskeinen raaka-aine. Hakkuumäärä vuonna 2011 oli mäntytukeilla 9,6 miljoonaa kuutiometriä ja mäntykuitupuulla 14,4 miljoonaa kuutiometriä. Männyn runkopuun kokonaispoistuma Suomen metsistä vuonna 2011 oli 28,2 miljoonaa kuutiometriä. (Metsäntutkimuslaitos 2012a)

## **2.2 Männyn laatuun vaikuttavat tekijät**

Puu on luonnonmateriaali, jonka ominaisuudet vaihtelevat saman puulajin eri yksilöiden välillä sekä samassa puussa niin rungon pituussuunnassa kuin ytimeistä pintaan. Perintö- ja ympäristötekijät sekä metsänhoito vaikuttavat puun ominaisuuksiin ja sitä kautta puuraaka-aineen laatuun. Kasvumaaperä, maantieteellinen sijainti pohjois-eteläsuunnassa sekä puuston kasvutiheys ohjaavat kilpailua käytettävissä olevista ravinteista, vedestä ja säteilystä. Nämä tekijät puolestaan määräävät pitkälti sen, minkälaiseksi puun fenotyyppi muodostuu (Kantola ja Pennanen 1999; Väisänen 2006). Luonnontuhot, kuten lumi, myrsky ja kasvinsyöjät voivat vaikuttaa äkillisesti puiden ulkoisiin ja sisäisiin laatuominaisuuksiin (Nykänen ym. 1997; Jalkanen ja Mattila 2000; Jalkanen 2001).

### **2.2.1 Rungon laadun määritelmä**

Pystypuun laatuominaisuudet heijastuvat pitkälti sisäisen puuaineen laatuominaisuuksiin, ja näin ollen ulkoisia laatutekijöitä tarkastelemalla voidaan jossain määrin ennustaa puuaineen laatua. Metsäteollisuuden kannalta oleellisina männyn pystypuun laatutekijöinä pidetään runkomuotoa, kuiva- ja tuoreoksarajoja, oksien kokoa ja niiden määrää eri osissa runkoa (Hujo ja Poikela 2008). Kuivaoksarajan korkeuden ja rinnankorkeusläpimitan on todettu ennustavan parhaiten mäntytukkien laatua (Halinen 1985; Rouvinen ym. 1997). Myös sydänpuun



määrää ja nuoruusvuosien kasvunopeutta pidetään laatutekijöinä, joskin niitä on vaikea arvioida rungon pinnalta (Räsänen ja Lukkarinen 1998).

Teknistä laatua tarkastellessa keskitytään rungon vikoihin, jotka vaikuttavat rungon käyttökelpoisuuteen ja saantoon. Viat ryhmitellään runkovioiksi ja puuaineen vioiksi sen perusteella, onko vika havaittavissa kokonaisvaltaisesti rungossa vai puuaineen sisällä (Kärkkäinen 2007). Runkovikoja ovat mm. lenkous, mutkat sekä epäpyöreys. Puuaineen vikoja puolestaan ovat oksat, laho ja halkeamat. Runkoviat ovat merkittävämpiä saha- ja vaneriteollisuuden kuin kuiduttavan teollisuuden kannalta. Puuaineen viat puolestaan ovat haitallisia kaikissa jalostusmuodoissa. Seuraavaksi tarkastellaan lähemmin vioiksi luokiteltuja tekijöitä.

### **2.2.2 Oksat**

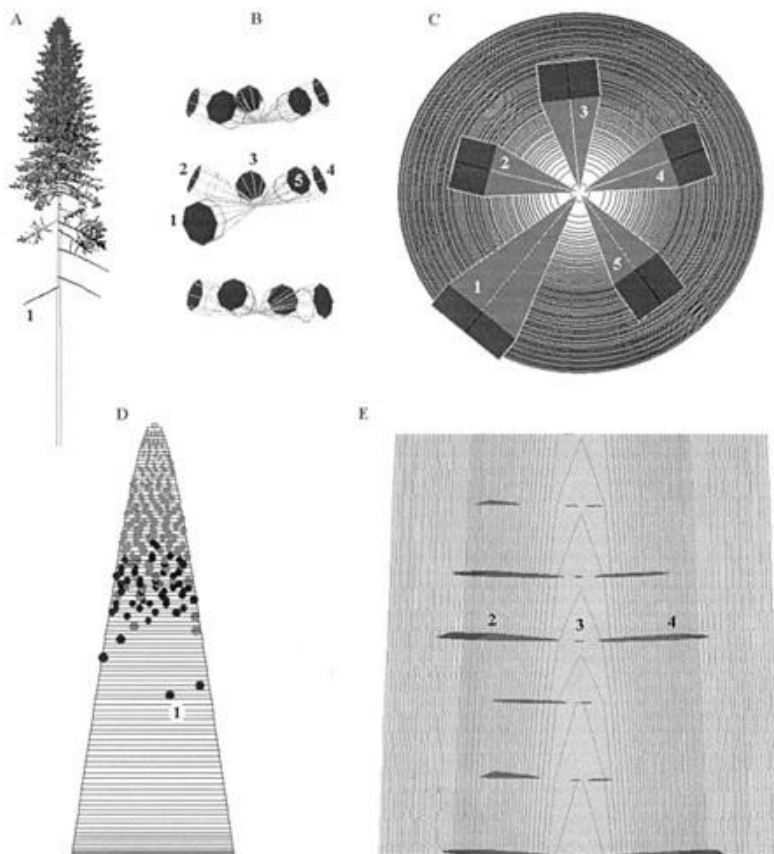
Oksat ovat biologisesti tärkeitä puun osia, sillä ne kannattelevat fotosynteesistä huolehtivia lehtiä. Lisäksi ne kuljettavat vettä ja ravinteita puun sisällä. Oksien anatominen rakenne noudattelee pitkälti runkopuun rakennetta, kuitenkin eri solulajien runsaussuhteet sekä dimensiot saattavat vaihdella huomattavasti näiden välillä (Kärkkäinen 2007).

Oksien ja ympäröivän puuaineen syiden suunta on poikkeuksellinen, mikä voi aiheuttaa ongelmia puun työstössä. Oksat alentavat merkittävästi esimerkiksi sahatavaran mekaanisia lujuusominaisuuksia (Kellomäki 1983). Lisäksi ne voivat aiheuttaa jännityksiä puun kuivatuksessa, mikä näkyy oksien halkeiluna ja irtoamisena (Kärkkäinen 2007). Oksaisuudella tarkoitetaan oksien määrää (lukumäärää, tilavuutta jne.) rungon määräyksikköä (pituus, tilavuus jne.) kohti (Kellomäki 1983). Puun ulkoisista oksista yleisesti puhuttaessa käytetään yleensä selvyuden vuoksi termiä oksikkuus.

Oksien laatu, koko ja sijainti vaikuttavat puuraaka-aineen laatuun ja käyttökelpoisuuteen sahateollisuudessa. Oksaisuutta pidetäänkin valmiin sahatavaran luokituksen tärkeimpänä perusteena; oksien koolle, sijainnille ja määrälle on asetettu tarkat määritelmät, kuinka paljon niitä saa esiintyä valmiissa sahatavarassa (STMY

1994). Etenkin männyllä oksaisuutta pidetään puuaineen laatua merkittävimmin laatua heikentävänä tekijänä (Kantola ja Pennanen 1999; Kellomäki 1983).

Mäntyrunkossa on ensin lähes oksaton tyviosa, sitten kuivaoksainen keskiosa ja tuoreoksainen latvaosa (Kuva 1). Kuivista oksista käytetään myös termiä kuollut oksa ja tuoreista oksista termiä elävä oksa. Oksikkuus riippuu oksien syntytavasta, kasvusta, kuolemisesta ja karsiutumisesta. Näihin vaikuttavat sekä ympäristö- että perintötekijät. Yleisesti ottaen viljavilla kasvupaikoilla puut ovat yleistasoltaan oksikkaampia kuin karuilla paikoilla kasvaneet (Kantola ja Pennanen 1999, Väisänen 2006). Oksikkuuteen on mahdollista vaikuttaa myös metsänhoidollisin toimenpitein, kuten puiden kasvatustiheydellä tai oksien pystykarsinnalla (Metsäntutkimuslaitos 2012b).



**Kuva 1.** Männen simuloitu oksarakenne. Alakuvassa A nähdään rungon tyypillinen oksikkuusrakenne; alimpana on oksaton tyviosa, kuivaoksainen rungonosa alkaa alimmasta kuivasta oksasta (1) ja ylinnä on puolestaan tuoreoksainen latvusosa. Alakuva B ilmentää rungon sisäistä oksaisuusrakennetta, jossa oksa nro 1 on alakuvan A vastaava oksa ja muut numeroidut oksat ovat alakuvassa C näkyviä rungon sisäisiä jo karsiutuneita oksia. Alakuva D esittää kuivien (musta) ja tuoreiden (harmaa) oksien sijaintia rungossa. Alakuva E puolestaan ilmentää oksien 2, 3 ja 4 (alakuva C) esiintymistä valmiissa sahatavarassa. (Kellomäki ym. 1999)

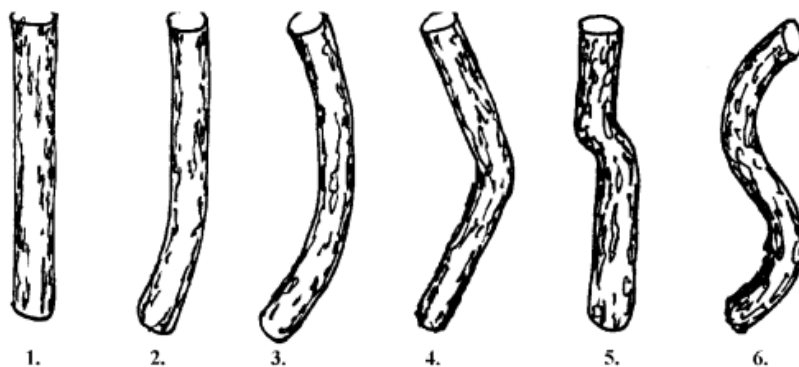
Puun sahauksessa merkittävimpiä käyttökelpoisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat siten oksattoman rungonosan pituus, kuivaoksaisten alueen pituus sekä elävän latvuksen pituus eli latvussuhde. Sahatavaran laadun kannalta merkittävimpiä tekijöitä ovat elävien oksien paksuus ja kuivien oksien koko. Tyvitukin ja välitukin laatua sekä tyvitukista saatavaa parhaan sahatavaralaadun osuutta ennustaa parhaiten kuivaoksaistusrajan korkeus, sillä se indikoi oksien karsiutumisenopeutta ja rungon sisäisen oksan laatua (Halinen 1985; Rouvinen ym. 1997). Pitkä kuivaoksaisten rungonosan pituus sekä paksut kuivat, lahot ja tuoreet oksat ennakoivat huonolaatuista sahatavaraa. Kuitenkin tulee ottaa huomioon, että ulkoisesti kuollut oksa voi olla elävä tukin pintaosassa etenkin elävän latvuksen lähellä (Kantola ja Pennanen 1999).

### **2.2.3 Haaraisuus**

Männyllä oksat kehittyvät kasvukauden lopulla kasvaimen päähän muodostuvista silmuista. Keskellä oleva suurin kärkisilmu muodostaa rungon pääranگان seuraavana kasvukautena. Pienemmistä silmuista kehittyi sivuoksia, joiden päihin puolestaan kehittyi tulevana vuosina vastaava silmurakenne kuin runkopuussakin. Männyllä oksat sijaitsivat oksakiehkuroissa, eikä vuosikasvaimen keskivaiheilla ole oksia kuten esimerkiksi kuusella. Mikäli rungon pääranka katkeaa tai tuoreimman vuosikasvaimen silmut vaurioituvat, päärankaan voi muodostua poikkeamia kuten poikaoksia tai haaroja. Haaraisuus ja poikaoksat hankaloittavat rungon katkontaa ja mahdollisesti vähentävät siitä saatavien tukkien määrää. (Kärkkäinen 2007)

### **2.2.4 Epäsuoruus ja epäpyöreys**

Normaalipuu määritellään suoraksi ja poikkeamia siitä pidetään vikoina. Lenkoudella tarkoitetaan rungon tasaista käyryyttä kun taas mutkilla epätasaista käyryyttä (Kuva 2). Lenkoutta voi olla pelkästään tyvessä tai tasaisesti koko rungon pituudella. Kaksoislengoissa rungoissa runko on ensin lenko toiseen suuntaan ja sen jälkeen vastakkaiseen suuntaan.



**Kuva 2. Epäsuoruuden muodot. 1 suora tukki, 2 tyvilenko tukki, 3 tasalenko tukki, 4 polvinen tukki, 5 kaksoispolvinen tukki ja 6 kaksoislenko tukki. (Gjerdrum ym. 2001)**

Rungon suoruteen vaikuttavat tekijät ovat tärkeämpiä puun nuoruusvaiheessa, minkä voi päätellä siitä, että männyn tyvitukit ovat keskimäärin lengompia kuin latvatukit (Kärkkäinen 1980). Epäsuoruudelle altistavia tekijöitä on useita. Alhainen runkoluku taimikkovaiheessa altistaa männyn kallistumiselle, mikä voi aiheuttaa tyvimutkaisuutta. Geneettiset tekijät sekä versosurma, hirvieläimet, tervasroso, ja abioottiset tekijät kuten tuuli, lumi, pakkanen ja maaperätekijät voivat myös vaikuttaa rungon suoruteen (Nevalainen 1999).

Epäsuoruus aiheuttaa ongelmia katkonnassa ja sahauksessa. Lenkoutta sallitaan sahateollisuudessa yleensä maksimissaan 1 cm/m (STMY 1994). Lenkous heikentää (eli nostaa) raaka-aineen käyttösuhdetta, sillä muotovikaisia kuorellisia tukkeja tarvitaan enemmän yhden sahatavarakuution valmistamiseen.

Epäpyöreydellä tarkoitetaan rungon poikkileikkauksen poikkeamista ympyrän muodosta. Epäpyöreys kehittyy usein haavoista, pahkoista, reaktiipuusta tai oksista. Männyllä epäpyöreudeksi on keskimäärin saatu 5 – 6 % läpimitasta (Kärkkäinen 1984). Epäpyöreys vähenee tyvestä latvaan päin ja kasvaa puun iän myötä.

### **2.2.5 Haavat, korot ja laho**

Haavoilla ja koroilla tarkoitetaan rungon kyljessä olevia muodostumia, jotka johtuvat jällen paikallisesta poistumisesta, kuolemista ja toimintakyvyttömyydestä. Rungon

pintaviat ovat seurausta esimerkiksi erilaisista vaurioista, kulon jäljistä, eläinten syömäkuvioista, versosurmasta tai muista sienitaudeista (Kärkkäinen 2007).

Haavan syntymisen jälkeen vahingoittumaton jälsi alkaa muodostaa haavasolukkoa, joka vähitellen peittää haavan muodostaen ensin niin kutsutun avokoron ja myöhemmin umpikoron. Männyllä kyljestyminen kestää pitkään. Haavat muodostavat bakteereille ja sienille väylän puuaineeseen, minkä seurauksena puuaineeseen voi syntyä lahoa tai värivikoja. Korot ovat melko yleisiä ja merkittäviä vikoja metsäteollisuuden kannalta. Erityisesti rungon oksattomassa osassa olevat korot ovat merkittäviä sahateollisuuden kannalta, sillä ne lyhentävät sahatavaraa ja voivat vaikuttaa sen laatuluokituksessa. Kyljestymisen seurauksena kuorta jää usein haavan umpeuduttua puuaineen sisään, mikä aiheuttaa ongelmia selluteollisuudessa. (Kärkkäinen 2007)

Laholla tarkoitetaan lahottajasienen fysikaalisesti tai kemiallisesti muuttamaa puuta. Lahottajasienet jaotellaan rusko-, valko- ja katkolahottajiin sekä sinertymäsieniin (Kärkkäinen 2007). Lahottajasienet voivat levitä elävään puuhun esimerkiksi maaperän, kuoren tai vahingoittuneen kohdan kautta. Lahottajasienet vaikuttavat muun muassa puuaineen pilkkoutumiseen, huokoisuuden kasvuun, mekaanisten lujuusominaisuuksien heikkenemiseen ja puuaineen värimuutoksiin. Nämä kaikki aiheuttavat ongelmia jatkojalostuksessa.

## **2.3 Metsänhoidon vaikutus puuston laatuun**

### **2.3.1 Laatukasvatus**

Mäntymetsiköiden kasvatuksessa pyritään yleensä hyvälaatuisen sahapuun tuottamiseen. Suomessa metsien luontaiset edellytykset sopivat laatukasvatukseen puiden hitaan kasvun sekä monipuolisten metsäalueiden puolesta. Laatupuun tuottaminen vaatii pitkän kasvatusajan, toisaalta tämä lisää kasvatusriskien ja kiertoajan aikaisten investointien määrää metsänhoidossa.

Laatukasvatuksessa tasapainotellaan erityisesti puuston tiheydellä, jotta puustosta saadaan mahdollisimman oksatonta ja järeää. Laatupuun kasvatuksessa noudatetaan

hyvän metsänhoidon suosituksia (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006). Erityisesti männyllä riittävä taimikkotiheys, oikea-aikaiset laatuharvennukset, oikeaoppinen pystykarsinta, mahdolliset kasvatuslannoitukset sekä päätehakkuun ajoittaminen ovat perusedellytyksiä laadukkaan puun tuottamiseen (Metsäntutkimuslaitos 2012b).

Männyn laatukasvatusta pidetään erityisesti vähemmän rehevien kasvupaikkojen asiana. Viljavilla kasvupaikoilla kasvavat mäntyrungot saattavat olla teknisesti heikkolaatuisia, paksuoksaisia ja tyviosaltaan lenkoja (Kantola ja Pennanen 1999).

### **2.3.2 Laadun vaikutus pystypuun arvoon**

Laadukas puuraaka-aine on perusedellytys metsäalan kannattavuudelle ja puutuotealan menestymiselle Suomessa. Metsän tuotto määräytyy sekä puun määrän että laadun mukaan (Metsäntutkimuslaitos 2012b). Hujon ja Poikelan (2008) mukaan puutavaralajien (tukki- ja kuitupuun) laadulla on ratkaiseva merkitys puukaupan kokonaisarvoon. Erityisesti männyllä laadun vaikutus käyttökelpoisuuteen teollisuudessa ja rungon kokonaisarvoon on merkittävää.

Metsänomistajalle laatupuun kasvattaminen on kannattavaa silloin, kun kasvatusmalleja sovelletaan oikein, laatuutukille on kysyntää ja siitä saa jalostusarvon mukaisen hinnan. Nykyisellään laadun vaikutus puusta maksettavaan hintaan on liian vähäistä motivoimaan puuntuottajia laatukasvatukseen. (Metsäntutkimuslaitos 2012b)

Suomessa puukauppa perustuu useimmiten tavaralajikohtaiseen yksikköhinnointeluun (€/m<sup>3</sup>). Tavaralajihinnointelu ei yleisyydestään huolimatta ole välttämättä optimaalisin hinnoittelumenetelmä, sillä se ei kannusta järeän ja laadukkaan puuraaka-aineen kasvattamiseen. Malisen ym. (2010) mukaan puun myyjän saaman myyntiarvon ja puun ostajan puuraaka-aineestaan saaman jalostusarvon maksimoivan hinnoittelun perustana olisi runkohinnoittelu tai matriisihinnoittelu, joissa puulajikohtaisesti erilaatuisille rungoille tai tukeille olisi läpimitta- ja pituusluokittaiset hinnat.

Puukaupan hinnoittelutekijät neuvotellaan jokaista kauppaa koskien erikseen myyjän ja ostajan välillä. Leimikko hinnoitellaan puukauppojen teossa usein silmämääräisen arvion perusteella tekemättä tarkempia puustomittauksia. Laatu- ja mittamääritelmässä on huomattavasti eroja eri yritysten ja puunjalostajien kesken (Hujo ja Poikela 2008). Puuston yleislaadun ohella suhdannevaihtelut, leimikon sijainti, kuljetusmahdollisuudet ja maaston ominaisuudet vaikuttavat leimikon hinnoitteluun. Mitä suurempi puutarve on, sitä enemmän laatumääritelmistä voidaan joustaa (Kaskinen 2012).

## **2.4 Laadun arviointi maastossa**

Pystypuiden ulkoisia laatuominaisuuksia arvioidaan nykyisin pääsääntöisesti silmämääräisesti metsäsuunnitelman ja puukauppojen teon yhteydessä. Tarkkoihin mittauksiin perustuvan objektiivisen tiedon puute vaikeuttaa puutavaralajikertymien ennustamista ennen hakkuuta, mikä taas tuo haasteita leimikon myyntiarvon ja hakattavan puutavaran jalostusarvon ennakoarviointiin (Piira ym. 2007).

Apteerauksella tarkoitetaan rungon puutavaralajien erottelua ja katkaisukohtien valintaa ottamalla huomioon tukin laatu- ja mittavaatimukset. Apteerauksessa ja tukkien katkonnassa pyritään eriyttämään rungosta halutut laadut ja säilyttämään mahdollisimman yhtenäinen laatu tukin koko pituudelta (Räsänen ja Lukkarinen 1998). Apteeraus voidaan suorittaa sekä kaadettuihin runkoihin että silmämääräisesti pystypuihin. Maastotyössä silmämääräisesti apteerattavat rungot jaetaan laatuosiin, joilla ei yleensä ole pituusrajoituksia. Varsinaiset katkontasuunnitelmat tehdään tietokoneohjelmilla.

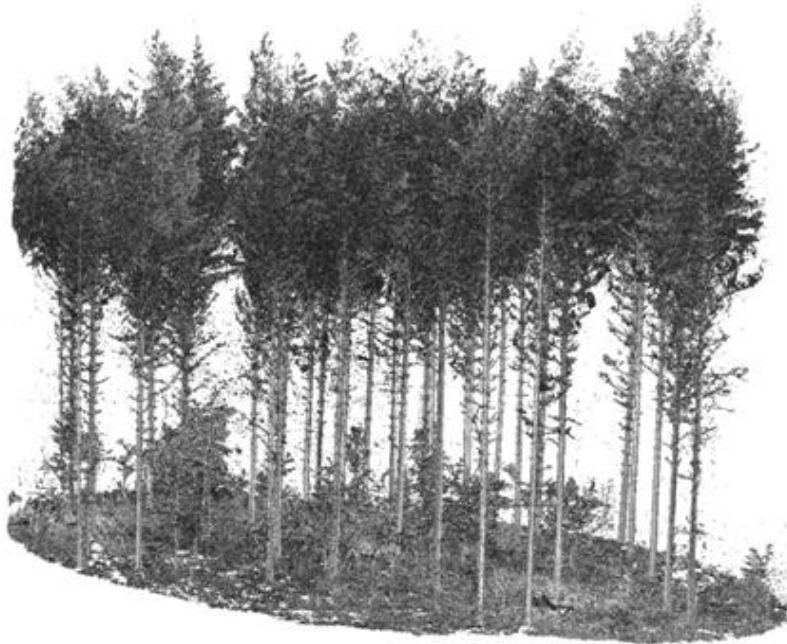
Runkojen jaottelu oksattomaan, kuivaoksaiseen ja eläväoksaiseen rungonosaan tehdään pääsääntöisesti havaitun oksikkuuden ja sallittujen dimensioiden perusteella. Korkeuksia alimpaan kuivaan oksaan ja elävän latvuksen alarajaan pidetään tärkeimpinä laatuosituksen perusteina (Räsänen ja Lukkarinen 1998). Silmämääräisessä laatuosituksessa tukit jaetaan kolmeen luokkaan, jotka ovat oksaton 1-laatu (yleensä tyvitukki), eläväoksaainen 2-laatu (yleensä latvatukki) ja kuivaoksaainen 3-laatu (yleensä välitukki tai tyvi). Eri laatuluokille on määritelty hyväksyttävät vikaisuudet ja niiden suurimmat sallitut koot. Rungon kokonaislaatua

puolestaan kuvataan puuluokkien avulla, joissa on otettu huomioon edellä mainittujen laatuositteiden esiintyminen rungossa (Valtakunnan metsien...2009).

## 2.5 Maastolasermittaukset puuston tarkastelussa

Kaukokartoituksessa hankitaan tietoa tutkittavasta kohteesta koskematta itse kohteeseen. Metsiin liittyvää tietoa voidaan inventoida kaukokartoituksen avulla aina yksittäisten puiden tasolta valtakunnan metsien tasolle. Kaukokartoitusmenetelmiä ovat lentolaserkeilaus (Airborne Laser Scanning, ALS), maastolaserkeilaus (Terrestrial Laser Scanning, TLS), mobiililaserkeilaus (Mobile Laser Scanning, MLS) sekä korkean resoluution ilmakehän aineistojen hankinta. Kaukokartoitustiedon hankinta kattaa yleensä maastoreferenssin keräämisen, tietojen tallennuksen ja siirron, esikäsittelyn, tulkinnan ja esittämisen.

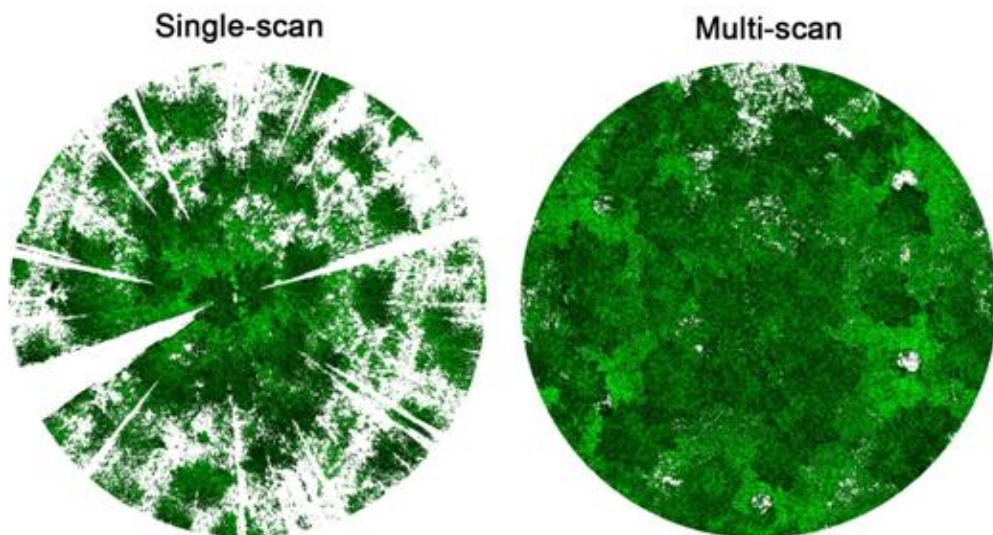
Maastolaserkeilauksella voidaan tuottaa paikkaan sidottu kolmiulotteinen kuvaus ympäristöstä (Kuva 3). Maastolaserkeilain on aktiiviseen kaukokartoitukseen tarkoitettu väline, joka mittaa ympäristöstään kohteiden kolmiulotteiset koordinaatit suunnattua laseretäisyysmittausta käyttäen (Holopainen ym. 2013).



**Kuva 3. Maastolaserkeilauksella tuotettu 3D-pistepilvi männiköstä. Kuva Ville Kankare**



Maastolaserkeilauksen tuloksena saadaan tiheä x,y,z -koordinaatiston pistepilvi, joka on mahdollista sitoa paikkaan satelliittipaikannuksen (Global Positioning System, GPS) avulla. Metsikkökoealan maastolaserkeilaus toteutetaan joko yhtenä keilauksena koealan keskipisteestä (Liang ym. 2011) tai useampana keilauksena eri puolilta koealaa (Vastaranta ym. 2009; Henning ja Randtke 2006; Liang ja Hyyppä 2013). Yhdestä pisteestä tehdyn keilauksen etuina ovat nopeus ja pistemäärän suhteellinen pienuus. Haasteita asettavat katvealueet, joita syntyy lasersäteen läpäisemättömien kohteiden kuten puunrunkojen tai oksien taakse (Kuva 4). Lisäksi pistepilven tiheys on riippuvainen kohteen etäisyydestä keilaimeen. Aineiston resoluutio voi vaihdella esimerkiksi 5 mm ja 6,3 mm välillä kymmenen metrin etäisyydellä keilaimesta (Moskal ja Zheng 2011, Kankare ym. 2013). Yhdistämällä eri puolilta koealaa tehtyjä keilausaineistoja voidaan välttyä katvealueilta ja pistetiheyden aiheuttamilta ongelmilta sekä samalla parantaa mallinnustarkkuutta. Tällöin toisaalta aineiston esiprosessointiin kuluu enemmän aikaa.



**Kuva 4.** Yhdellä keilauksella (single-scan) tuotettu ja useammasta keilauksesta (multi-scan) yhdistetty pistepilvi metsikkökoealalta ylhäältä päin katsottuna. Runkojen ja alikasvoksen taakseen jättämät katvealueet näkyvät kuvissa valkoisina alueina. Kuva: Ville Kankare.

Maastolaserkeilausta käytetään aluepohjaiseen ja koealakohtaiseen yksittäisten puiden mittaukseen ja mallinnukseen sekä referenssiaineiston tuottamiseen lentolaserkeilaukselle. Puukohtainen maastolaserkeilaus edellyttää maastolaserkeilaimen viemistä mitattavalle kohteelle. Maastolaserkeilausaineiston

tarkkuuksien arvoitua varten kerätään yleensä maastoreferenssiaineisto, joskin maastoreferenssi voidaan hankkia myös suoraan TLS-aineistosta. Näin ollen TLS:n yksi potentiaalinen sovellus onkin, että perinteisiä aikaavieviä maastokoealamittauksia voitaisiin korvata TLS-mittauksilla. Kaukokartoitusaineistoa voidaan tulkita joko silmämääräisesti tai numeerisin menetelmin. Silmävaraisilla menetelmillä saadut tulokset vaihtelevat tulkitsijoittain, mikä aiheuttaa jossain määrin epävarmuustekijöitä. Numeerisia tulkintamenetelmiä käyttämällä subjektiivista vaihtelua ei synny. (Holopainen ym. 2013)

Maastolaserkeilaus sopii hyvin yksittäisen puun ominaisuuksia kuvaavien tunnusten tarkasteluun. TLS-aineistosta voidaan esimerkiksi mitata runkokäyrä ja biomassa hyvällä tarkkuudella (Kankare ym. 2013; Liang ym. 2013). Lisäksi runkolukusarjan ja puutavaralajien ennustus onnistuu hyvin TLS-aineistosta (Vauhkonen ym. 2013). Rungon laadun arvioinnin osalta tutkimuksia ei olla kuitenkaan juurikaan tehty vielä.

## **3 AINEISTO JA MENETELMÄT**

### **3.1 Tutkimusalue ja koepuut**

Tutkimuksen ensimmäisenä päätavoitteena oli selvittää, millä tarkkuudella maastolaserkeilausaineistosta voidaan mitata männyn ulkoisia tunnuspiirteitä, jotka ennakoivat puuaineen sisäistä laatua. Tutkimuksen aineisto kerättiin kesällä 2012 Metsähallituksen mailta, Evon ammattikorkeakoulun opetusmetsästä (61.19°N, 25.11°E), päätehakkuikaiselta leimikolta. Mäntyvaltainen mustikkatyypin leimikko oli iältään noin 75 vuotta ja sen aiempiin metsänhoidollisiin toimenpiteisiin ovat kuuluneet muun muassa harvennushakkuut sekä lannoitukset kahteen eri otteeseen. Pääpuulaji oli mänty, mutta paikoitellen leimikon sisällä kasvoi voimakas alikasvoskuusikko. Leimikko oli kooltaan noin 2,5 hehtaaria ja se sijaitsi loivassa pohjoisrinteessä.

Leimikolta valittiin koepuiksi satunnaisesti 91 tukkikokoista mäntyä (*Pinus sylvestris*), jotka numeroitiin maastoreferenssin ja TLS-aineiston yhdistämisen avuksi (Kuva 5). Koepuista mitattiin rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta, pituus,

alimman tuoreen ja kuivan oksan korkeudet sekä määritettiin rungon yleislaatua kuvaava puuluokka.



Kuva 5. Mäntyleimikko ja koepuiden merkintätapa.

### 3.2 Mitatut puutunnukset

Maastossa tehtyjen mittausten perusteena noudatettiin 11. valtakunnan metsien inventoinnissa käytettyä maasto-ohjetta puuston yleistunnusten mittausten sekä laatuluokituksen osalta (Valtakunnan metsien...2009).

**Pituus (h)** mitattiin maanpinnan tasosta latvan korkeimpaan kohtaan ja kirjattiin metreinä (m). Jos rungossa oli tapahtunut ranganvaihto, uusi latva määräsi puun pituuden. Pituus mitattiin Vertex-korkeusmittarilla, joka ilmaisee pituuden 10 cm tarkkuudella. Mittausetäisyyden rungosta tuli olla vähintään sama kuin puun pituus. Maanpinnan taso määritettiin puun syntypisteeksi. Jos syntypiste oli maanpinnan tasoa korkeammalla (kontteikot ja kiven päällä kasvaneet puut), pituus mitattiin syntypisteestä.

**Rinnankorkeusläpimitta ( $d_{1,3}$ )** mitattiin mittasaksilla 1,3 m korkeudelta millimetrin tarkkuudella. Rinnankorkeusläpimitta määritettiin keskiarvona toisiaan kohtisuoraan olevista suunnista mitatuista läpimitta-arvoista. Tällä pyrittiin tarkastelemaan rungon mahdollista epäpyöreyttä. Läpimitta mitattiin kuorellisena ja mikäli kuori puuttui,

sen paksuus arvioitiin ja lisättiin mitattuun läpimittaan. Rinnankorkeus määritettiin maanpinnan tasolta tai puun syntypisteestä, mikäli puu kasvoi esimerkiksi kiven päällä. Mittaussuunta oli satunnainen.

**Yläläpimitta ( $d_6$ )** mitattiin kaulaimen avulla kuuden metrin korkeudelta senttimetrin tarkkuudella.

**Kuivaoksaisuusraja (ak)** mitattiin alimman, vähintään 15 mm paksuisen kuivan oksan, lahon oksantygän, oksanreiän tai oksakryhmyksen korkeudelta. Muuttuja ilmentää sahaustulokseen vaikuttavan kuivaoksaisuuden alarajaa, eikä siis välttämättä alimman kuivan oksan korkeutta. Yksittäinen kuiva oksa muuten oksattomassa rungossa ei siten välttämättä aiheuttanut merkintää. Mikäli kuivaoksaisuusraja ei havaittu tai se oli ylempänä kuin elävän latvuksen alaraja, kirjattiin kuivaoksaisuudeksi ”e”. Tunnus mitattiin Vertexillä ja mittayksikkönä käytettiin metriä.

**Elävän latvuksen alaraja (at)** mitattiin alimman tuoreen oksan mukaan. Latvusrajan mittauksessa ei otettu huomioon vähintään kahden kuivan oksakiehkuran erottamia tuoreita oksia. Elävän latvuksen alaraja kirjattiin metreinä.

Silmämääräisen laatuluokituksen perustana noudatettiin valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI11) käytettäviä rungon teknillistä yleislaatua ilmentäviä puuluokkia mitta- ja laatuvaatimuksineen (Liitteet 1 – 5). **Puuluokat** määritettiin seuraavasti: **(5)** Hyvä tukkipuu. Puu sisältää laatuluokkaa 1 (oksaton tyvitukki) olevan tukin ja tukkikokoisesta rungonosasta vähintään 80 % on tukkia. **(6)** Vikainen hyvä tukkipuu. Puu sisältää laatuluokkaa 1 olevan tukin, mutta tukkikokoisesta rungon osasta alle 80 % on tukkia. **(7)** Tukkipuu. Puun tukkikokoisesta osasta vähintään 80 % on tukkia. Puu ei sisällä laatuluokkaa 1 olevaa osaa. **(8)** Vikainen tukkipuu. Puun tukkikokoisesta osasta on alle 80 % tukkia. Puu ei sisällä laatuluokkaa 1 olevaa osaa. **(9)** Iso kuitupuu. Puu on tukkikokoinen, mutta vikojen tai teknisen laadun vuoksi ainakin toistaiseksi kuitupuu.

Eri puuluokille on määritelty rungossa esiintyvien vikojen suurimmat sallitut koot. Luokituksessa on otettu huomioon muun muassa kuivaoksaisuusraja, oksien koko ja laatu, korojen ja muiden runkovaurioiden sijainnit ja pituudet sekä rungon lenkous, mutkat ja haaraisuus. Kannonkorkeudeksi määriteltiin 10 cm, eli tullakseen luokitelluksi 5 tai 6 luokkaan, oksattoman ja muutenkin viattoman osuuden pituuden tuli olla vähintään 4,1 m.

### 3.3 Maastolaserkeilaus

Maastolaserkeilausaineisto hankittiin käyttäen Leican HDS6100 maastolaserkeilainta (Kuva 6). Laitteen mittausetäisyys on enimmillään 79 m ja katselukulma  $360^{\circ} \times 310^{\circ}$ . Etäisyysmittauksen tarkkuus 25 m säteellä on  $\pm 2$  mm. Pistepilven tiheys 10 m etäisyydellä keilauspisteestä on 6,3 mm (Leica Geosystem AG, Heerbrugg, Sveitsi). Leimikko keilattiin 45 eri keilauspisteestä.



**Kuva 6. Leimikon maastolaserkeilaus toteutettiin Leica HDS6100 keilaimella. Kuva: Ville Kankare.**

Tarkasteltavat puut irroitettiin pistepilvestä manuaalisesti 3D-rajauksella. Tutkimuksessa tarkasteltujen puiden pisteaineistot koostuivat yhdestä keilaussuunnasta saaduista pistehavainnoista. Pistepilven tarkasteluun käytettiin TerraScan käyttöjärjestelmää.

Puustotunnusten mittaukset suoritettiin manuaalisella tarkastelulla. Pistepilvestä mitattiin runkokohtaisesti samat tunnuksset kuin maastomittauksessa, eli puun pituus (h), rinnankorkeusläpimitta ( $d_{1,3}$ ), yläläpimitta ( $d_6$ ), elävän latvuksen alaraja (at) sekä kuivaoksaisuusraja (ak). Lisäksi tehtiin silmämääräisiä arvioita rungon vioista, kuten lenkoudesta, mutkista ja koroista. Edellä mainittujen tekijöiden perusteella arvioitiin puuluokka rungolle.

### 3.4 Johdetut puutunnukset

Sekä maastossa että maastolaserkeilausaineistosta määritetyistä tunnuksista johdettiin lisäksi muita puutunnuksia, joita voitaisiin käyttää apuna laadun ennustuksen tarkentamisessa (kts. 3.6 Laadun ennustaminen). Näitä olivat rungon tilavuus, latvussuhde, oksattoman ja kuivaoksaisten osan pituus suhteessa puun pituuteen sekä muotoluku.

**Tilavuus (v)** laskettiin Laasasenahon (1982) tilavuusmallien avulla, joissa selittävinä muuttujina käytettiin rinnankorkeusläpimittaa ( $d_{1,3}$ ), yläläpimittaa ( $d_6$ ) ja puun pituutta (h). Tilavuus laskettiin käyttäen selittäjinä sekä yhtä että kahta läpimittaa. Yhtälöt ovat laadittu kuorellisen tilavuuden laskentaa varten.

**Männyn tilavuusyhtälö 1 (v1)** (Kaava 1), selittävinä muuttujina

rinnankorkeusläpimitta ja puun pituus,  $v [\text{dm}^3] = f(d_{1,3} [\text{cm}], h [\text{m}])$  suhteellinen hajonta  $s_r = 7,1 \%$ :

$$v1 = 0,036089 \times (d_{1,3})^{2,01395} \times (0,99676)^2 \times h^{2,07025} \times (h - 1,3)^{-1,07209} \quad (1)$$

**Männyn tilavuusyhtälö 2 (v2)** (Kaava 2), selittävinä muuttujina

rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta ja puun pituus,  $v [\text{dm}^3] = f(d_{1,3} [\text{cm}], d_6 [\text{cm}], h [\text{m}])$  suhteellinen hajonta  $s_r = 3,5 \%$ :

$$v2 = 0,2686 \times (d_{1,3})^2 - 0,01455 \times (d_{1,3})^2 \times h - 0,00004786 \times (d_{1,3})^3 \times h + 0,0003341 \times (d_{1,3})^2 \times (h)^2 + 0,09731 \times ((d_{1,3})^2 + d_{1,3} \times d_6 + (d_6)^2) + 0,04407 \times (d_6)^2 \times (h - 6) \quad (2)$$

**Latvussuhde (ls)** määritettiin laskemalla latvusosan suhde koko puun pituuteen. Latvussuhde laskettiin kaavalla  $(h - at) / h \times 100 \%$ .

**Kuivaoksaisten rungonosan suhde puun pituuteen (ks)** määritettiin kaavalla  $(at - ak) / h \times 100 \%$ , missä at on alimman tuoreen oksan korkeus, ak alimman kuivan oksan korkeus ja h puun pituus.

**Oksattoman osan pituus suhteessa puun pituuteen (os)** määritettiin kaavalla  $ak / h \times 100 \%$ , missä ak on alimman kuivan oksan korkeus ja h pituus.

Puun **muotoluvulla (f)** kuvataan rungon tilavuuden poikkeavuutta lieriön tilavuudesta, jonka halkaisija on yhtä suuri kuin rungon läpimitta tietyllä korkeudella ja korkeus on yhtä suuri kuin puun pituus (Korpela 1997). Muotoluku ottaa siten huomioon rungon kapenemisen. Muotoluku vaihtelee 0,45 – 0,55 välillä, mitä nopeammin runko kapenee, sitä pienemmän arvon muotoluku saa. Muotoluku laskettiin kaavalla 3,

$$f = \frac{v1}{g \times h}, \quad (3)$$

missä v1 on tilavuus (Kaava 1), g on rungon laskennallinen pohjapinta-ala rinnankorkeudella  $g = \frac{\pi}{4} \times (d_{1.3})^2$  ja h rungon pituus.

### 3.5 Puutunnusten analysointi

Tulosten tilastolliseen analysointiin käytettiin Microsoft Exceliä sekä R-ohjelmistoa. Sekä maasto- että maastolaserkeilausaineistosta saaduille mittaustunnuksille laskettiin yleisesti leimikkoa kuvaavat tilastolliset tunnuksat, eli minimiarvo, maksimiarvo, keskiarvo sekä keskihajonta. Lisäksi määritettiin rinnankorkeusläpimittaan perustuvat runkolukusarjat ja puuluokkien frekvenssit eri menetelmille.

Eri menetelmiä vertailtiin keskenään. Tulosten hyvyyden ja luotettavuuden arviointiin käytettiin tunnuksia RMSE (root-mean-square error, keskineliövirheen

neliöjuuri) ja harha (bias), jotka kuvaavat tarkasteltujen tunnusten keskimääräistä virhettä ja mahdollisen systemaattisen virheen suuntaa ja voimakkuutta. Tunnukset laskettiin kaavoilla 4 ja 5:

$$RMSE (absoluuttinen) = \sqrt{\frac{\Sigma (\text{mitattu arvo} - \text{ennustettu arvo})^2}{\text{koepuiden lukumäärä}}} \quad (4)$$

$$Harha (absoluuttinen) = \frac{\Sigma (\text{mitattu arvo} - \text{ennustettu arvo})}{\text{koepuiden lukumäärä}} \quad (5)$$

Kaavoissa mitattu arvo kuvaa estimoitua arvoa ja ennustettu arvo puolestaan referenssiaineiston arvoa. RMSE ja harha esitettiin myös suhteellisella asteikolla (%), jolloin laskennassa käytettiin kaavoja 6 ja 7:

$$RMSE (suhteellinen) = \frac{RMSE (absoluuttinen)}{\text{maastoreferenssin keskiarvo}} \times 100 \% \quad (6)$$

$$Harha (suhteellinen) = \frac{Harha (absoluuttinen)}{\text{maastoreferenssin keskiarvo}} \times 100 \% \quad (7)$$

### 3.6 Laadun ennustaminen

Tutkimuksen toisena päätavoitteena oli tarkastella, millä tarkkuudella maastolaserkeilausaineistosta mitatuista ja niistä johdetuista puutunnuksista voidaan ennustaa rungolle maastossa silmämääräisesti määritettyä puuluokkaa.

Laadun ennustamisessa käytettiin lähimmän naapurin (nn, nearest neighbour) menetelmää, jossa maastossa arvioitu puuluokka oli selitettävänä tunnuksena (y-arvo) ja maastolaserkeilausaineiston puutunnukset selittävinä tunnuksina (x-arvot). Vertailun vuoksi ennustus suoritettiin myös maastoaineiston puutunnusten perusteella.



Lähimpien naapureiden etsintään käytettiin Breimanin (2001) kehittämää Random Forest –menetelmää (RF), joka soveltuu metsätunnusten arviointiin vakautensa ja joustavuutensa perusteella. RF-algoritmi muodostaa luokittelu- tai ennustussääntöjä usean regressiopuun joukon perusteella. Regressiopuu on sarja sääntöjä, joka jakaa pիրreavaruuden osioita, joilla on sama vastemuuttuja. Satunnaista osaa (2/3) regressiopuiden joukosta käytetään opetusaineistona, ja loppuosaa (1/3) puolestaan jokaisen puun testaamista varten. Regressiopuiden lukumäärää kasvattamalla voidaan saavuttaa lisää konsistenssia. Lähimmän naapurin löytyminen RF-menetelmällä perustuu todennäköisyshavaintoihin päätyä luokituksessa samaan solmuun (Vastaranta ym. 2013; Falkowski ym. 2010). Yleisesti ottaen vakaan tuloksen saavuttamiseksi metsämuuttujien ennustuksessa käytetään kahdesta seitsemään k-arvoa vaikka harha olisikin pienin käytettäessä yhtä k-arvoa (Vastaranta ym. 2013). Luokituksen satunnaisuutta voidaan vähentää suorittamalla RF-ajo kymmeniä kertoja, jolloin lopullinen luokittelutulos on näiden ajojen keskiarvo.

Luokituksen satunnaisuutta tarkasteltiin myös Cohenin kappa-arvon perusteella. Kyseessä on tilastollinen mitta, joka määrittää luokituksen tarkkuuden eroavaisuuden satunnaisesta tuloksesta. Kappa-arvo laskettiin kaavalla 8:

$$\kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}, \quad (8)$$

missä  $P_0$  on samoin luokiteltujen osuus koko otoksesta ja  $P_e$  suhdeluku siitä, kuinka moni yhtäläinen luokittelu johtuu sattumasta. Kappa-arvo vaihtelee välillä 0–1. Esimerkiksi kappa 0,8 merkitsee tuloksen olevan 80 % parempi kuin täysin satunnainen luokittelu. Yhtäpitävyyden voimakkuuden tulkitsemiseksi noudatettiin seuraavia sääntöjä (Landis ja Koch 1977) (Taulukko 1):

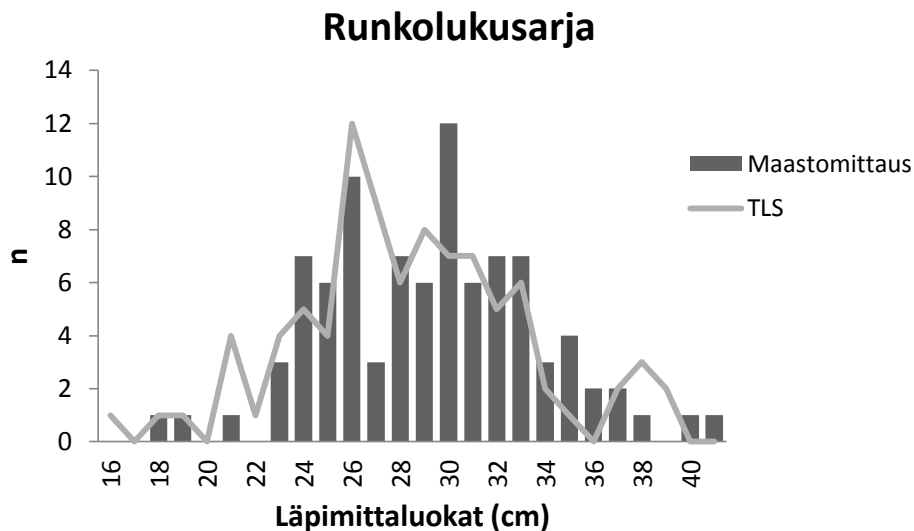
**Taulukko 1. Cohenin kappa-arvon yhtäpitävyyden voimakkuus.**

K	yhtäpitävyyden voimakkuus
0,00 - 0,20	"olematon"
0,21 - 0,40	"heikko"
0,41 - 0,60	"kohtalainen"
0,61 - 0,80	"hyvä"
0,81 - 1,00	"erittäin hyvä"

## 4 TULOKSET

### 4.1 Mitattujen puutunnusten tarkastelu

Maastossa ja maastolaserkeilausaineistosta mitattuja tukkikokoisia mäntyjä oli 91 kappaletta. Tukkikokoisuuden määritelmänä on, että neljän metrin korkeudella puun läpimitta on vähintään 15 cm (Valtakunnan metsien...2009). Maastomittausten perusteella määritelmä toteutui kaikkien runkojen kohdalla. Maastolaserkeilausaineiston perusteella puolestaan yksi runko alitti määritelmän vaatimukset ottaen huomioon rungon kapenemisen rinnankorkeudelta neljän metrin korkeuteen (Kuva 7).



**Kuva 7. Koepuiden runkolukusarja maastomittausten (palkit) ja TLS-mittausten (viiva) perusteella.**

Maastossa mitattuja puutunnuksia olivat puun pituus (h), rinnankorkeusläpimitta ( $d_{1,3}$ ), yläläpimitta ( $d_6$ ), alimman tuoreen oksan korkeus (at) sekä alimman kuivan oksan korkeus (ak). Leimikon keskimääräiset puutunnukset eri mittausten menetelmillä laskettuna on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Maastossa ja TLS-aineistosta mitattujen puutunnusten keskiarvot (Ka), keskihajonnat (Kh), minimiarvot (Min) ja maksimi-arvot (Max), n = 91. Taulukossa h on puun pituus metreinä, d<sub>1,3</sub> rinnankorkeusläpimitta senttimetreinä, d<sub>6</sub> yläläpimitta senttimetreinä, at alimman tuoreen oksan korkeus metreinä ja ak alimman kuivan oksan korkeus metreinä.

<b>Muuttuja</b>		<b>Ka</b>	<b>Kh</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>h (m)</b>	Maastoaineisto	24,79	1,40	22,1	28,3
	TLS-aineisto	23,26	1,32	18,4	26,4
<b>d<sub>1,3</sub> (cm)</b>	Maastoaineisto	29,73	4,41	18,3	41,0
	TLS-aineisto	28,98	4,70	16,0	40,7
<b>d<sub>6</sub> (cm)</b>	Maastoaineisto	24,22	4,12	13,0	35,0
	TLS-aineisto	24,32	4,02	15,0	34,0
<b>at (m)</b>	Maastoaineisto	14,45	2,00	9,6	17,9
	TLS-aineisto	13,58	1,83	9,7	17,4
<b>ak (m)</b>	Maastoaineisto	5,08	1,93	2,3	10,5
	TLS-aineisto	5,01	2,22	2,0	11,0

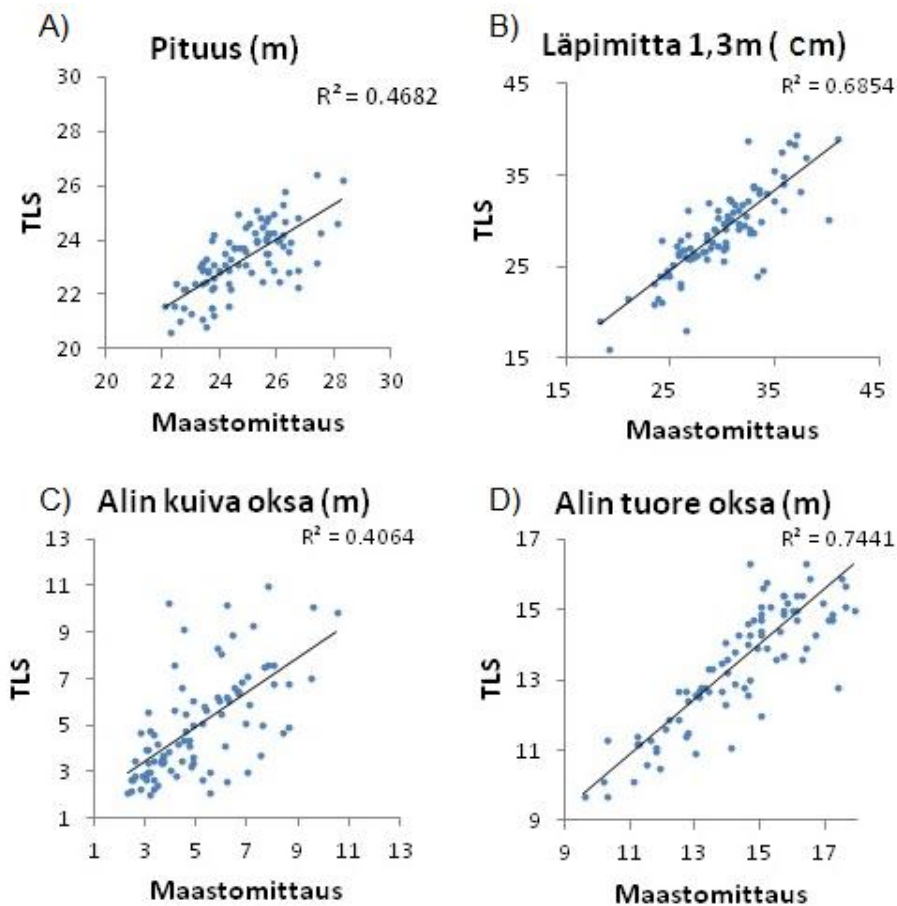
Eri puutunnusten keskiarvoja tarkastellessa voidaan havaita, että TLS-aineistosta tehdyt mittaukset antavat aliarvion referenssiaineistona käytettyyn maastoaineistoon nähden lähes jokaisen muuttujan kohdalla (Taulukko 2). Ainoastaan yläläpimitan kohdalla TLS-aineistosta mitattu keskiarvo on maastoreferenssiä korkeampi. Muuttujien keskihajonnat ovat eri menetelmien välillä samaa suuruusluokkaa.

TLS-aineiston mittaustarkkuudeksi pituuden osalta saatiin 1,87 m RMSE ja -1,53 m harha. Suhteellisesti tarkasteltuna pituuden keskivirhe oli 7,54 % ja harha -6,16 % (Taulukko 3). Rinnankorkeusläpimitan osalta päästiin 1,9 cm keskineliön keskivirheeseen (6,39 %) ja -0,73 cm harhaan (-2,46 %). Yläläpimitan mittauksessa vastaavat luvut olivat 2,44 cm (10,01 %) ja 0,10 cm (0,40 %). Alimman kuivan oksan mittauksessa keskineliön keskivirhe oli 1,77 m (34,95 %) ja harha -0,07 m (-1,47 %). Latvusrajan korkeuden virhe puolestaan oli 1,33 m (9,21 %) ja harha -0,86 m (-5,99 %). Paras selitysaste ( $R^2$ ) menetelmien välillä oli alimman tuoreen oksan korkeuden ennustuksessa 74,4 % ja huonoin puolestaan alimman kuivan oksan korkeuden ennustuksessa 40,6 %.

**Taulukko 3.** TLS-aineiston mittaustarkkuus eri puutunnuksilla referenssinä toimineeseen maastoaineistoon nähden. Taulukossa RMSE kuvaa keskineliövirheen neliöjuurta ja bias harhaa, RMSE % ja bias % puolestaan näiden suhteellista vaihtelua.  $R^2$  on menetelmien välinen selitysaste. H on puun pituus metreinä,  $d_{1,3}$  rinnankorkeusläpimitta senttimetreinä,  $d_6$  yläläpimitta senttimetreinä, at alimman tuoreen oksan korkeus metreinä ja ak alimman kuivan oksan korkeus metreinä.

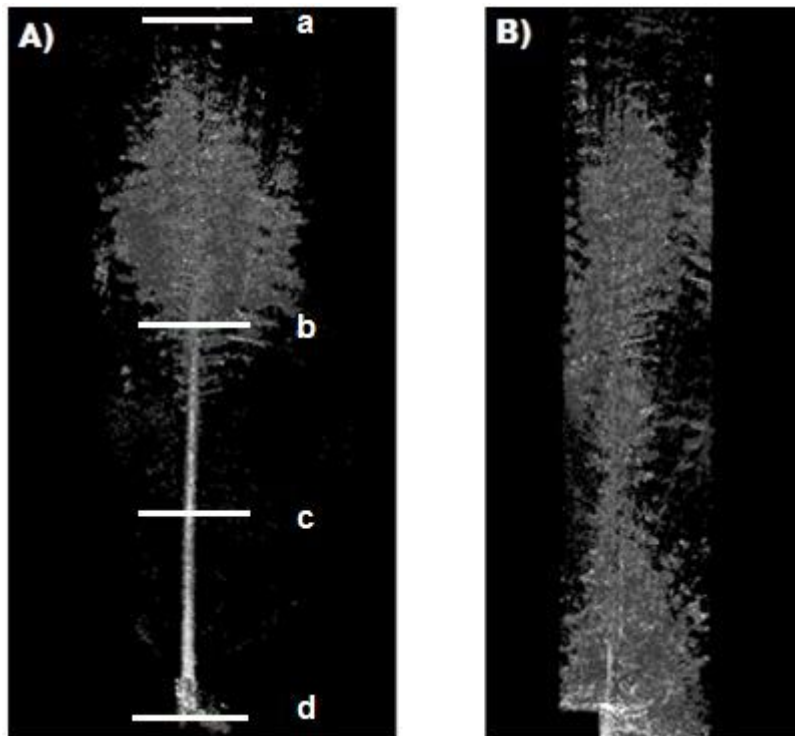
<b>Muuttuja</b>	<b>RMSE</b>	<b>RMSE %</b>	<b>bias</b>	<b>bias %</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>h (m)</b>	1,87	7,54	-1,53	-6,16	0,4682
<b><math>d_{1,3}</math> (cm)</b>	1,90	6,39	-0,73	-2,46	0,6854
<b><math>d_6</math> (cm)</b>	2,44	10,01	0,10	0,40	0,6685
<b>at (m)</b>	1,33	9,21	-0,86	-5,99	0,7441
<b>ak (m)</b>	1,77	34,95	-0,07	-1,47	0,4064

Puiden pituuksien mittauksessa TLS-aineistosta oli selvää aliarviota maastomittauksiin nähden (Kuva 8 A). Tämä johtui siitä, että puiden latvojen määrittäminen oli epävarmaa latvan näkyvyydestä johtuen. Puun pituuden selitysaste oli 46,8 %. Puiden rinnankorkeusläpimitta pystyttiin mittaamaan luotettavammin kuin puun pituus, muuttujan selitysaste oli 68,5 % (Kuva 8 B). Alimman kuivan oksan korkeuden ennustaminen TLS-aineistosta oli melko epävarmaa (Kuva 8 C) ja muuttujan selitysaste olikin vain 40,6 %. Parhaimman selitysasteen muuttujien välille antoi alimman tuoreen oksan tarkastelu 74,4 % (Kuva 8 D).



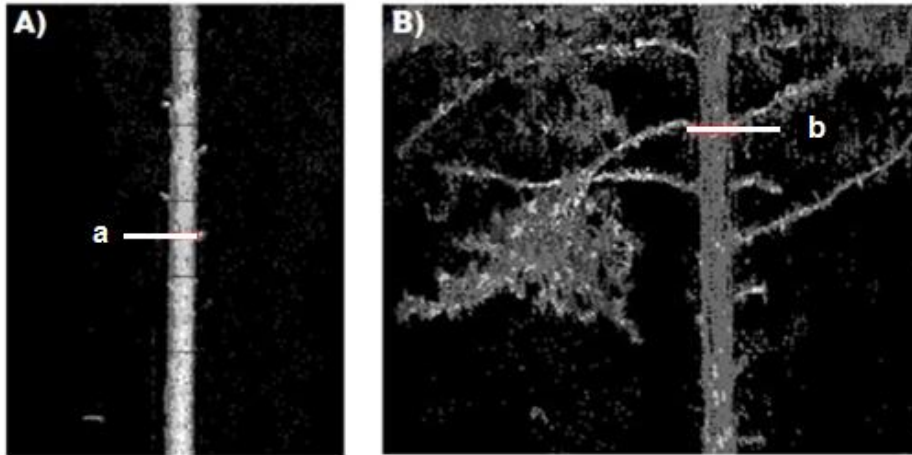
**Kuva 8.** Maastomittauksen ja TLS-aineiston muuttujien välinen tarkastelu. X-akselilla on referenssiarvot ja y-akselilla ennustetut arvot (A) pituudelle, (B) rinnankorkeusläpimitalle, (C) alimman kuivan ja (D) alimman tuoreen oksan korkeudelle. Huomaa eri muuttujien mitta-asteikot.

TLS-aineistolla tuotettu hyvälaatuinen pistepilvi yksittäisestä mäntyrungosta näytti esimerkiksi seuraavanlaiselta (Kuva 9 A). Alikasvoksen peittäessä näkyvyyttä, puun rungosta oli vaikea erottaa mitattavia tunnuksia (Kuva 9 B). Kuten kuvasta 9 A voidaan havaita latvuksen yläosien (a) pistetiheys on varsin heikko, mikä heijastuu vaikeuksiin mitata puun pituutta tarkasti. Alimman tuoreen oksan (b) korkeuden paikantamisen haasteina ovat latvusrajan tuntumassa olevat kuivat oksat. Alin kuiva oksa (c) näkyy ainoastaan rungon lähitarkastelussa, eikä näin ollen ole havaittavissa näin suuren mittakaavan kuvasta. Maanpinnan taso (d) on määritetty puun syntypisteeseen.



Kuva 9. Pistepilviaineistosta manuaalisesti irrotettu yksittäinen hyvälaatuinen mänty (A). Ylimpänä oleva tasoviiva a kuvaa latvuksen korkeimpia havaittavissa olevia pisteitä. Tasoviiva b puolestaan havainnollistaa alimman tuoreen oksan korkeutta, c kuivaoksaissuusrajaa ja d maanpinnan tasoa. Näin ollen etäisyys a – d kuvaa puun pituutta, a – b elävän latvuksen osaa, b – c kuivaoksaissen osan pituutta ja c – d oksatonta rungonosaa. Kohteella oli paikoitellen voimakas alikasvoskuusikko, mikä aiheutti kuvan (B) kaltaisia ilmiöitä pistepilveen.

Lähemmin tarkasteltuna kuva 10 paljastaa alimpien kuivan ja tuoreen oksan määrityksen perusteena olevia piirteitä. Huomionarvoista on, että kyseessä olevat puuyksilöt olivat varsin selkeitä tarkasteltavien tunnuspiirteiden osalta kaikkien koepuiden joukossa.



Kuva 10. Alimman kuivan oksan korkeus (a) ja alimman tuoreen oksan korkeus (b).

## 4.2 Johdettujen puutunnusten tarkastelu

Sekä maastossa että TLS-aineistosta mitatuista puutunnuksista johdettiin lisätunnuksia puuston tarkemman tarkastelun tueksi ja rungon laatua kuvaavan puuluokan ennustamisen avuksi (kts. 4.4 Puun laadun ennustaminen). Näitä tunnuksia olivat rungon tilavuus Laasasenahon (1982) tilavuusmalleilla laskettuna, latvussuhde ( $l_s$ ), kuivaoksaisten rungonosan suhde ( $k_s$ ) ja oksattoman rungonosan suhde ( $o_s$ ) puun pituuteen sekä muotoluku ( $f$ ). Tilavuus laskettiin käyttämällä puun pituutta ja läpimitan selittäjänä sekä pelkkää rinnankorkeusläpimittaa ( $v_1$ ) että rinnankorkeusläpimittaa ja yläläpimittaa ( $v_2$ ). Muotoluvun laskennassa käytettiin rinnankorkeusläpimitan ja puun pituuden avulla määritettyä tilavuutta.

Maastomittausten perusteella  $v_1$ :lla laskettu tilavuuden keskiarvo oli noin  $20 \text{ dm}^3$  suurempi kuin maastoaineiston  $v_2$ :n vastaava (Taulukko 4). Toisaalta tilavuuden keskihajonta oli suurempi  $v_2$ :lla laskettuna, mikä näkyi myös minimi- ja maksimiarvojen suuremmassa vaihteluvälissä. Maastolaserkeilausaineistolla tuotetut runkojen tilavuudet olivat maastoaineiston vastaavia pienemmät, mikä johtui aliarviosta sekä läpimittaa että pituutta mitattaessa. Maastolaserkeilausaineiston perusteella  $v_2$  antoi noin  $15 \text{ dm}^3$  korkeamman keskiarvon tilavuudelle kuin  $v_1$ . Tilavuuden keskihajonnat olivat TLS-aineistossa pienemmät kuin maastoreferenssissä molemmilla tilavuusyhtälöillä laskettuna.

**Taulukko 4. Maastossa ja TLS-aineistosta mitatuista tunnuksista johdetut puutunnukset; v1 on pituuden ja rinnankorkeusläpimitan avulla laskettu tilavuus sekä v2 rinnankorkeusläpimitan, yläläpimitan ja pituuden avulla laskettu tilavuus (Laasasenaho 1982), ls latvussuhde, ks kuivaoksaisten ja os oksattoman rungonosan suhde puun pituuteen sekä f muotoluku. Taulukossa on puutunnusten keskiarvot (Ka), keskihajonnat (Kh), minimiarvot (Min) ja maksimiarvot (Max), n = 91.**

Muuttuja		Ka	Kh	Min	Max
v1 (dm <sup>3</sup> )	Maastoaineisto	811,9	254,8	282,5	1549,3
	TLS-aineisto	729,9	240,5	220,1	1528,1
v2 (dm <sup>3</sup> )	Maastoaineisto	794,2	278,6	225,8	1633,8
	TLS-aineisto	745,3	243,8	266,4	1410,5
ls (%)	Maastoaineisto	41,8	7,3	23,0	61,4
	TLS-aineisto	41,6	7,1	26,6	58,0
ks (%)	Maastoaineisto	37,7	8,7	15,3	54,4
	TLS-aineisto	36,8	9,4	9,2	53,9
os (%)	Maastoaineisto	20,5	7,7	9,0	41,8
	TLS-aineisto	21,6	9,7	8,3	47,4
f	Maastoaineisto	0,46	0,00	0,45	0,48
	TLS-aineisto	0,46	0,01	0,45	0,48

Latvussuhde, kuivaoksaisten rungonosan suhde sekä oksattoman rungonosan suhde ennustavat rungon sisäisen oksan laatua ja ilmentävät näiden osien suhteellista osuutta rungon pituudesta. Referenssiaineiston perusteella keskimääräinen latvussuhde oli noin 41,8 %, kuivaoksaisten osan suhde 37,7 % ja oksattoman osan suhde 20,5 % rungon pituudesta (Taulukko 4). Maastolaserkeilauksella keskiarvoissa päästiin hyvin samansuuntaisiin lukemiin. Latvussuhteen keskihajonta oli maastomittauksessa hieman suurempi kuin maastolaserkeilausaineiston tarkastelussa. Kuivan ja oksattoman osan suhteiden keskihajonnat puolestaan olivat pienempiä referenssiaineistossa. Muotoluvun osalta menetelmäkohtaisia eroja ei ollut keskiarvossa, keskihajonnassa, minimiarvossa tai maksimiarvossa.

Tilavuuden mittauksen RMSE TLS-aineistosta yhdellä läpimitalla (v1) oli 128,9 dm<sup>3</sup> (15,9 %) ja harha -82,0 dm<sup>3</sup> (-10,1 %) (Taulukko 5). Kahdella läpimitalla laskettuna (v2) tilavuuden RMSE oli 145,8 dm<sup>3</sup> (18,4 %) ja harha -48,9 dm<sup>3</sup> (-6,2 %). Latvussuhteen RMSE oli 4,8 %, kuivaoksaisten rungonosan suhteen vastaava 8,0 % ja oksattoman rungonosan suhteen 7,8 %. Harhaa edellä mainituilla suhteellisilla



rungon osuuksilla ei ollut. Muotoluvun osalta sekä RMSE että harha olivat olemattomat.

**Taulukko 5. TLS-aineiston mittaustarkkuus johdetuilla puutunnuksilla referenssinä toimineeseen maastoaineistoon nähden. Taulukossa RMSE kuvaa keskineliövirheen neliöjuurta ja bias harhaa, RMSE % ja bias % puolestaan näiden suhteellista vaihtelua. V1 on pituuden ja rinnankorkeusläpimitan avulla laskettu tilavuus sekä v2 rinnankorkeusläpimitan, yläläpimitan ja pituuden avulla laskettu tilavuus (Laasasenaho 1982), ls latvussuhde, ks kuivaoksaisten ja os oksattoman rungonosan suhde puun pituuteen sekä f muotoluku.**

Muuttuja	RMSE	RMSE %	bias	bias %
v1 (dm <sup>3</sup> )	128,94	15,88	-82,03	-10,10
v2 (dm <sup>3</sup> )	145,79	18,36	-48,85	-6,15
ls (%)	4,76	11,42	0,00	-0,27
ks (%)	7,98	21,15	-0,01	-2,55
os (%)	7,83	38,11	0,01	5,20
f	0,00	0,84	0,00	0,60

### 4.3 Laadun silmämääräinen tarkastelu

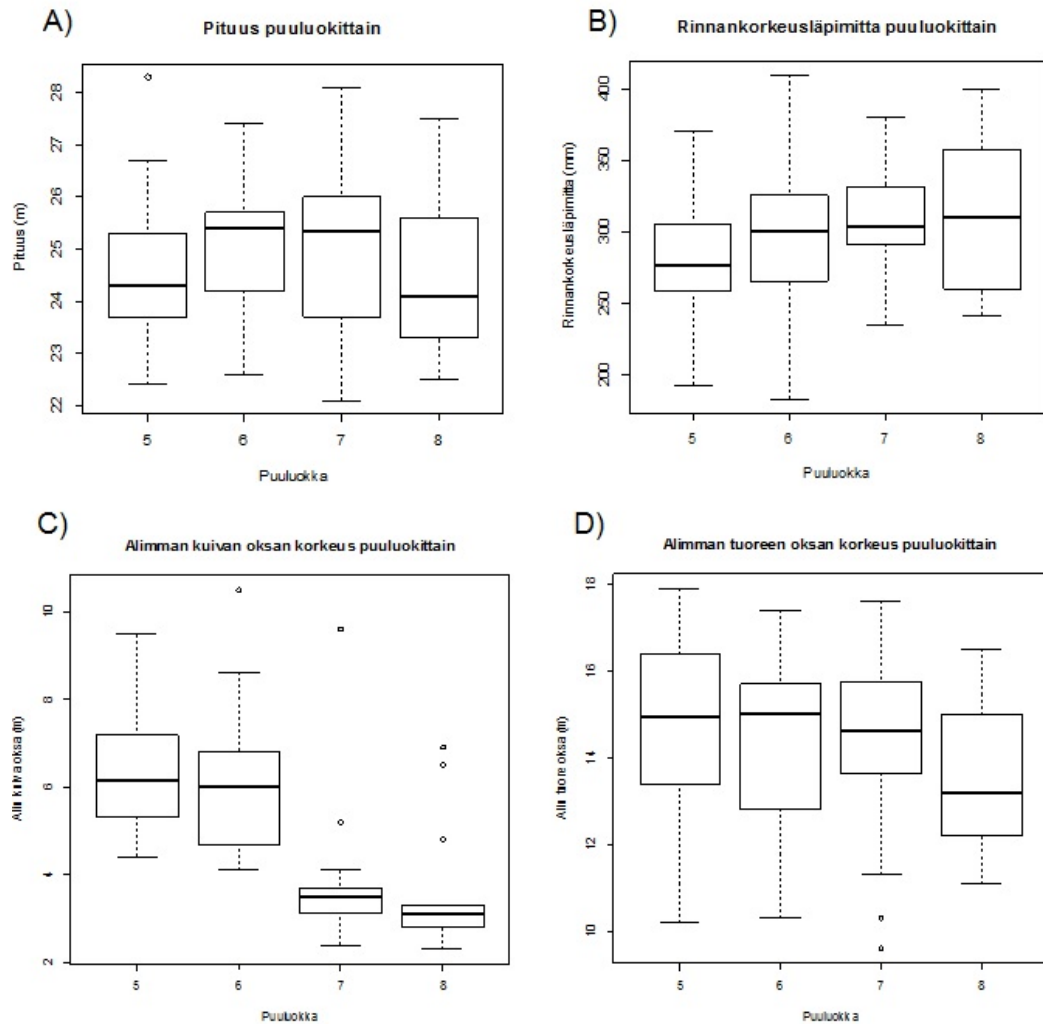
#### 4.3.1 Maastossa määritetty puuluokka

Puuluokka määritettiin maastossa VMI:n ohjeistusta noudattaen. Puuluokka ennustaa pystypuun puuaineen teknistä laatua ulkoisesti tarkasteltavien piirteiden perusteella. Rungoista kuului lukumäärällisesti eniten parhaaseen puuluokkaan (5), isoja kuitupuita (9) ei ollut aineistossa lainkaan (Kuva 11).



**Kuva 11. Puuluokkien frekvenssit maastoaineistossa. Puuluokat: (5) Hyvä tukkipuu, (6) Vikainen hyvä tukkipuu, (7) Tukkipuu, (8) Vikainen tukkipuu, (9) Iso kuitupuu. (n = 91)**

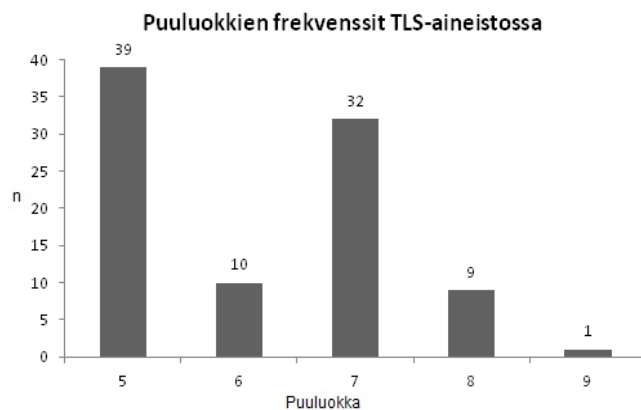
Tärkein yksittäinen tunnus laadun määrittämisessä oli alimman kuivan oksan korkeus, jolla oli merkittävin vaikutus runkojen määrittelyyn hyväksi tukkipuiksi (puuluokat 5 ja 6) tai tukkipuiksi (puuluokat 7 ja 8) (Kuva 12 C). Sen sijaan pituuden, rinnankorkeusläpimitan ja alimman tuoreen oksan korkeuden osalta ei havaittu yhtä suuria eroja puuluokkien välillä (Kuva 12 A, B, D). Muita luokitteluperusteita olivat erinäiset runkoviati, kuten korot, lenkous, mutkat sekä rungon haaraisuus.



**Kuva 12.** Boxplot-kuvaajia eri muuttujien vaihtelusta puuluokkien välillä ja saman luokan sisällä (puuluokat 5 – 8). A) Pituus puuluokittain, B) Rinnankorkeusläpimitta puuluokittain, C) Alimman kuivan oksan korkeus puuluokittain, D) Alimman tuoreen oksan korkeus puuluokittain. Boxplot-kuviaita tulkitaan seuraavasti: laatikko sisältää 50 % havainnoista, laatikon yläreunaviiva on 75 % piste ja alareunaviiva 25 % piste. Laatikon keskellä oleva viiva kuvaa mediaania. Keskiviivan ja yläviivan väliin jäävä alue on yläkvartaali ja alapuolella oleva viivojen väli puolestaan alakvartaali. Ns. viikset kuvaavat sitä vaihteluväliä, kuinka voimakkaasti muusta joukosta poikkeavat arvot jäävät laatikon ulkopuolelle. Palloina merkityt arvot poikkeavat enemmän kuin 1,5 kertaa laatikon leveyden verran ylä- tai alakvartaalista (Reinikainen ja Sassali 2013).

### 4.3.2 Puuluokka TLS-aineistosta arvioituna

Vertailun vuoksi maastolaserkeilausaineistosta tehtiin silmämääräinen puuluokitus rungoille, missä otettiin huomioon mitattu alimman kuivan oksan korkeus sekä muut silmämääräisesti havaitut rungon ominaisuudet, kuten korot, lenkous tai muut runkoviati. Tällä tavoin eri puuluokkien frekvensseiksi saatiin kuvan 13 osoittamat määrät.

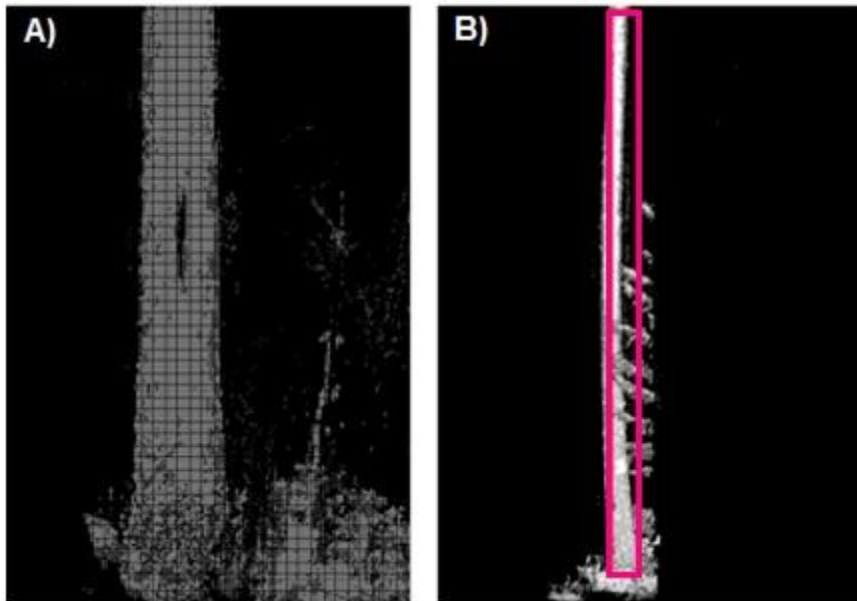


**Kuva 13. Maastolaserkeilausaineistosta silmämääräisesti arvioitujen puuluokkien frekvenssit.**

Silmämääräisen arvion perusteella lukumäärällisesti eniten rungoista kuului tässäkin tapauksessa parhaaseen, hyvän tukkipuun, luokkaan (5) (Kuva 13). Toiseksi eniten oli tukkipuiksi luokiteltuja puita (7). TLS-aineistosta tarkasteltuna yksi rungoista luokiteltiin isoksi kuitupuuksi puuluokkaan 9, kun maastomittauksessa kuitupuuksi luokiteltavia runkoja ei ollut lainkaan. Kun tarkasteltiin arvioitujen puuluokkien runkokohtaista vastaavuutta, havaittiin, että luokittelutarkkuus samaksi puuluokaksi oli 48,4 %. Huonommaksi puuluokaksi arvioitiin 20,9 % ja paremmaksi puolestaan 30,8 %.

Maastoaineiston perusteella 12 %:ssa runkoja oli koroja. Maastolaserkeilauksessa oli ainoastaan yksi koroepäily, joka sekin osoittautui vääräksi havainnoksi (Kuva 14 A). Maastossa koepuista lengoiksi tai mutkaisiksi rungoiksi arvioitiin 14 %, kun taas TLS-arvioinnin perusteella näitä oli 13 %. Runkokohtaisesti lenkouden arvioinnin vastaavuus eri menetelmillä oli melko hyvä, ainoastaan yksi maastossa lengoksi arvioitu runko jäi havainnoimatta TLS-aineistosta ja yksi maastossa suoraksi arvioitu runko määritettiin TLS-aineistosta lengoksi. Maastolaserkeilausaineiston

tarkastelussa TerraScan-sovelluksella ei käytetty erityisiä työkaluja lenkouden osoittamiseksi, vaan arviointi tapahtui silmämääräisesti (Kuva 14 B).



**Kuva 14.** Laatutunnusten tarkastelua manuaalisesti TLS-aineistosta. Korolta vaikuttava osa puun kyljessä ei todellisuudessa ollut koro vaan katvealue pisteaineistossa (A). Lengoksi silmämääräisesti arvioitu runko, punainen suorakulmio vastaisi suoraa runkoa (B).

#### 4.4 Puun laadun ennustaminen

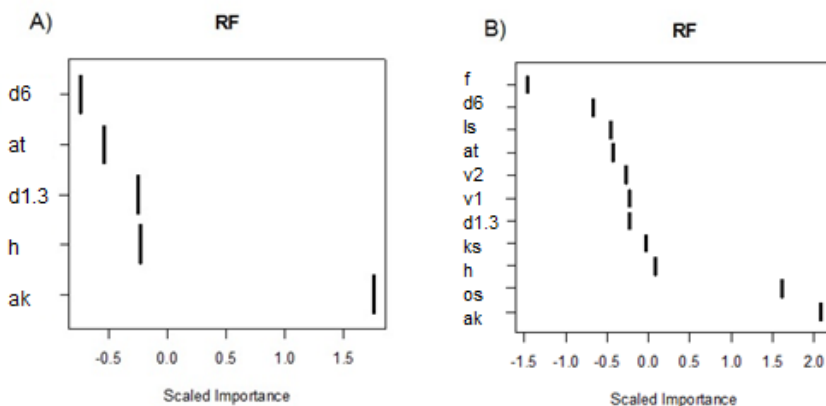
Tutkimuksen toisena päätavoitteena oli ennustaa puun laatua perustuen sekä maastossa että TLS-aineistosta mitattuihin muuttujiin ja näistä johdettuihin tunnuksiin. Puun laatua ennustettiin ei-parametrisella lähimmän naapurin menetelmällä. Selitettävänä muuttujana käytettiin maastossa arvioitua puuluokkaa ja selittäjinä käytettiin sekä maastoaineistosta että TLS-aineistosta mitattuja tai niistä johdettuja puutunnuksia. Lähimpien naapureiden etsintään käytettiin Random Forest -menetelmää. RF-menetelmä ajettiin 50 kertaa, millä pyrittiin vähentämään satunnaisuutta puuluokan luokitustarkkuudessa. Lopullinen tulos oli keskimääräinen tulos näistä ajoista. Regressiopuiden määrä oli 1000. Ennustuksessa käytettiin kolmea lähintä naapuria ( $k = 3$ ). Luokittelun satunnaisuutta tarkasteltiin Cohenin kappa-arvolla.

#### 4.4.1 Ennustaminen maastoaineistolla

Menetelmää testattiin ensin maastossa mitattujen puutunnusten avulla. Selitettävänä muuttujana käytettiin maastossa määritettyä puuluokkaa sekä selittävinä muuttujina maastossa mitattuja puutunnuksia, eli puun pituutta (h), rinnankorkeusläpimittaa ( $d_{1.3}$ ), yläläpimittaa ( $d_6$ ) sekä alimman tuoreen (at) ja kuivan oksan (ak) korkeutta.

Viiden puumuuttujan tarkastelussa puuluokan luokittelussa paras selittäjä oli alimman kuivan oksan korkeus, heikoiten puuluokkaa puolestaan selitti yläläpimitta (Kuva 15 A). Oikean puuluokan luokittelutarkkuudeksi saatiin 78,0 % (kappa-arvo 0,71). Menetelmällä lajiteltiin paremmaksi puuluokaksi 12,1 % ja huonommaksi puuluokaksi 9,9 %. Ennustettujen puuluokkien moodi oli 5.

Lisäämällä selittäjiksi mitatuista puutunnuksista johdetut tunnuksat, luokittelutarkkuutta saatiin parannettua 83,5 % (kappa-arvo 0,78). Paremmaksi puuluokaksi lajiteltiin tässä tapauksessa 9,9 % ja huonommaksi 6,6 %. Ennustettujen puuluokkien moodi oli tässäkin tapauksessa 5. Tällöin selkeästi parhaat selittäjät olivat alin kuiva oksa sekä oksattoman osan suhde puun pituuteen (Kuva 15 B).



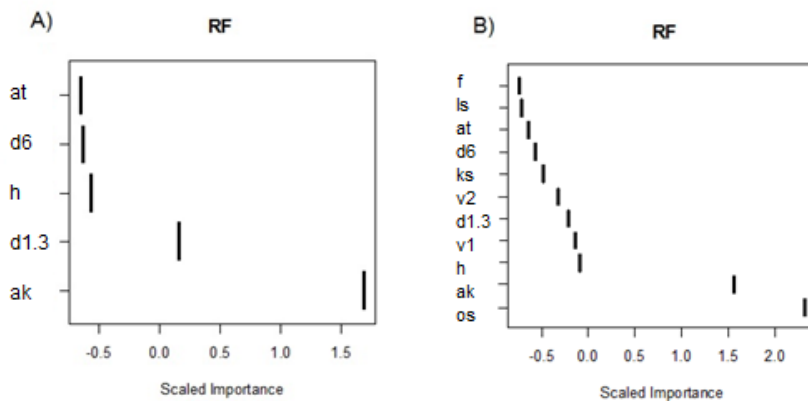
Kuva 15. Skaalattu merkitsevyys Random Forest -ajossa, kun selitettävänä muuttujana on maastossa määritetty puuluokka ja selittävinä muuttujina maastoaineistosta mitatut puutunnuksat (A) sekä mitatut ja niistä johdetut puutunnuksat (B),  $k = 3$ , 1000 regressiopuuta, 50 RF-ajoa.

#### 4.4.2 Ennustaminen TLS-aineistolla

Ennustettaessa maastolaserkeilausaineiston luokittelutarkkuutta, selitettävänä muuttujana käytettiin maastossa arvioitua puuluokkaa ja selittävinä muuttujina TLS-aineistosta mitattuja ja niistä johdettuja puutunnuksia.

TLS-aineistoista mitattujen puutunnusten avulla luokittelutarkkuudessa päästiin 71,4 % (kappa-arvo 0,62). Paremmaksi puuluokaksi luokiteltiin 15,4 % ja huonommaksi 13,2 %. Ennustettujen puuluokkien moodi oli 7. Parhaiten puuluokkaa selittävät muuttujat olivat alimman kuivan oksan korkeus ja rinnankorkeusläpimitta (Kuva 16 A).

Lisättäessä johdetut puutunnukset mukaan ennustukseen, luokittelutarkkuus parani 78,0 % (kappa 0.71). Koepuista paremmaksi puuluokaksi luokiteltiin menetelmällä 13,2 % ja huonommaksi 8,8 %. Ennustettujen puuluokkien moodi oli 5. Parhaiten puuluokkaa selittävät muuttujat olivat oksattoman osan suhde puun pituuteen sekä alimman kuivan oksan korkeus (Kuva 16 B).

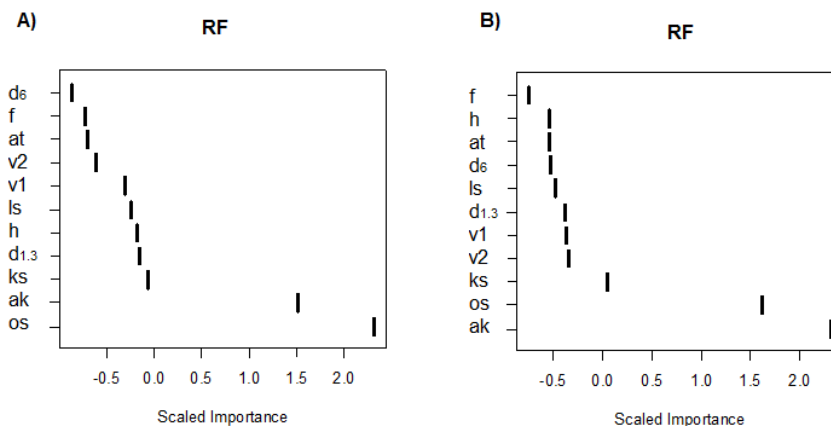


**Kuva 16.** Skaalattu merkitsevyys RF-ajossa, kun selitettävänä muuttujana on maastossa määritetty puuluokka ja selittävinä muuttujina TLS-aineistosta mitatut puutunnukset (A) sekä mitatut ja niistä johdetut puutunnukset (B),  $k = 3$ , 1000 regressiopuuta, 50 RF-ajoa.

### 4.4.3 Puuluokkien ryhmittely

Lopuksi puuluokat jaettiin vielä kolmeen eri ryhmään, jossa ryhmä 1 kattoi puuluokat 5 ja 6 sisältäen hyvän tukkipuun määritelmän mukaisesti hyvälaatuisen oksattoman tyvitukin, ryhmä 2 kattoi puuluokkien 7 ja 8 tukkipuulaatuiset rungot ja ryhmä 3 isot kuitupuut. Tällä ryhmittelyllä pyrittiin tarkastelemaan, voiko luokitustarkkuutta parantaa, jotta voitaisiin tunnistaa hyvää tukkipuuta sisältävät leimikot huonompilaatuisista tukkipuuleimikoista. Selitettävänä muuttujana käytettiin maastoaineiston puuluokkien perusteella muodostettua puuluokkaryhmää ja selittäjinä maastolaserkeilausaineistosta mitattuja sekä niistä johdettuja puutunnuksia. Vertailun vuoksi puuluokkaryhmän ennustus suoritettiin myös maastoaineistolle mitattujen ja johdettujen tunnusten perusteella.

Maastolaserkeilausaineiston perusteella parhaat selittäjät olivat oksattoman osan suhteellinen osuus rungosta sekä alimman kuivan oksan korkeus (Kuva 17 A). Menetelmän luokittelutarkkuudeksi saatiin 86,8 % (kappa-arvo 0,74). Väärään puuryhmään luokiteltiin 13,2 % rungoista. Maastoaineiston perusteella puuluokkaryhmä luokiteltiin oikein 96,7 % rungoista (kappa-arvo 0,93). Maastoaineiston perusteella niin ikään parhaat selittäjät olivat alimman kuivan oksan korkeus sekä oksattoman rungonosan osuus puun pituudesta, joskin tässä tapauksessa alimman kuivan oksan merkittävyys oli voimakkaampi (Kuva 17 B).



**Kuva 17.** Skaalattu merkittävyys RF-ajossa TLS-aineistolla (A) ja maastoaineistolla (B), kun selittäjinä on sekä mitatut että niistä johdetut puutunnukset ja selitettävänä muuttujana puuluokkaryhmät 1, 2 ja 3.

## **5 TULOSTEN TARKASTELU**

### **5.1 Puutunnusten tarkastelu**

Tutkimuksen kohteena oleva männikkö oli kasvupaikaltaan tuore kangas (MT). Pääpuulajina oli mänty, mutta paikoitellen leimikon sisällä kasvoi varsin voimakas alikasvoskuusikko. Kyseinen leimikko oli männyn kasvatukseen suhteellisen rehevä, mikä näkyi puiden yleisenä, melko voimakkaana, oksikkuutena. Rungoissa esiintyi myös jonkin verran koroja ja muita runkovaurioita. Yleisilmeeltään leimikko soveltui hyvin tutkimuksen tarkoitukseen, sillä tarkasteltavan leimikon odotettiin sisältävän mahdollisimman vaihtelevasti eri laatuista tukkikokoisia mäntyjä. Runkojen keskipituus oli 24,8 m ja keskiläpimitta 29,7 cm. Kirjallisuuteen nojaten, mittojen ja 75 vuoden ikänsä puolesta leimikko oli uudistuskypsä männikkö (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2006).

Tutkimuksen ensimmäisenä päätavoitteena oli selvittää, millä tarkkuudella mäntyrungosta ulkoisesti tarkasteltavia sisäisen puuaineen laatua ennustavia tunnuksia pystytään mittaamaan manuaalisesti TLS-aineistosta. Mitattavia tunnuksia olivat rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta, pituus sekä oksarajakorkeudet. Lisäksi tarkasteltiin runkojen yleislaatua määrittämällä puuluokka muun muassa alimman kuivan oksan korkeuden, lenkouden ja runkovaurioiden perusteella. Koepuina tarkasteltavia mäntyjä oli 91 kappaletta, mikä on suhteellisen pieni otoskoko puustotunnusten arviointiin metsäntutkimuksessa, mikäli tuloksia halutaan hyödyntää tutkimusaineiston ulkopuolella.

#### **5.1.1 Läpimitta**

Leimikon koepuista laadittu rinnankorkeusläpimittoihin perustuva runkolukusarja osoitti, että maastolasermittauksen rinnankorkeusläpimitoissa oli aliarviota maastomittauksiin nähden. Tämä näkyi läpimittajakaumien painottumisena eri kohtiin. Maastomittauksen perusteella läpimitan aritmeettinen keskiarvo oli 29,7 cm ja maastolaseraineistosta mitattuna 28,7 cm.



Rinnankorkeuslöpimitta mitattiin maastossa kahdesta toisistaan kohtisuoraan olevasta suunnasta, millä voitiin tasoittaa rungon mahdollista epäpyöreyttä. Runkojen epäpyöreys tutkielman aineistossa oli keskimäärin 2,4 %. Aiemmassa tutkimuksessa mäntyjen keskimääräiseksi epäpyöreudeksi on raportoitu 5 – 6 % (Kärkkäinen 1984). Tässä tutkimuksessa keskiarvoperusteisella rinnankorkeuslöpimitalla pyrittiin vähentämään runkoon nähden satunnaisesta maastolaserkeilaussuunnasta johtuvaa mittausepä tarkkuutta. Maastolasermittauksella löpimitan mittausvirheeksi saatiin 1,9 cm harhan ollessa -0,7 cm. Tämä tarkoittaa sitä, että keskimäärin ennustettavat arvot sijaitsivat 1,9 cm päässä referenssiarvoista, ollen keskimäärin 0,7 cm aliarvioita. Suhteellisesti tarkasteltuna rinnankorkeuslöpimitan RMSE oli 6,39 % ja harha -2,46 %. Maas ym. (2008) pääsivät yhden keilausaineiston automaattisella tulkinnalla 1,80 – 3,25 cm mittaustarkkuuteen (harha -0,67 – 1,58 cm), kun taas Liangin ym. (2013) tutkimuksessa kehitetyllä automaattisella runkokäyrämenetelmällä päästiin jopa 0,74 – 2,41 cm tarkkuuteen (harha -0,18 – 0,76 cm). Näin ollen rinnankorkeuslöpimitan osalta automaattisella tulkinnalla on mahdollista päästä hieman tarkempaan tulokseen kuin manuaalisella tarkastelulla.

Maastomittauksissa ylälöpimitta mitattiin kaulaimen avulla kuuden metrin korkeudelta rungosta. Ylälöpimitan mittaaminen on huomattavasti työläämpää kuin rinnankorkeuslöpimitan mittaaminen, eikä sitä tehdä kovin usein metsänarvioinnissa. Ylälöpimitan mittauksessa oli toisinaan haasteita oksapeitteen heikentämästä näkyvyydestä johtuen. Lisäksi mittauksessa päästiin vain senttimetrin tarkkuuteen johtuen etäisyydestä silmän ja mittatyökalun välillä. Käytännössä TLS-aineistosta on mahdollista päästä parempaan mittaustarkkuuteen, sillä runkoa on mahdollista tarkastella samalla tarkkuudella eri korkeuksilta, näin ollen etäisyydestä johtuvaa epätarkkuutta ei synny. Tässä tutkimuksessa TLS-aineistosta mitattu löpimitta pyöristettiin kuitenkin lähimpään senttimetriin, jotta lukemat olivat vertailukelpoisia maastoaineiston kanssa. Ylälöpimitan mittaustarkkuudessa TLS-aineistosta päästiin 2,44 cm tarkkuuteen (RMSE) ja 0,4 cm harhaan. Selitysaste menetelmien välillä oli 66,9 %. Ylälöpimittaa käytettiin tilavuuden laskentaan Laasasenahon (1982) runkokäyräyhtälöllä (kts. 5.1.5 Johdetut puutunnukset)

### 5.1.2 Pituus

Puun pituuden RMSE menetelmien välillä oli 1,87 m ja harha -1.53 m. Pituuden mittauksessa oli selvää aliarviota johtuen puun latvuksen pistepilven heikkoudesta. Mitä lähempänä keilauspistettä tarkasteltava puu sijaitti, sitä heikompi pisteaineisto latvuksesta oli saatavilla keilauskulmasta ja -korkeudesta johtuen. Pituuden selitysaste menetelmien välillä oli vain noin 47 %. Pituuden mittauksen epätarkkuus on raportoitu aiemmissakin tutkimuksissa; esimerkiksi Kankare ym. (2013) pääsivät pituuden manuaalisessa tarkastelussa useasta yhdistetystä keilauksesta 1,54 m keskineliön keskivirheeseen ja 0,51 m harhaan. Liang ym. (2013) saivat puolestaan yhden keilausaineiston automaattisen tulkinan tarkkuudeksi 1,36 – 4,29 m (keskimääräinen harha 0,62 m). Pituudella on vaikutusta tilavuuden, latvussuhteen sekä oksattoman ja kuivaoksaisten rungonosan suhteelliseen osuuden laskennan tarkkuuteen.

### 5.1.3 Alimman kuivan oksan korkeus

Alimman kuivan oksan korkeus on puuston silmämääräisen laatuluokituksen tärkein yksittäinen peruste, sillä se ennakoii parhaiten oksien kokoa ja laatua puuaineessa. Tunnuksen perusteella voidaan johtaa myös oksattoman rungonosan suhde puun pituudesta.

Maastolaserkeilauksen pisteaineistosta tehdyn alimman kuivan oksan mittauksessa päästiin 1,77 m virheeseen (RMSE) ja -0,07 m harhaan. Selitysaste eri mittausmenetelmien välillä oli suhteellisen heikko (41 %). Määrittelyn heikkous johtui siitä, että kuivan oksan määrittelyä maastomittauksissa käytetty 1,5 cm mittainen kuiva oksa, oksantynkä, oksanreikä tai oksankyhmy on varsin haasteellinen suuruusluokka tarkasteltavaksi yhden keilauksen TLS-aineistosta. TLS-aineiston pistetiheys kymmenen metrin etäisyydellä keilauspisteestä on 6,3 mm, mikä tarkoittaa sitä, että näin pienen mittaluokan oksaan osuu tuolla etäisyydellä korkeussuunnassa enintään 2 pistettä. Yhtä keilausaineistoa tarkasteltaessa onkin suuri todennäköisyys sille, että pienimmät oksat jäävät huomaamatta tai sijoittuvat rungon takapuolelle katvealueen taakse. Oksantynkien tai oksanreikien havainnointi on suorastaan mahdotonta TLS-aineiston manuaalisella tarkastelulla. Tässä

tutkimuksessa tarkasteltujen kuivien oksien mittaluokan (1,5 cm) osalta ei löydy aiempaa TLS-tutkimustietoa.

#### **5.1.4 Alimman tuoreen oksan korkeus**

Latvusrajan tarkastelussa keskityttiin alimman tuoreen oksan korkeuteen. Alimman tuoreen oksan korkeudella on vaikutusta latvussuhteeseen sekä kuivaoksaisten rungonosan suhteellisen osuuden tarkasteluun. Maastolaserkeilauksessa muuttujan mittaustarkkuudeksi saatiin 1,33 m (RMSE) ja harhaksi -0,86 m. Suhteellisesti tarkasteltuna RMSE oli 9,21 % ja harha -5,99 %. Menetelmän selitysaste oli 74 %. Alimman tuoreen oksan korkeus saatiin määritettyä muuttujista tarkimmin, mikä johtuu siitä, että latvusrajan tarkastelussa alimman tuoreen oksan neulaspeitteeseen osuu melko paljon pisteaineistoa. Lisäksi yhtä keilausta tarkastellessa oli varsin suuri todennäköisyys sille, että rungosta horisontaalisesti erottuva alin tuore oksa näkyy edes osittain myös katvealueelta rungon takapuolelta runkoa käännellessä. Haasteita aiheuttivat kuitenkin elävän latvuksen lähellä olevat kuolleet oksat, joita ei aina erottanut kovin selkeästi elävistä oksista. On kuitenkin muistettava, että elävän latvuksen lähellä olevat kuolleet ulko-oksat voivat olla eläviä tukin pintaosissa, eivätkä näin ollen välttämättä vaikuta puuaineen laatuun (Kantola ja Pennanen 1999).

#### **5.1.5 Johdetut puutunnukset**

Mitatuista puutunnuksista johdettiin puuston tarkempaa tarkastelua varten lisäksi puutunnuksia, joilla voitaisiin mahdollisesti tarkentaa myös puun laadun ennustusta (kts. 5.3 Laadun ennustaminen). Johdettuja tunnuksia olivat puun tilavuus ( $v_1$  ja  $v_2$ ) Laasasenahon (1982) tilavuusmallien avulla laskettuna, latvussuhde ( $l_s$ ), kuivaoksaisten ( $ks$ ) ja oksattoman ( $os$ ) osan suhde puun pituudesta sekä muotoluku ( $f$ ).

Tilavuuden laskennassa käytettiin puun pituutta ja sekä yhtä että kahta puusta mitattua läpimittaa. Aiempaan tutkimustietoon perustuen kahden läpimitan tilavuusmallilla päästään pienempään suhteelliseen hajontaan, näin ollen sitä voidaan pitää tarkempana tilavuuden laskennassa (Laasasenaho 1982). Toisaalta yläläpimitta mitataan harvemmin käytännön maastomittauksissa, minkä vuoksi tarkasteluissa

käytettiin myös tilavuutta pelkän rinnankorkeusläpimitan avulla laskettuna. Tilavuuden mittauksessa TLS-mittauksen tarkkuudessa päästiin yhden läpimitan osalta 15,88 % suhteelliseen tarkkuuteen ja kahden läpimitan osalta 18,36 % vastaavaan. Tilavuus aliarvioitiin kummassakin tapauksessa maastomittausten perusteella laskettuihin tilavuuksiin nähden, mikä johtuu erityisesti aliarviosta puun pituutta TLS-aineistosta mitattaessa.

Latvussuhde ja kuivaoksaisten sekä oksattoman rungonosan suhde ilmentävät puun ulkoisesti tarkasteltavien oksien laatua ja sitä kautta ennustavat sisäisen puuaineen oksien laatua. Keskimääräinen latvussuhde maastomittausten perusteella oli noin 41,8 %, kuivaoksaisten rungonosan suhde puun pituuteen 37,7 % ja oksattoman rungonosan vastaava 20,5 %. TLS-aineistossa latvussuhteen mittauksessa päästiin 4,76 % tarkkuuteen (RMSE). Kuivaoksaisten rungonosan osuuden mittauksen RMSE oli 7,98 % ja oksattoman rungonosan osalta vastaava oli 7,83 %. Edellä mainittujen suhteellisten rungonosien osuuksien mittaustarkkuuteen vaikuttivat sekä puun pituuden että oksarajakorkeuksien määrittämisen tarkkuus.

Muotoluvun määrittämisen tarkkuudessa ei ollut käytännössä eroa menetelmien välillä; RMSE ja harha olivat olemattomia. Muotoluku laskettiin, koska haluttiin tarkastella sen merkitsevyyttä ennustettaessa rungon yleislaatua (kts. 5.3 Laadun ennustaminen).

## **5.2 Laadun silmämääräinen arviointi**

Mäntyrunkojen laatua arvioitiin 11. valtakunnan metsien inventoinnissa käytettävien laatumääritelmien mukaan ja luokittelu tapahtui viiteen puuluokkaan. Hyvien tukkipuiden (puuluokat 5 ja 6) määritelmään kuului vähintään 4,1 m mittaisen oksattoman hyvälaatuisen puunosan esiintyminen rungossa, kannonkorkeudeksi huomioitiin 10 cm. Alle 4,1 m korkeudessa oleva alin kuiva oksa tai rungon tyviosassa ilmennyt riittävän suurikokoinen viaksi määritely tekijä sai puut luokitelluiksi tukkipuiksi (puuluokat 7 ja 8). Tukkipuiksi kelpaamattomia isoja kuitupuurunkoja ei ollut maastoaineiston perusteella yhtään, mutta TLS-aineistosta yksi puu arvioitiin silmämääräisesti sellaiseksi. Puuluokkien frekvenssit maastoaineiston perusteella vaihtelivat 13 – 30 välillä (puuluokat 5 – 8). Puuluokan moodi, eli yleisin arvo, maastoarvioinnissa oli 5. TLS-aineiston perusteella

puuluokkien frekvenssit vaihtelivat 1 – 39 välillä, moodin ollessa tässäkin tapauksessa 5.

Kun tarkasteltiin tarkemmin silmämääräisesti arvioitujen puuluokkien runkokohtaista vastaavuutta menetelmien välillä, havaittiin, että luokittelutarkkuus samaksi puuluokaksi oli vain 48,4 %. Huonommaksi puuluokaksi arvioitiin 20,9 % ja paremmaksi puolestaan 30,8 %. Todellisuudessa heikompilaatuinen puuluokka arvioitiin yleensä paremmaksi puuluokaksi havainnoimatta jääneiden kuivien oksien tai runkovaurioiden vuoksi. Puuluokan arvioiminen huonommaksi saattoi selittyä sillä, että oksien koko määritettiin yläkanttiin, merkittävää lenkoutta arvioitiin olevan todellisuutta enemmän tai alin kuiva oksa määritettiin alemmaksi häiritsevän alikasvoksen johdosta.

Puuluokan määrittäminen maastossa sekä maastolaserkeilausaineistosta oli subjektiivista. Maastossa arvioinnin suurimmiksi haasteiksi muodostuivat alimman kuivan oksan paikantaminen sekä dimensioiltaan haitallisiksi määriteltyjen runkovaurioiden, kuten korojen arvioiminen. TLS-aineistosta tarkastellessa suurimmat haasteet olivat niin ikään alimman kuivan oksan korkeuden määrittäminen sekä runkovaurioiden tarkastelu. Pistearineiston manuaalisella tarkastelulla oli suorastaan mahdotonta erottaa esimerkiksi koroja. Korojen havainnointi maastossa vaikutti erityisesti puuluokan 5 arvioimiseen puuluokaksi 6 ja vastaavasti puuluokan 7 arvioimiseen puuluokaksi 8. Lisäksi oksien koon arviointi niin kuivien kuin tuoreiden oksien osalta oli haasteellista. Latvuksen sisältä ei ollut mahdollista tarkastella lainkaan esimerkiksi oksien kokoa tai rungon haaroittumista.

Lenkoutta tarkasteltiin TLS-aineistosta silmämääräisesti sovittamalla suorakulmio runkoon ja mittaamalla lenkojen rungonosien pituus ja arvioimalla lenkouden merkittävyys rungon laatuluokituksen kannalta. Lenkoutta esiintyi 13 % TLS-aineistosta, kun taas maastossa sama ominaisuus oli 14 % rungoista. Lenkouden arvioinnin vastaavuus runkokohtaisesti eri menetelmillä oli melko hyvä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että puuluokan silmämääräisen arvioinnin tarkkuus TLS-aineistosta oli melko heikko. Lisäksi menetelmä on aikaa vievä ja

subjektiivinen, minkä vuoksi sillä ei todennäköisesti ole menestymisen mahdollisuuksia kehitettäessä laadun arviointia maastolaserkeilausaineistosta.

### 5.3 Laadun ennustaminen

Tutkimuksen toisena päätavoitteena oli tarkastella maastossa määritetyn puuluokan ennustustarkkuutta mitattujen ja niistä johdettujen puutunnusten avulla. Puuluokan ennustuksessa ei siten otettu huomioon runkovaurioiden, kuten korojen tai lenkouden esiintymistä rungoissa.

Luokittelun ennustaminen suoritettiin sekä maastoaineiston että TLS-aineiston perusteella. Ennustamiseen käytettiin lähimmän naapurin menetelmää, missä lähimpien naapurien etsintä suoritettiin Random Forest –menetelmän avulla. Tutkimuksessa oli varsin pieni otoskoko ( $n = 91$ ), mikä edellytti käyttämään vain pientä lukemaa lähimpiä naapureita ( $k$ ) arvioinnissa.  $K:n$  arvoksi valittiin kolme, mikä perustuu aiempaan tutkimustietoon (Vastaranta ym. 2013). Kaiken kaikkiaan 1000 regressiopuuta sovitettiin jokaiseen RF-ajoon, jotta saavutettaisiin lisää konsistenssia. Satunnaisuus otettiin huomioon ajamalla RF-menetelmä 50 kertaa ja lopullinen tulos oli keskimääräinen tulos näistä ajoista. Lopullisen luokittelun satunnaisuus arvioitiin vielä laskemalla Cohenin kappa-arvo.

Laadun ennustamista testattiin ensin vertailun vuoksi maastossa mitattujen puutunnusten avulla, jolloin puuluokkaa selittävinä muuttujina olivat puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta ja alimman kuivan sekä alimman tuoreen oksan korkeudet. Maastoaineiston perusteella päästiin 78,0 % luokittelutarkkuuteen (kappa-arvo 0,71). Kappa-arvon ollessa välillä 0,61 – 0,80 luokittelun yhtäpitävyyden voidaan sanoa olevan hyvä, toisin sanoen sattumalla ei ole kovin suurta vaikutusta luokitteluun (Landis ja Koch 1977). Muuttujista alimman kuivan oksan korkeus selitti ylivoimaisesti parhaiten puuluokkaa, mikä on loogista ottaen huomioon kuivaoksaisuusrajan merkityksen puuluokan määrittämisessä (Valtakunnan metsien...2009). Parempaan puuluokkaan ennustettiin menetelmällä 12,1 % ja huonompaan puuluokkaan 9,9 %. Ennustettujen puuluokkien moodi oli 5, eli sama kuin maastossa arvioitujen puuluokkien perusteella.

Kun lisättiin maastossa mitatuista tunnuksista johdetut puutunnukset ennustukseen, luokittelutarkkuutta saatiin parannettua 83,5 % (kappa-arvo 0,78). Paremmaksi puuluokaksi ennustettiin tässä tapauksessa 9,9 % ja huonommaksi 6,6 %. Puuluokkaa parhaiten selittävät tekijät olivat alimman kuivan oksan korkeus sekä oksattoman rungonosan suhde puun pituuteen. Oksattoman rungonosan suhteen laskennassa käytettiin sekä alimman kuivan oksan korkeutta että puun pituutta, näin ollen kuivaoksaisuusrajan merkitys korostui puuluokan ennustuksessa. Johdetuista muuttujista ylivoimaisesti heikoin selittäjä oli puun muotoluku. Myöskään muilla johdetuilla puutunnuksilla ei ollut selkeää merkitystä ennustuksen kannalta.

Maastolaserkeilauksen ennustustarkkuus puuluokalle määritettiin käyttämällä selitettävänä muuttujana maastossa määritettyä puuluokkaa sekä selittävinä muuttujina TLS-aineistosta mitattuja sekä näistä johdettuja puutunnuksia. Mitattujen muuttujien avulla ennustustarkkuudeksi saatiin 71,4 % (kappa 0,62). Parempaan puuluokkaan luokiteltiin 15,4 % ja huonompaan 13,2 %. Kappa-arvo oli tässäkin tapauksessa hyvän luokittelutarkkuuden sisällä, joskin sattumalla oli selkeästi suurempi vaikutus kuin vastaavasti maastoaineiston viiden muuttujan ennustuksessa. Parhaiten puuluokkaa selittävät muuttujat olivat tässä tapauksessa alimman kuivan oksan korkeus sekä rinnankorkeusläpimita. Maastoreferenssiin nähden rinnankorkeusläpimitalla oli suurempi painoarvo kuin pituudella TLS-ennustuksessa. Ennustettujen puuluokkien moodi, eli yleisin arvo, oli tässä tapauksessa 7, eli keskimäärin puusto arvioitiin heikompileatuiseksi kuin maastoarvioinneissa. Tämä johtui erityisesti alimman kuivan oksan mittaustarkkuudesta.

Lisättäessä johdetut puumuuttujat mukaan ennustukseen, tarkkuutta saatiin parannettua 78,0 % (kappa 0,71). Lukemat ovat samat kuin ennustettaessa maastoaineistosta mitattujen viiden muuttujan avulla. Näin ollen TLS-aineistosta tehtävässä viiden puuluokan ennustuksessa parhaassa tapauksessa päästiin maastoaineiston perusteella heikomman tuloksen antavaan ennustustarkkuuteen. Ennustettaessa TLS-aineistosta mitatuilla ja niistä johdetuilla puutunnuksilla parempaan puuluokkaan luokiteltiin 13,2 % ja huonompaan 8,8 %. Puuluokkien moodiksi saatiin 5. Parhaita selittäjiä olivat tässäkin yhdentoista selittäjän tapauksessa oksattoman rungonosan suhde puun pituuteen sekä alimman kuivan oksan korkeus.

Lopuksi tarkasteltiin vielä karkeammalla luokituksella hyvälaatuisten runkojen ja tukkipuulaatuisten runkojen ennustustarkkuutta jakamalla rungot puuluokkaryhmiin 1, 2 ja 3, joista ryhmä 1 kattoi hyvää tukkipuuta sisältävät puuluokat 5 ja 6, ryhmä 2 tukkipuulaatuiset puuluokat 7 ja 8 ja ryhmä 3 kuitupuulaadun. Tarkastelussa käytettiin selittäjinä 11 puutunnusta, jolloin TLS-aineiston perusteella ennustuksessa päästiin 86,8 % tarkkuuteen (kappa-arvo 0,74) ja maastoaineiston perusteella jopa 96,7 % tarkkuuteen (kappa-arvo 0,93).

Yhteenvedona laadun ennustuksesta mitattujen ja johdettujen tunnusten perusteella voidaan todeta, että kaikissa tarkastelluissa tilanteissa maastolaserkeilausaineiston perusteella ei päästy aivan samaan tarkkuuteen kuin ennustettaessa maastomittausten aineistoilla. Toisaalta laadun arvioinnin tarkkuus TLS-datasta karkealla tasolla on jo varsin lupaava käytettäväksi esimerkiksi referenssiaineistona lentolaserkeilaukselle. Ennustustarkkuutta saatiin parannettua ottamalla tarkasteluihin mukaan mitattujen tunnusten lisäksi johdettuja puutunnuksia, joista erityisesti oksattoman rungonosan suhteella oli merkitystä luokittelutarkkuuden kannalta. Luokittelutarkkuuden huonomuus TLS-aineiston perusteella johtui näin ollen erityisesti alimman kuivan oksan heikommasta mittaustarkkuudesta.

#### **5.4 Virhelähteitä ja muita havaintoja**

Laadun arviointi maastossa suoritettiin valtakunnan metsien inventoinnissa käytettyjen ohjeistusten mukaisesti. Laadun arvioinnissa keskityttiin erityisesti kuivaoksaus- ja latvusrajan arviointiin sekä muiden rungon vikaisuuksien, kuten korojen, lenkouden, mutkien ja haaraisuuden tarkasteluun. Mittaukseen liittyy aina mittaustarkkuuden ja mittausvirheiden aiheuttama epävarmuus, joka voi johtua satunnaisesta tai systemaattisesta virheestä (Kangas ym. 2003). Esimerkiksi Kiviluoman ja Uusitalon (1997) mukaan maastoarvioinneissa silmämääräisen kuivaoksarajan mittaustarkkuus antaa keskimäärin 0,5 – 1,1 metrin yliarvion ja latvusrajalla puolestaan 0,4 – 0,6 metrin yliarvion. Laatuluokituksen kannalta kuivaoksausraja oli merkittävin mitattava puutunnus. Yliarvio alimman kuivan oksan tarkastelussa vaikutti tässä tapauksessa puuluokan arviointiin sitä mahdollisesti parantaen.



Puuluokan arviointi maastossa oli subjektiivista. Tutkimuksessa runkojen puuluokituksen suoritti melko kokematon arvioija, mikä saattoi aiheuttaa systemaattista virhettä tuloksiin. Vainion (1980) mukaan rungon laatu arvioidaan maastossa monesti paremmaksi mitä todellisuudessa onkaan. Syynä tähän on tulkinnanvaraisuus esimerkiksi oksantynkien tai kuivien oksien koossa, jolloin tyviosa arvioidaan hyvälaatuista todellisuudessa paremmaksi. Maastossa suoritettavan puuluokituksen tarkkuutta olisi mahdollista parantaa koulutuksella. Niin ikään TLS-aineistosta tehtävän laadun silmämääräisen arvioinnin tarkkuuteen vaikutti arvioijan kokemus.

Leimikon maastolaserkeilaus toteutettiin 45 eri keilauspisteestä. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin puukohtaisesti yhdestä keilauksesta saatuja pisteaineistoja. Yhdestä pisteestä tehdyn keilauksen etuina on nopeus ja pistemäärän suhteellinen pienuus, mikä helpotti aineiston esikäsittelyä. Toisaalta haasteiksi voitiin nähdä katvealueet, joita muodostui esimerkiksi alikasvoksesta tai muista rungoista. Lisäksi yhdestä keilauksesta johtuen rungosta oli näkyvillä korkeintaan 50 % keilaussuunnasta katsottuna. Näin ollen kaikkia rungon vioiksi luokiteltuja tekijöitä ei ollut edes mahdollista tarkastella samalla tarkkuudella kuin maastomittauksissa, jolloin runkoa oli mahdollista tarkastella joka suunnasta. Muuttujien havainnointia olisikin mahdollista tarkentaa yhdistämällä useampia keilausaineistoja havainnoitavasta kohteesta. Tarkastellut puut rajattiin pisteaineistosta käsin ja muuttujien tarkastelu suoritettiin manuaalisella kartoituksella. Manuaaliset tarkastelut ovat subjektiivisia ja antavat jossain määrin heikompia tuloksia kuin automaattisilla menetelmillä tehdyt tarkastelut.

Lisäksi säätilalla saattoi olla vaikutusta maastolaserkeilauksen onnistumiseen, joskin aiempaa tutkimustietoa ilmiöstä ei ole esitetty. Tutkimuksessa käytettyjen maastolaserkeilausaineistojen hankinnan aikana vallitsi jokseenkin tuulinen kesäsää. Voimakkaalla tuulella saattoi olla vaikutusta esimerkiksi alimman tuoreen oksan havainnointitarkkuuteen; tuulisella säällä kuolleiden oksien heiluessa niihin osui mahdollisesti enemmän pisteitä, mikä saattoi saada ne vaikuttamaan eläviltä oksilta neulaspeitteineen.

## 5.5 Lisätutkimusaiheita

Tässä tutkimuksessa runkojen tarkasteluun käytettiin yhtä pistepilviaineistoa, mikä osaltaan aiheutti epävarmuustekijöitä mittauksen tarkkuuteen etenkin alimman kuivan oksan kohdalla. Kiinnostavaa olisikin tarkastella, voidaanko edellä mainitun tunnuksen mittaustarkkuutta parantaa yhdistämällä useita keilausaineistoja tarkasteltavasta kohteesta. Mikäli alimman kuivan oksan korkeuden mittaustarkkuus paranisi, sillä voisi olla vaikutusta myös puuluokan ennustustarkkuuteen. Tässä tutkimuksessa juuri kuivaoksausrajan mittauksen tarkkuus osoittautui heikkoudeksi laadun arvioinnin kannalta. Lisäksi olisi mielenkiintoista tarkastella automaattisen tulkinnan vaikutuksia puutunnusten mittaustarkkuuteen. Laatatunnuksista lenkous ja kuivien oksien koko voitaisiin ottaa tarkemmin huomioon esimerkiksi Liangin ym. (2013) automaattisen runkokäyrämallin ja Raamosen ym. (2013) automaattisen oksamallin avulla.

Tässä tutkimuksessa laatua arvioitiin mäntyrungosta ulkoisesti tarkasteltavissa olevien ominaisuuksien perusteella. Oksarajakorkeuksia pidetään merkittävimpinä puuaineen laatua ennustavina tekijöinä. Puuaineen laatu ei ole kuitenkaan yksiselitteisesti rungosta ulkoisesti tarkasteltavissa olevien ominaisuuksien perusteella selitettävissä. Erityisesti männyllä sydänpuun määrä on merkittävä tekijä puuaineen laadun kannalta etenkin puusepänteollisuudessa. Jatkotutkimuksissa olisikin mielenkiintoista perehtyä siihen, voidaanko maastolaserkeilausaineistosta löytää rungosta erityisiä piirteitä, joiden perusteella voidaan ennustaa männyn sydänpuun määrää. Tämä vaatisi kuitenkin kattavan ja yksityiskohtaisen aineiston, sillä sydänpuun määrän ennustuksessa pystyvuista tehtävillä mittauksilla on vielä nykyisellään haasteita (Luoma 2013). Yksityiskohtaiseen tietoon vaadittaisiin esimerkiksi kattava röntgenaineisto, josta voitaisiin tarkastella sydänpuun määrää eri osissa runkoa ja sitä kautta muodostaa mahdollisia yhteyksiä TLS-aineistosta tarkasteltaviin piirteisiin.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laserkeilausaineistoa hyödynnetään jo tällä hetkellä paljon metsätaloudessa. Suomen metsäkeskus vastaa yksityismetsien metsävaratiedosta, jonka tuottaminen perustuu nykyisin laserkeilausinventointiin. Tutkimustiedon karttuessa ja kaukokartoitusmenetelmien kehittyessä metsistä saadaan jatkuvasti tarkempaa tietoa niin puu- kuin metsikkötasolla. Paikkatieto- ja laserkeilaustekniikan hyödyntämisen myötä metsäsuunnitelmiakin voidaan jatkossa räätälöidä vastaamaan entistä paremmin kunkin metsänomistajan tarpeita.

Edellä mainitusta kehityksestä huolimatta inventointitiedon hankinnassa puuston laatua kuvaavan tiedon osalta on vielä kehitettävää. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että tiettyjä laatutunnuksia, kuten esimerkiksi oksarajoja voidaan tulkita jo melko hyvällä tarkkuudella. Myös silmämääräisesti määritettyjen puuluokkien tulkinta onnistuu kohtuullisesti (5 luokkaa) ja karkeammalla luokituksella (3 luokkaa) hyvin. Potentiaalisin lähitulevaisuuden käytännön sovellus onkin, että TLS-aineisto voi toimia referenssinä lentolaserkeilaukselle, sillä tähän tarkoitukseen karkeamman luokituksen tarkkuus vaikuttaa jo varsin lupaavalta.

Tässä työssä kuvattua laserkeilaukseen perustuvaa ennustemenetelmää edelleen kehittämällä ja integroimalla se osaksi metsäsuunnittelujärjestelmää, voitaisiin palvella sellaisia metsänomistajia, jotka haluavat markkinoida metsänsä tuotteita yksilöidysti esimerkiksi suoraan puusepänteollisuuteen. Tuote palvelisi laatupuun kasvattajia ja sellaisia metsänomistajia, jotka omatoimisella kaupalla haluavat saada puuyksilöille mahdollisimman korkean tuoton. Menetelmän mahdollisia hyödyntäjiä olisivat esimerkiksi monet yhteismetsät, joilla on usein laatupuun kasvatukseen ammattitaitoisia metsäammattilaisia palveluksessaan. Menetelmä auttaisi tunnistamaan jo kasvuvaiheessa metsikön laatupuut nykyistä tarkemmin.

Uusi eduskunnassa käsiteltävänä oleva metsälaki antaa tulevaisuudessa mahdollisuuden eri-ikäisrakenteiseen metsänkäsittelyyn. Tässä työssä käsitellyn menetelmän avulla voitaisiin kyseiseen metsänkäsittelyyn liittyviä poiminta- ja pienaukkohakkuuta kohdistaa juuri metsänomistajan kulloisiinkin tarpeisiin sopivasti. Puutavaran laatua tarkemmin ennustavia menetelmiä voitaisiin soveltaa entistä

enemmän myös metsäkiinteistön arvon määrittämiseen, jolloin metsästä saatavan puutavaran arvo voitaisiin entistä paremmin ottaa huomioon puukauppojen yhteydessä.

## LÄHTEET

Breiman, L. 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 2001, 45: 5–32.

Fagerstedt, K., Pellinen, K., Saranpää, P. ja Timonen, T. 2004. Mikä puu – mistä puusta. Helsingin yliopistopaino. 184s.

Falkowski, M., Hudak, A., Crookston, N., Gessler, P., Smith A. Landscape-scale parameterization of a tree-level forest growth model: A k-NN imputation approach incorporating LiDAR data. *Can. J. For. Res.* 2010, 40: 184–199.

Gjerdrum, P., Warensjö, M. ja Nylinder, M. 2001. Classification of crook typer for unbarked Norway spruce sawlogs by means of a 3D log scanner. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59 (2001): 374-379.

Halinen, M., 1985. Männyn nuoruusvaiheen kasvunopeuden vaikutus sahatavaranlaatuun. *Silva Fennica* Vol. 19 (4): 377-385.

Henning, J.G., ja Radtke, P. J. 2006. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, Vol. 52, No. 1: 67-80.

Holopainen, M., Hyypä, J. ja Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5. 76s.

Hujo, S ja Poikela, A. 2008. Puutavaralajien laatuvaatimukset. Teoksessa Tapion taskukirja, 25. uudistettu painos. Metsäkustannus Oy ja metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. s. 379-383.

Jalkanen, A., 2001. The probability of moose damage at the stand level in southern Finland. *Silva Fennica* 35(2): 159-168.

- ja Mattila, U., 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management* 135: 315-330.

Kangas, A., Päivinen, R., Holopainen, M. ja Maltamo, M. 2003. *Silva Carelica* 40 – Metsän mittaus ja kartoitus. Joensuun yliopistopaino 2003. 228s.

Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H. ja Alho, P. 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75/2013:64-75.

Kantola, A. ja Pennanen, O., 1999. Metsänhoidollisen ympäristön vaikutus mäntysahapuun laatuun. Metsätehon raportti 69. Metsäteho Oy. 22s.

Kaskinen, Juha. 2012. Hämeen ammattikorkeakoulu, metsätyönjohtaja. Suullinen tiedonanto.

Kellomäki, S. 1983. Männyn oksien murtolujuus. *Silva fennica* 1983, vol n:o 2: 175-182.

- Ikonen, V-P., Peltola, H. ja Kolström, T. 1999. Modelling the structural growth of Scots pine with implications for wood quality. *Ecological Modelling*, Volume 122, Issues 1-2: 117-134.

Kiviluoma, P. ja Uusitalo, J., 1997. Männyn kuivaoksa- ja latvusrajansilmävaraisen arvioinnin tarkkuus. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia* 4/1997: 505-512.

Korpela, I. 1997. Metsänmittauksen perusteet – luentojakso, MAA20.335 TKK-RM 17.3. – 28.4.1997. [Luentojakso 28.4.1997] saatavissa: <http://www.helsinki.fi/~korpela/tkk.html>. [Viitattu 15.8.2013].

Kujala, V. 1958. Männyn suku. Teoksessa *Suuri kasvikirja I*. Toimittanut Jalas, J. Otava. s. 142-152.

Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus Oy. Hämeenlinna. 468s.

- 1984. Puutavaran mittauksen perusteet. Helsingin yliopiston monistuspalvelu. 252s.
- 1980. Mäntytukkirunkojen laatuluokitus. Summary: Grading of pine sawlog stems. Metsäntutkimuslaitos. 152s.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.

Landis, R ja Koch, G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159–174.

Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Sveitsi. Leica HDS6100, Latest generation of ultra-high speed laser scanner. 2009. [Esite 2009] saatavissa: <http://archive.cyark.org/temp/LeicaHDS6100brochureus.pdf>. [Viitattu 15.10.2013]

Liang X., Kankare V., Yu X., Hyyppä J. ja Holopainen M. 2013. Automated Stem Curve Measurement Using Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. In press.

Liang, X. ja Hyyppä, J. 2013. Automatic Stem Mapping by Merging Several Terrestrial Laser Scans at the Feature and Decision Levels. *Sensors* 2013, 13, 1614-1634.

Liang, X., Litkey, P., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Kukko, A. ja Holopainen, M. 2011. Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(2): 37–48.

Lukkarinen E., Keskinen S. ja Pennanen O. 1998. Tukkien laatukriteerit ja apterauksen arvoperusteet. *Metsätehon raportti 65*. Metsäteho Oy. 34s.

Luoma, V. 2013. Malli männyn sydänpuun läpimitan ja tilavuuden ennustamiseksi. Maisterin tutkielma. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. 48s. Painossa.

Maas, H.-G., Bienert, A., Scheller, S. ja Keane, E. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1579–1593.

Malinen, J., Berg, V. ja Kilpeläinen, H. 2010. Roundwood pricing mechanisms and their performance in Scots pine roundwood markets. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 174. 35s.

Metsäntutkimuslaitos. 2012a. Metsätilastollinen vuosikirja 2012. Toimittanut Ylitalo, E. 325s.

- 2012b. Laatuksavatus – puuntuottajan ja puunkäyttäjän yhteinen asia. [Verkkajulkaisu 12.10.2012]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/uutiskirje/puu/2012-03/uutinen-2.html> [Viitattu 10.10.2013]

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 2006. Hyvän metsänhoidon suositukset. Metsäkustannus Oy. 59s.

Moskal LM ja Zheng G. 2011. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing* 4: 1–20.

Nevalainen, S. 1999. Gremmeniella abietina in Finnish *Pinus sylvestris* stands in 1986-1992: a study based on the national forest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14(2):111-120.

Nykänen, M-L., Peltola, H., Quine, C.P., Kellomäki, S. & Broadgate, M., 1997. Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fennica* 31(2): 193-213.

Parviainen, J. ja Västilä, S., 2011. Suomen metsät 2011 kestävän metsätalouden kriteereihin ja indikaattoreihin perustuen. Maa- ja metsätalousministeriö ja Metsäntutkimuslaitos. 96s.

Piira, T., Kilpeläinen, H., Malinen, J., Wall, T. ja Verkasalo, E., 2007. Leimikon puutavaralaji-kertymän ja myyntiarvon vaihtelu erilaisilla katkontaohjeilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2007: 19-37.

Raumonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M. ja Lewis, P. 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sens.* 5/2013:491-520.

Reinikainen, J. ja Sassali, J. 2013. Journal Citation Reports. Tutkimuksen työkalupalkki. Oulun yliopisto. [Verkkajulkaisu 6.6.2013] saatavissa: <https://wiki oulu.fi/display/jotut/1.3.1.7.01+Journal+Citation+Reports> [Viitattu 11.10.2013]

Rouvinen, S., Kangas, A. ja Maltamo, M. 1997. Männikön laatujauman kuvaaminen oksarajatiedon avulla kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia* 4/1997: 477-492.

Räsänen, T. ja Lukkarinen, E. 1998. Puuston ennakkotiedon hankintamenetelmät ja käyttö. *Metsätehon raportti* 43. Metsäteho Oy. 45s.

STMY. 1994. Pohjoismainen sahatavara – lajitteluohjeet. Mänty- ja kuusisahatavaran lajitteluohjeet. Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys (STMY), Suomi; Föreningen Svenska Sågverksmän (FSS), Ruotsi; Treindustriens Tekniska Forening (TFF), Norja. Gummerus Kirjapaino Oy, 1. painos. 64s.

Vainio, M. 1980 Mäntysahatukkien laatuokitus pystymittauksen yhteydessä ja laatujaumat erilaisissa leimikoissa. Helsingin yliopisto. Metsäteknologian laudaturtyö yleistä metsäntutkimusta varten. 59s.

Valtakunnan metsien 11. inventointi. 2009. Maastotyöohje. Koko Suomi. Metsäntutkimuslaitos. 2. painos. 122s.



Vastaranta, M., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Wulder, M., Hyypä, J. ja Hyypä, H. 2013. Area-Based Mapping of Defoliation of Scots Pine Stands Using Airborne Scanning LiDAR. *Remote Sens.* 2013, 5: 1220-1234

Vastaranta, M., Melkas, T., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2009. Laser-based field measurements in tree-level forest data acquisition. *Photogrammetric journal of Finland*, 1/2009:51-61.

Vauhkonen, J., Kankare, V., Tanhuanpää, T., Holopainen, M. ja Vastaranta, M. 2013. Puuston runkolukusarjan ja laatutunnusten mittaus kaukokartoituksella – Esiselvitys ja käytännön testi. *Metsätehon raportti 223*. 33s.

Väisänen, E. 2006. Tukkikokoisen männyn kuivaoksarajan vaihtelu Suomessa. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, metsävarojen käytön laitos. 45s.

## LIITTEET

Puuluokituksen perustana on lopputuotelähtöinen apteeraus, jossa männyn tukkirungot pyritään jakamaan osiin oksattoman puusepänlaadun, eläväoksaisen huonekalulaadun tai kuivaoksaisen rakennuslaadun mukaan.

Laatuluokat ovat 1 oksaton (yleensä tyvi), 2 eläväoksainen (yleensä latva) ja 3 kuivaoksainen (yleensä välitukki tai tyvi).

### Liite 1. Tukkipuun määrittämisen puuluokkajako

- 5 Hyvä tukkipuu. Puu sisältää laatuluokkaa 1 olevan tukin, ja tukkipuun osasta vähintään 80 % on tukkia.
- 6 Vikainen hyvä tukkipuu. Puu sisältää laatuluokkaa 1 olevan tukin, mutta tukkipuun osasta on alle 80 % tukkia.
- 7 Tukkipuu. Puun tukkipuun osasta vähintään 80 % on tukkia. Puu ei sisällä laatuluokkaa 1 olevaa osaa.
- 8 Vikainen tukkipuu. Puun tukkipuun osasta on alle 80 % tukkia. Puu ei sisällä laatuluokkaa 1 olevaa osaa.
- 9 Iso kuitupuu. Puu on tukkipuun, mutta vikojen tai teknisen laadun vuoksi ainakin toistaiseksi kuitupuu.

### Liite 2. Puuluokan tarkennus puuluokille 6 – 9.

Puuluokille 6, 8 ja 9 määritetään pääasiallinen puun laatua alentava syy.

- Puuluokka ei ole 6, 8 tai 9.
- 1 Tuore oksa, yleinen oksaisuus
- 2 Kuiva-, laho- tai poikaoksa, oksakyhmyt tai -reiät
- 3 Mutka, mutkaisuus
- 4 Lenkous
- 5 Haara, haaraus
- 6 Laho
- 7 Runkovaurio
- 9 Muu vika tai vaurio

### Liite 3. Tukin minimikoko

Tukin minimikoko	Laatuluokka		
	1	2	3
Minimikoko, dm * cm	40 * 15	40 * 15	40 * 15
Poikkeusmitat <sup>1)</sup> , dm * cm	31 * 20	31 * 20	37 * 20

<sup>1)</sup> Poikkeusmittoja käytetään esimerkiksi:

- erottamaan 1- ja 2-laatuluokan tukit 3-luokan tukista
- välttämään vikaisuuden tulo tukin latvaan
- välttämään lenkoutta

### Liite 4. Suurin sallittu oksa eri laatuluokissa

Suurin sallittu oksa	läpimitta vian kohdalla, cm	Laatuluokka		
		1	2	3
Tuore oksa, mm	< 20	10	50	50
	20 - 30	15	60	60
	≥ 30	15	70	70
kuiva oksa, mm		15	15 (40) <sup>1)</sup>	40
pystyoksa, mm		Ei sallita	Ei sallita	40
Laho oksa, mm		Ei sallita	Ei sallita	30

<sup>1)</sup> Sallitaan yksittäisinä normaalimittaisen tukin tyviosassa. Elävän latvuksen sisällä tai välittömästi sen alapuolella oleva oksa, jossa ei ole eläviä neulasia (kuollut oksa), on sahatavarassa usein tuore oksa

### Liite 5. Suurin sallittu vika eri laatuluokissa.

Suurin sallittu vika	Laatuluokka		
	1	2	3
Vika			
Tasainen lenkous, cm/m			
läpimitta < 30 cm	1	1	1
läpimitta ≥ 30 cm	1,5	1,5	1,5
Oksakyhmy	Ei sallita	pieniä sallitaan	
Tervasroso, < puolet piiristä	Ei sallita	sallitaan latva- lieriön ulkopuolella	
Muu tekninen vika	Ei sallita	--	