



Luonnonvara- ja  
biotalouden  
tutkimus 75/2016

# Lentolaserkeilaukseen ja Trestima- menetelmään perustuvien puusto- tunnusten hyödyntäminen puutavaralaji- ja rungonosahinnoittelumenetelmien vertailussa

Heikki Korpunen, Mikko Vastaranta, Jouni Siipilehto, ja Jori Uusitalo

# **Lentolaserkeilaukseen ja Trestima- menetelmään perustuvien puusto- tunnusten hyödyntäminen puutavara- laji- ja rungonosahinnoittelu- menetelmien vertailussa**

Heikki Korpunen, Mikko Vastaranta, Jouni Siipilehto ja Jori Uusitalo



ISBN: 978-952-326-343-7 (Painettu)

ISBN: 978-952-326-344-4 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-344-4>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Heikki Korpunen, Mikko Vastaranta, Jouni Siipilehto ja Jori Uusitalo

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2016

Julkaisuvuosi: 2016

Kannen kuva: Erkki Oksanen / Luke

Painopaikka ja julkaisumyynti: Juvenes Print, <http://luke.juvenesprint.fi>

# Tiivistelmä

Heikki Korpunen<sup>1)</sup>, Mikko Vastaranta<sup>2)</sup>, Jouni Siipilehto<sup>3)</sup> ja Jori Uusitalo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Kaironiementie 15, 39700 Parkano

<sup>2)</sup>Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto

<sup>3)</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

Rungonosahinnoittelu on uusi vaihtoehto puukauppamenetelmäksi perinteisen puutavaralajimenetelmän rinnalle. Rungonosahinnoittelussa puu jaetaan rungon läpimitan mukaan osiin, ja jokaiselle osalle on määritetty kuutiometriperusteinen yksikköhinta. Merkittävin ero puutavaralajimenetelmään on, että puun ostaja saa katkoa rungon vapaasti haluamiinsa pituuksiin, koska puun myyjä saa kantorahan rungonosien tilavuuksien ja yksikköhintojen tulon perusteella, eikä katkotun puutavaran mukaan.

Puukauppaan liittyvä päätöksenteko perustuu nykyisin suurilta osin kaukokartoituksen avulla tuotettuun metsävaratietoon tai leimikolta tehtyihin ennakkomittauksiin. Tässä tutkimuksessa selvitettiin lentolaserkeilaukseen (Airborne laser scanning, ALS), sekä Trestima-sovelluksen käyttökelpoisuutta puukauppatilanteen hakkuukertymien arviointiin puutavaralaji- ja rungonosahinnoittelumenetelmillä. Tutkimuksessa laskettiin kokonaiskantorahatulot seitsemälle leimikolle käyttäen ennakkomittauksina sekä ALS- että Trestima-aineistoihin perustuvia puustotulkintoja ja kauppamenetelmänä rungonosahinnoittelua ja puutavaralajimenetelmää. Rungonosahinnoittelun yksikköhinnat pyrittiin määrittelemään siten, että leimikoiden keskimääräiset hinnat olisivat mahdollisimman lähellä puutavaralajihinnoittelua.

Kaukokartoitus- ja ennakkomittausten epätarkkuudet erityisesti runsaspuustoisissa sekametsissä aiheuttivat virhearvioita kantorahatuloennusteisiin sekä ALS- että Trestima-aineistoihin perustuvia puustotulkintatietoja käytettäessä. Tässä tutkimuksessa käytettyjen rungonosa- ja puutavaralajihinnoittelumenetelmien ja niissä käytettyjen hintojen perusteella, ero kahden hinnoittelumenetelmien välillä oli noin kaksi prosenttia koko leimikkoaineistossa. Tulosten perusteella rungonosaluokkien hintojen onnistunut asettaminen onkin tärkeää, jotta teollisuuden puustamaksukyvyssä ei tapahdu vinoutumia, joissa jokin puunjalostuslaitos joutuu maksamaan puun käyttöarvoon nähden liian suurta hintaa. Puusta maksetaan toteutuneen hakkuun mukaan, joten ennakkomittausten virheet aiheuttavat enemmän ongelmia puun ostajalle, mikäli ennakkotiedon perusteella halutaan suunnitella tuotantoa.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella suurin osa rungonosahinnoittelun riskeistä on metsäteollisuudella. Toisaalta puuta jalostavien yritysten elinvoimaisuuden kannalta olisi tärkeää, että puukauppa on jatkuvaa ja sekä myyjä että ostaja kokevat kantohinnat tasapuolisina, mikä tämän tutkimuksen tulosten perusteella on täysin mahdollista. Menetelmän läpinäkyvyys ja informaation jakaminen ovat avainasioita, mikäli rungonosahinnoittelua aiotaan käyttää laajemmin puukaupassa.

Asiasanat: Rungonosahinnoittelu, Puutavaralajihinnoittelu, ALS, Trestima,

# Sisällys

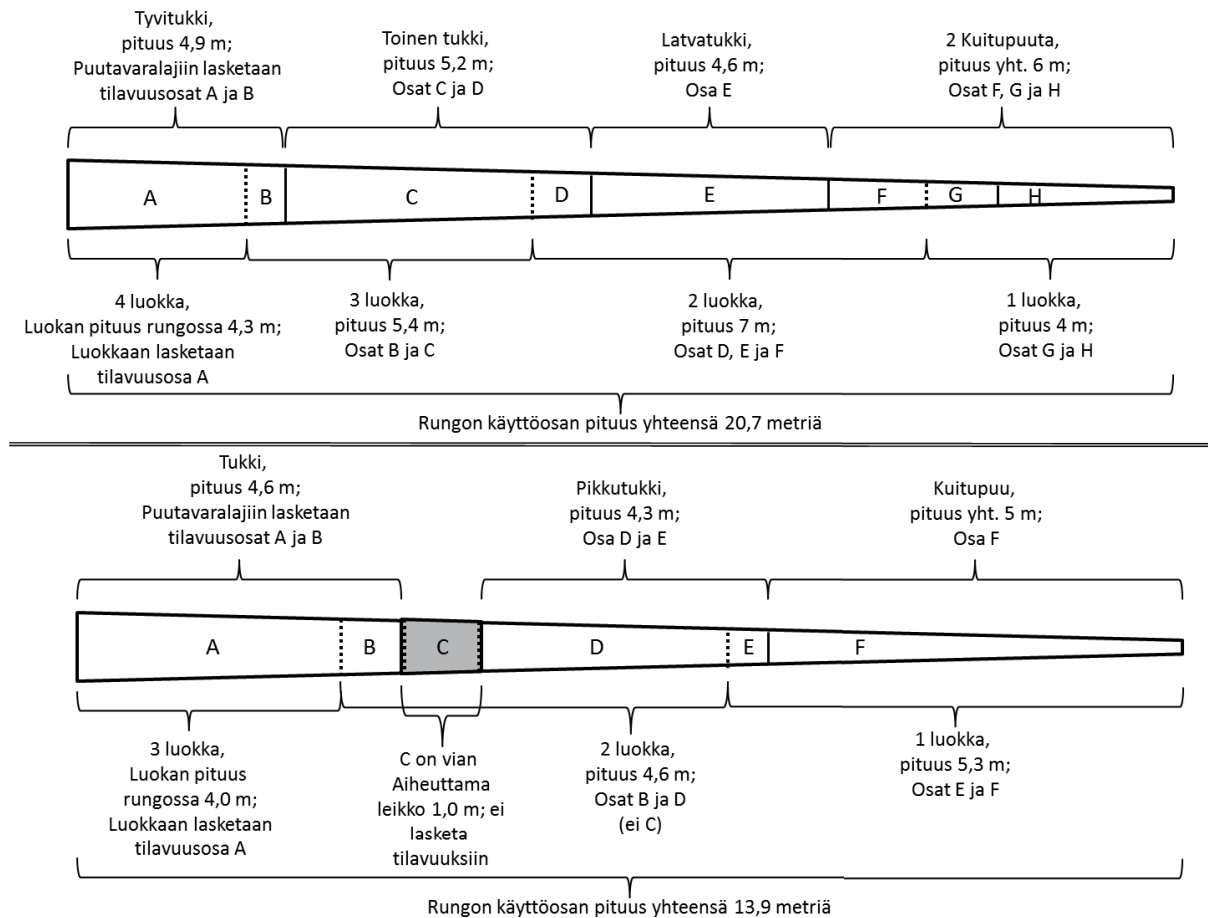
<b>1. Johdanto .....</b>	<b>6</b>
1.1. Puukauppamenetelmät Suomessa .....	6
1.2. Hakkuukertymien arviointi puukauppaa varten .....	7
1.3. Tutkimuksen tavoite .....	9
<b>2. Aineisto ja menetelmät .....</b>	<b>10</b>
2.1. Tutkimusalue ja aineistojen keruu .....	10
2.2. Vertailuaineiston muodostaminen hakkuukoneen mittalaitteen avulla kerätyistä puutiedoista .....	10
2.3. Puulajeittaisten puustotunnusten mittaaminen Trestima-sovelluksella .....	11
2.4. Puulajeittaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksen, vanhan kuviotiedon ja maastokoealojen avulla. ....	11
2.5. Puutavaralajien kertymien ja rungonosien tilavuuksien laskenta puulajeittaisista puustotunnuksista .....	11
2.5.1. Puutavaralajien ja rungonosien hintojen määrittely laskentaa varten .....	12
<b>3. Tulokset .....</b>	<b>14</b>
3.1. Ennakkomittausten ja hinnoitteluvaihtoehtojen vertailu.....	16
<b>4. Tulosten tarkastelu.....</b>	<b>18</b>
<b>5. Johtopäätökset.....</b>	<b>20</b>
<b>Viitteet.....</b>	<b>21</b>

# 1. Johdanto

## 1.1. Puukauppamenetelmät Suomessa

Vuotuinen hakkuumäärä Suomessa oli vuonna 2014 lähes 56 miljoonaa kuutiometriä (Ruoka- ja luonnonvarojen e-vuosikirja 2015). Vuonna 2015 mäntykuitupuuta korjattiin metsistä eniten eli 15,3 miljoonaa kiintokuutiometriä. Toiseksi tärkein puutavaralaji oli kuusitukki 12,6 miljoonan ja kolmantena mäntytukki 10,5 miljoonan ja neljäntenä kuusikuitupuu 8,5 miljoonan kuution vuotuisella korjuumäärillä (Ruoka- ja luonnonvarojen e-vuosikirja 2015). Suurin osa hakkuista tehdään nykyään täysin koneellisena, eli hakkuukone karsii ja katkoo puut metsässä, josta metsätraktori kuljettaa pölkkyt tien varteen kaukokuljetusta varten, samalla perinteisen moottorisahahakkuun osuus on laskenut alle prosenttiin kokonaispuunkorjuumäärästä. Pääosa puukaupoista tehdään pystykauppoina, jolloin puun ostaja huolehtii puun korjuusta ja puun kaukokuljetuksesta tuotantolaitoksille. Toinen kauppatapa on hankintahakkuu, jossa puun myyjä vastaa puun korjuusta, ja ostaja puun kaukokuljetuksesta. Pystykauppojen osuus oli noin 85 % vuonna 2013 tehdyistä puukaupoista (Metsätilastollinen vuosikirja, 2014). Pystykaupassa puun ostaja voi katkoa puut metsässä haluamiinsa pituus- ja läpimittayhdistelmiin, eli puutavaralajeihin, noudattaen kuitenkin kauppakirjassa sovittuja mitta- ja laatuvaatimuksia. Mitta- ja laatuvaatimusten muutoksista ja niiden mahdollisista vaikutuksista hintoihin on sovittava puun myyjän kanssa erikseen, mikäli niitä halutaan muuttaa kaupanteon jälkeen ennen hakkuuta.

Rungonosahinnoittelumenetelmä on pyritty tuomaan puukauppajärjestelmää uudistavaksi tekiäksi. Vuonna 2014 Maa- ja metsätalousministeriön puukaupparyhmä esitti rungonosahinnoittelumenetelmän käyttökelpoisuuden selvittämistä nykyisessä puukauppaympäristössä. Rungonosahinnoittelu eroaa puutavaralajihinnoittelusta siten, että rungon katkontaa ja hinnoittelua ei ole kiinteästi kytketty toisiinsa. Puun runko jaetaan läpimittojen perusteella osiin, joille kullekin on määritelty omat yksikköhintansa. Puun myyjälle maksetaan läpimittaositteiden ja yksikköhintojen perusteella. Puun rungon on kuitenkin täytettävä minimirunkovaatimus, eli rungosta on voitava katkoa vähintään yksi ainespuun laatuvaatimukset täyttävä pölkky. Vastaavasti, mikäli rungosta haluaa saada parhaimman hintaluokan ositetta, on siitä voitava katkoa vähintään yksi saha- tai vaneritukki. Kunhan ehdot täyttyvät, puun myyjä saa maksun rungon ositteiden tilavuuksien ja yksikköhintojen tulona riippumatta siitä, millaisia katkontamittoja puun korjuussa käytetään. Rungonosahinnoittelun perustaksi on ehdotettu neljää läpimittaositetta männylle, kuuselle ja koivulle, minimirungon pituudeksi 2,7 metriä ja minimitukkirungon vähimmäispituudeksi 3,7 metriä. Kuvassa 1 kaksi esimerkkiä rungonosahinnoittelun soveltamisperiaatteesta sekä siitä, miten eri hinnoittelumenetelmissä rungon samat tilavuusosat lasketaan kuuluvaksi puutavaralajeille tai rungonosaluokille.



**Kuva 1.** Kaksi esimerkkiä rungonosahinnoittelusta (esitetty runkojen alapuolella) verrattuna puutavaralajikatkontaan (runkojen yläpuolella). Rungon pitkittäisleikkauksessa katkoviiva kuvaa rungonosan luokan minimilämpimittarajaa ja yhtenäinen viiva pölkyn katkaisukohtaa.

Hinnoittelumenetelmä ei varsinaisesti ole tällä hetkellä käytössä Suomessa, mutta samantyyppistä runko- tai osarunkohinnoittelua käytetään jonkin verran. Runkohinnoittelussa käytetään yhtä kuutiometrihintaa puulle ja ostaja saa katkoa rungon vapaasti haluamiinsa mittoihin. On huomattava, että rungon katkonta ei välttämättä muutu, vaikka hinnoittelu tapahtuu runko- tai rungonosamenehtelmällä. Rungonosahinnoittelun tarkoituksena on kuitenkin antaa enemmän vapautta katkontaan, jolloin jatkojalosteiden markkinatilanne on mahdollista huomioida paremmin. Malisen ym. (2011) tutkimuksessa selvitettiin lopputuotemarkkinoiden muutoksen vaikutusta puutavaralajin käyttöarvoon ja huomattiin, että esimerkiksi 20 %:n alennus lopputuotteen hinnassa aiheutti 20–50 %:n käyttöarvon alenemisen, riippuen puutavaralajista. Vastaava reaktio tapahtui käännteisenä, kun lopputuotteiden hintaa korotettiin. Tästä voidaan päätellä, että siirtyminen entistä enemmän kohti reaaliaikaista ja markkinahintaperusteista katkonnanohjausta voisi lisätä tuotannon arvoa yli koko tuotantoketjun.

## 1.2. Hakkuukertymien arviointi puukauppaa varten

Puukauppaa varten hakattavaksi suunnitellun leimikon ominaisuuksista tarvitaan ajantasaista tietoa. Puukauppaan liittyvä päätöksenteko perustuu nykyisin suurilta osin kaukokartoituksen avulla tuotettuun metsävaratietoon tai leimikolta tehtyihin ennakkomittauksiin. Metsävaratietoa tuotetaan julkisin varoin ja sen hyödyntäminen on yksityisille metsänomistajille ilmaista. Metsävaratiedon tuottamisessa hyödynnetään laserkeilaukseen, ilmakeilaukseen ja tarkasti mitattuihin maastokoealoihin perustuvaa

puustotulkintamenetelmää (kts. Næset 2002, Suvanto ym. 2005, Holopainen ym. 2013). Puustotulkintamenetelmässä inventoitavalta alueelta kerätään ensin laserkeilausaineisto ja ilmakuvat. Sitten kaukokartoitusaineistojen ja olemassa olevan vanhan metsävaratiedon avulla alueelle sijoitellaan maastokoealoja. Tämän jälkeen laseraineistosta lasketaan metsikön pituutta, pituusvaihtelua ja tiheyttä kuvaavia tunnuksia koko alueen kattavaan hilaruudukkoon sekä täsmälleen maastokoealojen alueelle. Vastaavasti ilmakuvilta lasketaan sävyarvotunnuksia, joilla pyritään tarkentamaan puulajeittaisten puustotunnusten ennustamista (esim. Packalen ym. 2009). Lopulta laaditaan puulajeittaisille puustotunnuksille ennustemallit, jotka perustuvat kaukokartoitusaineistoista laskettuihin tunnuksiin. Ennustemalleilla puustotunnukset ennustetaan koko inventoitavalle alueelle. Laserkeilaukseen perustuva puustotulkintamenetelmä on otettu operatiiviseen käyttöön kaikissa keskeisissä metsäorganisaatioissa, eli Suomen Metsäkeskuksessa, joka vastaa yksityismetsien metsävaratiedosta, Metsähallituksessa sekä laajoja metsäalueita omistavissa yrityksissä. Yksityismetsien inventointi laserkeilaukseen perustuen alkoi Suomessa operatiivisesti vuonna 2010. Yksityismetsiin metsävaratietoa tuotetaan kaukokartoitustulkinnalla inventointialueittain ja yhden inventointialueen alueen kokosuositus on noin 100 000–200 000 ha (nettoala), josta kaukokartoitettava alue (bruttoala) on yleensä noin kaksinkertainen. Puustotulkintamallien laatimiseksi inventointialueelta mitataan n. 500–700 ympyräkoelaa. Inventointikierto on n. 10 vuotta ja välivuosille metsävaratieto ajantasaistetaan laskennallisesti.

Ilmaisen metsävaratiedon lisäksi metsänomistaja voi ostaa tilakohtaisen metsäsuunnitelman. Metsäsuunnitelma sisältää metsänomistajan tavoitteiden mukaiset toimenpide-ehdotukset ja niitä vastaavat metsätilan kehitysennusteet. Tilakohtainen metsäsuunnitelma voi perustua ilmaiseen metsävaratietoon, joka tarkistetaan maastossa, tai perinteiseen kuvioittaiseen arviointiin.

Leimikon ennakkomittaus perustuu metsikön kuviokohtaiseen arviointiin, jonka perusteella voidaan tarkemmin arvioida kuvion puumääriä ja puulajisuhteita. Kuvioittaisen arvioinnin tulokset voidaan laskea ja analysoida esimerkiksi tietokoneohjelmalla, joka laskee tulokset tehtyjen mittausten perusteella. Yhtenä esimerkkinä metsänmittausohjelmasta on EMO-ohjelmisto, jolla voidaan laskea puumäärien lisäksi esimerkiksi puutavaran laatuennusteita (Uusitalo, 1995, Uusitalo & Kivinen, 1998). Ennakkomittausmenetelmissä metsikkökuvioilta mitataan yleensä puuston pohjapinta-ala ja pohjapinta-alan mediaanipuun pituus. Myös muita täydentäviä mittauksia voidaan tehdä. Esimerkiksi puun kuivaoksarajoja voidaan arvioida puun laadun ennustamiseksi. Mittausohjelmat hyödyntävät matemaattisia malleja, joilla mitattujen puustotunnusten perusteella ennustetaan sekä läpimittattua pituusjakaumat ja edelleen puuston tilavuudet (Uusitalo & Kivinen, 1998). Ennakkomittausmenetelmiä on pyritty kehittämään helppokäyttöisiksi ja laskenta mahdollisimman automaattiseksi, jotta mittaus- ja laskenta nopeutuisivat ja edellyttäisivät entistä vähemmän erikoisosaamista. Tästä yhtenä esimerkkinä on älypuhelimien kameralla otettuihin kuviin perustuva Trestima-sovellus (Rouvinen, 2014, Vastaranta ym. 2014).

Kaukokartoituksella tuotettu metsävaratieto, erillistä metsäsuunnitelmaa varten kerätty metsävaratieto tai leimikon ennakkomittauksessa kerätty metsävaratieto sisältää tiedon puulajeittaisista puustotunnuksista eli runkoluvusta, pohjapinta-alasta, mediaanipuun läpimitasta ja -pituudesta (tai pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ja pituus). Näistä lähtötiedoista lasketaan leimikoille metsäsuunnittelunlaskentajärjestelmillä puutavaralajien kertymät, joita tarvitaan puukauppatilanteessa. Laskentamenetelmässä hyödynnetään läpimittajakaumaa. Ensiksi menetelmässä leimikoille ennustetaan läpimittajakaumien parametrit olemassa olevilla malleilla (esim. Kilkki ym. 1989, Siipilehto 1999, Siipilehto ja Mehtätalo 2013). Tämän jälkeen leimikon läpimittajakaumaa hyödyntäen leimikon puusto jaetaan läpimittaluokkiin ja jokaiselle läpimittaluokalle lasketaan sen edustama osuus leimikon runkoluvusta. Jokaisesta läpimittaluokasta valitaan kuvauspuu, jolle mallinnetaan pituus (esim. Veltheim 1987, Siipilehto 1999, Mehtätalo 2004), sekä lasketaan runkokäyräyhtälöiden avulla puutavaralajien kertymät. Leimikon puutavaralajien kertymät saadaan laskemalla läpimittaluokittaisten kuvauspuiden puutavaralajien kertymät yhteen ja skaalamalla ne leimikkokohtaisiksi läpimittaluokittaisten runkolukujen avulla. Tässä nimenomaisessa tutkimuksessa käytettiin Siipilehdon ja Mehtätalon



(2013) parametrien palautusmenetelmää läpimittajakauman ennustamiseksi, Siipilehdon ja Kankaan (2015) pituusmalleja ja Laasasenahon (1982) runkokäyrämalleja.

Kun metsänomistaja alkaa suunnitella puukauppaa, hänellä täytyy olla perustietoa metsiensä rakenteesta. Tätä metsävaratietoa on tarjolla joko kolmannen osapuolen palvelussa (esimerkiksi metsään.fi) tai tilakohtaisessa metsäsuunnitelmassa. Leimikoiden hakkuujärjestystä voidaan suunnitella metsäsuunnitelman perusteella, mutta jos suunnitelman teosta on jo kulunut paljon aikaa, ominaisuuksiedot eivät välttämättä tue parhaalla mahdollisella tavalla puukauppaan liittyvää päätöksentekoa. Mikäli muiden, yleensä sähköisten palveluiden metsävaratietoa ei joko haluta tai osata käyttää, ollaan tilanteessa, jossa puun myyntimääriä on arvioitava ja suunniteltava muilla tavoilla.

Jos myyntiaikeissa olevalla metsänomistajalla ei ole tietoa leimikoista, hän voi pyytää ulkopuolista tahoja, esimerkiksi metsänhoitoyhdistystä tai metsäpalveluyrittäjää, suunnittelemaan ja toteuttamaan puukaupan ennakkomittauksineen ja tarjouspyyntöineen. Tällöin puun myyjä voi antaa ostajille oikeuden käyttää sähköisiä metsävaratietoja. Puunhankintaorganisaatioiden edustajat voivat myös tehdä arviokäynnin ennen tarjousten tekoa, jolloin leimikon ja puuston ominaisuuksia voidaan verrata hinnoitteluperusteisiin. Leimikoiden ennakkomittauskäynneistä koituu kustannuksia, jotka maksetaan puun arvoketjusta.

Metsänomistajan omatoimista mittausta tukemaan on kehitetty työkaluja, joiden käyttämiseen ei tarvitse erikoiskoulutusta tai -osaamista. Trestima-ohjelma on tarkoitettu käytettäväksi älypuheliin ladatulla sovelluksella, jonka avulla puhelimen kameralla metsästä otetut kuvat tulkitaan ja niistä lasketaan puulajeittaiset puustotunnukset, kuten runkoluku. Mittaus tapahtuu siten, että älypuhelimien kameralla otetaan leimikossa vapaavalintaisissa kohdissa vaakasuuntaisia kuvia, joiden perusteella arvioidaan puulajeittaiset pohjapinta-alat. Lisäksi puuston keskipituuden arvioimiseksi on otettava pystysuuntaisia kuvia, joissa koeputista näkyvät sekä tyvet että latvat. Trestima-sovelluksen tulosten tarkkuus riippuu metsiköstä otettujen kuvien määrästä, joten tarkemman tiedon hankkiminen edellyttää pidempää kävelylenkkiä metsässä (Vastaranta ym. 2015).

Erilaisia päätöksenteon tukivälineitä löytyy siis runsaasti puukaupanteon avuksi. Erilaisten puukauppatapojen ja mittausmenetelmien keskinäinen vertailu on hankalaa, koska puukaupassa tehtävät ratkaisut ovat aina lopullisia eikä uusintamahdollisuutta käytännössä ole. Tutkimuksilla voidaan kuitenkin arvioida erilaisten valintojen lopputuloksia.

### 1.3. Tutkimuksen tavoite

Tässä työssä vertaillaan kahdella eri menetelmällä, ALS-lentolaserkeilauksella ja Trestimakuvatulkinnalla ennustettujen puulajeittaisten puustotunnusten soveltuvuutta leimikon puutavaralajien kertymien ja kantorahatulujen laskentaan. Lisäksi työssä selvitettiin, kuinka suuri taloudellinen riski metsänomistajalle voi koitua, mikäli hän valitsee puukauppatilanteessa päätehakuulla rungosahinnoittelun puutavaralajihinnoittelun sijaan, eli leimikoiden kantorahatulaja vertailtiin kahdella eri hinnoittelumenetelmällä.

## 2. Aineisto ja menetelmät

### 2.1. Tutkimusalue ja aineistojen keruu

Tutkimusaineistot kerättiin seitsemältä eri päätehakuuleimikolta Etelä-Suomesta eteläisen Hämeen alueelta vuonna 2014. Leimikot olivat mänty- ja kuusivaltaisista ja iältään noin 90–120 -vuotiaita. Leimikkoaineisto ja aineiston keruu on kuvattu yksityiskohtaisemmin Siipilehdon ym. (2016) julkaisussa. Aineiston keruu tapahtui kolmivaiheisesti: puulajeittaiset puustotunnukset mitattiin sekä Trestimalla että ennustettiin ALS-menetelmällä, jonka jälkeen puunkorjuu tehtiin hakkuukoneella.

### 2.2. Vertailuaineiston muodostaminen hakkuukoneen mittalaitteen avulla kerätyistä puutiedoista

Hakkuukoneen mittalaitteen avulla kerättiin vertailuaineisto STM-tiedostoina ennakkomittausten tarkastelua varten. Tutkimuksessa oletettiin, että hakkuukoneen mittalaitteen tuottama tieto on riittävän virheetöntä, jotta sitä voitiin pitää luotettavana vertailuaineistona. Leimikoita kuvaavat keskeisimmät tunnusluvut on esitetty taulukossa 1.

Hakkuukone muodostaa STM-tiedoston jokaiselle käsitellylle ainespuurungolle. Rungon käsittelyn yhteydessä hakkuukoneen mittalaite rekisteröi rungon läpimitan korkeintaan 10 sentin pätkissä millimetrin tarkkuudella ja rungon pituuden senttimetrin tarkkuudella. Läpimittojen ja pituustiedon perusteilla rungon tilavuus lasketaan ja tiedot tallennetaan hakkuukoneen tietojärjestelmään. Järjestelmään muodostetaan mittaustietojen perusteella myös runkoprofiili, joka kuvaa rungon muotoa. Samalla järjestelmään tallentuu tiedot pölkkyjen katkaisukohdista ja jokaisen pölkyn pituus-, läpimita- ja tilavuusyhdistelmät. STM-tiedostoon tallennettujen tietojen perusteella runkoja voidaan analysoida esimerkiksi simulaattorihjelmalla.

**Taulukko 1.** Tutkimusleimikoiden runkotilavuudet puulajeittain, sulkeissa puulajin suhteellinen osuus leimikon kokonaistilavuudesta, rungon käyttöosan keskitilavuus, m<sup>3</sup>/runko, pinta-ala ja metsätyyppi. Runkotilavuudet perustuvat hakkuukoneen tuotantotiedostoihin.

		Leimikko							Summa
		1	2	3	4	5	6	7	
Runkojen käyttöosan tilavuus, m <sup>3</sup> ; (suhteellinen osuus leimikon puumäärästä, %); rungon käyttöosan keskitilavuus, m <sup>3</sup> /runko puulajeittain	Mänty	336	244	303	187	228	161	211	1669
		(97 %)	(96 %)	(83 %)	(42 %)	(53 %)	(39 %)	(66 %)	(65 %)
	Kuusi	0,597	0,973	0,640	1,141	1,017	0,913	0,663	0,770
		5	5	40	250	150	246	81	778
	Koivu	(1 %)	(2 %)	(11 %)	(56 %)	(35 %)	(60 %)	(25 %)	(30 %)
		0,223	0,352	0,233	0,539	0,426	0,715	0,185	0,430
	yht. m <sup>3</sup>	4	4	23	12	51	1	26	121
		(1 %)	(2 %)	(6 %)	(3 %)	(12 %)	(0 %)	(8 %)	(5 %)
	m <sup>3</sup> /runko	0,136	0,166	0,165	0,496	0,633	0,158	0,181	0,271
		344	253	366	450	429	407	318	2567
Pinta-ala, ha	0,562	0,872	0,466	0,688	0,652	0,777	0,353	0,580	
	1,7	1,1	1,6	0,7	1,6	0,7	2	9,4	
Metsätyyppi	VT	VT	OMT	MT	MT/VT	MT	VT	-	

## 2.3. Puulajeittaisten puustotunnusten mittaaminen Trestima-sovelluksella

Trestima-aineisto kerättiin maastokäynneillä. Tässä tutkimuksessa käytettiin 10 kuvan (pohjapinta-ala näytteen) otosta kustakin leimikosta. Kameran pohjapinta-ala näyte otetaan vaakatasossa maaston myötäisesti ja yksi kuva kattaa noin 70 astetta (Rouvinen 2014). Pohjapinta-ala saadaan rela-skoopiperiaatteella. Älypuhelimella otetut kuvat tulkitaan pilvipalvelussa. Trestima-kuvatulkinnasta hyödynnettiin aritmeettista keskiläpimittaa, runkolukua ja pohjapinta-alaa läpimittajakauman palauttamiseksi (ks. Siipilehto ym. 2016). Keskipituus saatiin neljän kuvatun pituuskoepuun tasoitusuoralta tulkittua keskiläpimittaa vastaavana pituutena.

## 2.4. Puulajeittaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksen, vanhan kuviotiedon ja maastokoealojen avulla.

Laserkeilausaineisto kerättiin puustotulkintaa varten toukokuussa 2014. Käytetty keilain oli Leica ALS50, lentokorkeus 2500 m, lentonopeus 333km/h, avauskulma  $\pm 20$  astetta ja toteutunut pulssitiheys 0.6 pulssia/m<sup>2</sup>. Puustotulkintamallien laadinnassa hyödynnettiin 364 tutkimusalueelta mitattua 16 x 16 m koealaa, joilta oli maastossa mitattu puulajeittaiset puustotunnukset. Ennustemallit laadittiin maastomitattujen puustotunnusten ja normalisoidusta laserpistepilvestä laskettujen tilastollisten tunnusten välille. Mallinnusmenetelmänä hyödynnettiin ei-parametrasta lähimmän naapurin ennustusta, jossa lähin naapuri valittiin random forest -luokituksella (Hudak et al. 2008). Ennustemallit laadittiin erikseen männiköille, kuusikoille ja sekapuustoille.

Puustotunnuksia ennustettaessa tutkimuksen leimikoille muodostettiin vastaava 16 x 16 m hila-ruudukko, jolta laskettiin ennustemallien soveltamisessa tarvittavat tilastolliset tunnuksset laserkeilausaineistossa.

## 2.5. Puutavaralajien kertymien ja rungonosien tilavuuksien laskenta puulajeittaisista puustotunnuksista

Hakkuukoneista kerätty STM-tieto apteerattiin Ponsse Opti -ohjelmistolla (versio 4.715), jossa oli mahdollisuus puulajeittaiseen rungonosatilavuustiedon käsittelyyn. STM-tiedostojen puutavaralajiap-teeraus simuloitiin samalla ohjelmalla käyttäen tasahintamatriiseja.

Trestima- ja ALS-tulkinnasta saadut leimikkokohtaiset puustotunnukset muutettiin läpimittajakaumiksi käyttäen Siipilehdon ja Mehtätalon (2013) kuvaamaa menetelmää. Lopulliset jakaumat muodostettiin siten, että metsikön rungot jaettiin yhden sentin rinnankorkeusläpimittaluokkiin ainespuumitat täyttävien runkojen osalta. Läpimittaluokkaa vastaavat pituudet ennustettiin Siipilehdon ja Kankaan (2015) pituusmallilla sisältäen pituuden satunnaisvaihtelun. Kuhunkin läpimittaluokkaan ennustettiin viisi pituutta. Jakaumien muodostamismenetelmä on esitetty yksityiskohtaisemmin Siipilehdon ym. (2016) julkaisussa. Ainespuun mitan katsottiin täyttyvän kuuden sentin rinnankorkeusläpimittaluokassa. Ainespuun profiilista puolestaan riippui, voitiinko rungosta katkoa puutavaralaji- tai rungonosamitat täyttäviä pölkkyjä.

Runkoaineiston läpimittaluokista, joissa runkojen pituus vaihteli luokan sisällä, kustakin arvottiin satunnaisotannalla yksi puu, eli elementtirunko, edustamaan kyseistä luokkaa. Elementtirungon profiilit estimoitiin käyttämällä Laasasenahon (1982) runkokäyräyhtälöitä. Elementtirungon runkoprofiili siirrettiin laskentataulukon, jossa runkojen tilavuus määriteltiin 10 sentin pituisissa pätkissä katkaistun kartion tilavuuskaavalla. Tilavuuslaskentaperiaate noudatteli tällöin hakkuukoneissa käytettyä runkotilavuuden laskentaa. Samalla elementtirungoille tehtiin ositus rungonosa- ja puutavaralajijimmittojen perusteella. Koska mallinnetuista runkoprofiileista ei voitu tehdä mittauksiin perustuvia vikaisuusvähennyksiä, runkotilavuuteen tehtiin kolmen prosentin vähennys (Salomäki ym., 2012),

jotta kaukokartoitus- ja ennakkomittausaineistot olisivat paremmin vertailukelpoisia hakkuukoneaineiston kanssa.

Elementtirungot apteerattiin taulukoitujen runkomittojen ja -tilavuuksien perusteella. Elementtirungon pölkkytys- ja rungonosatilavuustulokset kerrottiin lopuksi kunkin rinnankorkeusläpimittaluokan runkomäärällä ja näin saatiin leimikkokohtaiset puutavaralaji- ja rungonosatilavuudet.

### 2.5.1. Puutavaralajien ja rungonosien hintojen määrittely laskentaa varten

Luonnonvarakeskus tilastoi alueittain ja koko Suomen kattavasti toteutuneiden puukauppojen yksikköhintoja puulajeittain, puutavaralajeittain ja hakkuutavoittain, joten puutavaralajilaskelmien hintaperusteet ovat vuoden 2015 keskimääräisiä kantohintoja (Luke, tilastotietokanta, 2016). Rungonosien hinnoitteluperusteet johdettiin aiempien tutkimusten perusteella, koska taustatietoa hintojen määräytymisestä ei ollut julkisesti saatavilla (Uusitalo ym., 2011). Koska leimikoista maksettavan kantohinnan oletettiin pysyvän koko aineistossa keskimäärin samana hinnoittelumenetelmästä riippumatta, päätettiin rungonosien hinnat sovittaa puutavaralajien kanssa samalle tasolle ja perustana käytettiin hakkuukoneen keräämää runkotietoa. Rungonositteiden väliset suhteelliset hintaerot määriteltiin männyn jalostusarvotutkimuksesta (Uusitalo ym., 2011) johdettujen läpimittakohtaisten kustannus-tuotto-laskelmien perusteella. Samoja hintasuhteita sovellettiin tässä laskennassa myös kuuselle ja koivulle.

Laskennoissa käytetyt puutavaralajien latvaläpimitat ja yksikköhinnat on esitetty taulukossa 2 ja rungonosien alaläpimitat ja yksikköhinnat taulukossa 3. Puutavaralajit jaettiin tukkiin ja kuitupuuhun. Koska kyseessä oli päätehakkuuleimikkoaineisto, jossa järeän runkopuun osuus on suhteellisen suuri, runkojen sahakuitu- tai pikkutukkiosuus jäi liian pieneksi, jotta jaottelu kolmeen eri puutavaralajityyppiin olisi ollut tarkoituksenmukaista.

**Taulukko 2.** Puutavaralajien latvaläpimitat (mm) ja yksikköhinnat (€/m<sup>3</sup>) puulajeittain vuodelta 2015 (Luke, tilastotietokanta, 2016).

Puutavaralaji		Latvaläpimita, (mm)	Yksikköhinta, (€/m <sup>3</sup> )
Mänty	Kuitupuu	60 - 150	16
	Tukki	150 -	54
Kuusi	Kuitupuu	70 - 150	17
	Tukki	150 -	54
Koivu	Kuitupuu	60 - 150	15
	Tukki	150 -	42

**Taulukko 3.** Rungonosien alaläpimittarajat (mm) ja yksikköhinnat (€/m<sup>3</sup>) luokittain ja puulajeittain.

Luokka	Ositteiden alaläpimittarajat, cm	Yksikköhinnat, €/m <sup>3</sup>		
		Mänty	Kuusi	Koivu
1	6	16	17	15
2	13	40	39	30
3	20	50	49	37
4	25	60	59	44

Laskenta toteutettiin kaikille kolmelle runkoaineistonkeruumenetelmälle; hakkuukoneen STM-perustainen aineisto toimi vertailukohtana Trestima- ja ALS-menetelmien tuloksille. Leimikkokohtaiset ja puulajeittaiset kantorahatulot saatiin kertomalla puutavaralaji- ja rungonosatilavuudet yksikköhinnoilla STM-, ALS- ja Trestima-aineistoista. Jokaisen elementtirungon puutavaralajista ja rungonosasta saatava euromääräinen tulo summattiin ositteittain leimikoittain. Lopuksi leimikoittain, puulajeittain ja mittausmenetelmittäin saatavia kantorahatuloja vertailtiin sekä leimikkoaineistojen sisällä että leimikoiden välillä.

### 3. Tulokset

Tulokset laskettiin puulajeittain ja mittausmenetelmittäin sekä puutavaralaji- että rungonosahinnoittelumenetelmällä. Taulukossa 4 on esitetty puutavaralajimentelmällä lasketut kantorahatulot leimikoittain ja mittaustavoittain. Taulukossa 5 esitetään rungonosahinnoittelumenetelmän kantorahatulot leimikoittain ja mittaustavoittain.

Koska leimikkoaineisto oli päätehakkuilta, sekä tukkiositteiden että rungonosaluokkien kolme ja neljä kantorahatuloennusteet olivat tuloksissa selvästi kuitupuuosuuksia suuremmat. Puutavaralajimentelmää käyttäen hakkuukoneiden STM-tiedostojen perusteella suoritettu apteraus tuotti kaikilta leimikoilta yhteensä 129 934 €, Trestima-menetelmä 119 320 € ja ALS-menetelmä 119 501 €. Rungonosahinnoittelulla STM-perusteinen laskenta tuotti yhteensä 130 664 €, Trestima 121 584 € ja ALS 120 996 €.

Inventointimenetelmän puuston tulkinta ei ole havainnut tiettyjä puulajiositteita lainkaan. Nämä näkyvät taulukoissa 4 ja 5 nollina sekä tukki- että kuitupuun kantorahatuloissa. Tällaisia tapauksia ovat Trestima-menetelmä kuusen osalta leimikossa 3 sekä koivun osalta leimikoissa 4 ja 6.

**Taulukko 4.** Leimikko- (1–7) ja mittaustapakohtaiset (STM, Trestima, ALS) kantorahatulot (€/leimikko) puutavaralajimentelmällä laskettuna.

		Leimikko ja mittaustapa											
Puulaji	Puutavaralaji	1			2			3			4		
		STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS
Mänty	Tukki	16 636	16 625	14 965	12 765	11 468	10 899	15 189	15 016	14 921	9 829	5 780	13 156
	Kuitupuu	442	712	859	121	459	306	344	1325	896	81	124	273
Kuusi	Tukki	184	346	231	252	42	1 227	1 698	0	597	12 258	12 014	1 434
	Kuitupuu	22	68	66	10	3	91	157	0	172	412	560	188
Koivu	Tukki	104	0	126	119	60	359	597	419	237	448	0	724
	Kuitupuu	24	5	72	20	88	39	127	160	135	26	0	97
Summa	Mänty	17 078	17 337	15 824	12 886	11 927	11 205	15 534	16 342	15 817	9 909	5 903	13 429
	Kuusi	206	413	297	263	46	1 318	1 855	0	768	12 670	12 574	1 621
	Koivu	128	6	198	139	148	397	724	579	372	474	0	821
	<b>Kaikki yht.</b>	<b>17 412</b>	<b>17 756</b>	<b>16 319</b>	<b>13 288</b>	<b>12 120</b>	<b>12 920</b>	<b>18 113</b>	<b>16 921</b>	<b>16 958</b>	<b>23 053</b>	<b>18 477</b>	<b>15 872</b>

		Leimikko ja mittaustapa								
Puulaji	Puutavaralaji	5			6			7		
		STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS
Mänty	Tukki	11 943	10 659	18 293	8 267	3 977	2 665	10 703	14 742	12 579
	Kuitupuu	106	321	597	119	140	45	200	356	861
Kuusi	Tukki	7 302	8 264	2 506	12 225	6 737	12 192	3 257	4 324	4 191
	Kuitupuu	271	542	246	341	326	527	363	411	522
Koivu	Tukki	1 972	2 050	1 116	12	0	622	838	1 056	172
	Kuitupuu	54	96	110	5	0	80	91	46	110
Summa	Mänty	12 048	10 980	18 890	8 386	4 117	2 710	10 903	15 098	13 439
	Kuusi	7 574	8 805	2 752	12 565	7 062	12 719	3 619	4 735	4 712
	Koivu	2 026	2 146	1 226	17	0	702	929	1 103	281
	<b>Kaikki yht.</b>	<b>21 648</b>	<b>21 931</b>	<b>22 868</b>	<b>20 969</b>	<b>11 179</b>	<b>16 131</b>	<b>15 452</b>	<b>20 936</b>	<b>18 433</b>

**Taulukko 5.** Leimikko- (1–7) ja mittaustapakohtaiset (STM, Trestima, ALS) kantorahatulot (€/leimikko) rungonosahinnoittelumenetelmällä laskettuna.

		Leimikko ja mittaustapa											
Puulaji	Rungonosa	1			2			3			4		
		STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS
Mänty	1	208	316	414	49	203	117	158	715	421	34	40	90
	2	3 828	3 572	4 876	1 285	2 305	1 466	3 091	5 424	4 976	746	467	905
	3	6 288	4 126	4 902	3 343	3 146	3 180	5 161	4 063	4 439	1 742	931	1 460
	4	6 073	9 649	5 101	8 512	6 468	6 801	6 746	5 963	5 669	7 884	4 917	12 195
Kuusi	1	10	40	57	4	2	57	64	0	157	192	273	117
	2	67	299	118	27	34	287	563	0	211	2 064	2 232	657
	3	62	16	66	59	0	238	394	0	169	2 467	2 614	258
	4	67	7	49	179	0	753	826	0	243	8 003	7 643	535
Koivu	1	13	4	57	9	63	25	78	110	106	11	0	63
	2	62	2	95	60	93	70	211	336	168	100	0	212
	3	17	0	20	9	0	27	143	59	16	83	0	102
	4	29	0	14	58	0	281	289	22	69	268	0	435
Summa	Mänty	16 398	17 663	15 293	13 190	12 122	11 565	15 156	16 165	15 505	10 407	6 356	14 650
	Kuusi	206	363	291	269	36	1 335	1 847	0	780	12 726	12 763	1 568
	Koivu	122	5	186	136	155	403	721	527	359	462	0	813
	<b>Kaikki yht.</b>	<b>16 725</b>	<b>18 032</b>	<b>15 770</b>	<b>13 595</b>	<b>12 313</b>	<b>13 303</b>	<b>17 725</b>	<b>16 692</b>	<b>16 644</b>	<b>23 595</b>	<b>19 118</b>	<b>17 031</b>

		Leimikko ja mittaustapa								
Puulaji	Rungonosa	5			6			7		
		STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS	STM	Trestima	ALS
Mänty	1	43	128	243	56	58	11	86	128	464
	2	1 026	1 508	2 910	987	707	124	1 571	1 441	3 781
	3	2 659	2 728	4 721	2 065	1 075	180	2 563	2 531	3 267
	4	8 775	7 031	11 623	5 463	2 375	2 685	6 889	12 035	5 940
Kuusi	1	144	302	171	173	159	247	199	240	384
	2	1 216	2 035	720	1 885	1 354	2 210	723	1 585	1 248
	3	1 740	1 921	556	2 946	1 665	3 625	553	1 050	1 194
	4	4 436	4 527	1 298	7 519	3 911	6 629	2 328	1 702	1 849
Koivu	1	20	45	72	3	0	51	53	21	85
	2	241	349	200	13	0	178	140	141	150
	3	323	328	121	0	0	176	141	177	24
	4	1 427	1 405	843	0	0	265	617	764	5
Summa	Mänty	12 503	11 395	19 497	8 571	4 216	3 000	11 109	16 136	13 451
	Kuusi	7 535	8 785	2 744	12 524	7 090	12 711	3 804	4 578	4 675
	Koivu	2 011	2 127	1 236	16	0	670	951	1 103	264
	<b>Kaikki yht.</b>	<b>22 049</b>	<b>22 307</b>	<b>23 477</b>	<b>21 111</b>	<b>11 306</b>	<b>16 382</b>	<b>15 864</b>	<b>21 816</b>	<b>18 390</b>

### 3.1. Ennakkomittausten ja hinnoitteluvaihtoehtojen vertailu

Tulosten perusteella selvitettiin myös tilannetta, jossa valitaan puun myyjän kannalta paras ja heikoin hinnoittelumenetelmä kantohintaennusteen pohjalta. Tällöin voidaan arvioida kokonaistaloudellista riskiä, joka sisältyy erilaisiin mittausmenetelmiin ja hinnoitteluihin. Kun eroteltiin taulukoista 4 ja 5 leimikoittain suurin ja pienin kantorahaennuste ennakkomittausmenetelmästä ja hinnoittelumenetelmästä riippumatta, huomattiin, että paras kantorahaennuste oli 129 086 € ja heikoin 111 949 € (taulukko 6).

**Taulukko 6.** Tulostaulukoista 4 ja 5 poimitut parhaat ja heikoimmat kantorahatulennusteet (€/leimikko) ennakkomittausmenetelmien (ALS ja Trestima) ja hinnoittelumenetelmien (R-osa on rungonosahinnoittelu ja Ptl. puutavaralajihinnoittelu) mukaan leimikoittain.

Leimikko, mittaus tapa, hinnoittelumenetelmä ja kantorahatulo								
Paras hinnoittelu	1	2	3	4	5	6	7	Summa
Ennakkomittaus	Trestima	ALS	ALS	Trestima	ALS	ALS	Trestima	
Hinnoittelumenetelmä	R-osa	R-osa	Ptl.	R-osa	R-osa	R-osa	R-osa	
Kantorahatulo, €	18 032	1 3303	16 958	19 118	23 477	16 382	21 816	<b>129 086</b>
Heikoin hinnoittelu								
Ennakkomittaus	ALS	Trestima	ALS	ALS	Trestima	Trestima	ALS	
Hinnoittelumenetelmä	R-osa	Ptl.	R-osa	Ptl.	Ptl.	Ptl.	Ptl.	
Kantorahatulo, €	15 770	12 120	16 644	15 872	21 931	11 179	18 433	<b>111 949</b>

On myös huomattava, että vaikka ennakkomittausmenetelmien osuus jakautuu sekä parhaassa että heikoimmassa hinnoittelun ennusteessa lähes tasan, niin rungonosahinnoittelu tuottaisi kuudessa leimikossa (leimikoissa 1,2,4–6) suuremman kantorahatulon ennusteen kuin puutavaralajimenetelmä. Puutavaralajimenetelmä tuotti parhaan kantorahatulon ennusteen vain leimikolla 3. Viidessä tapauksessa seitsemästä heikoimmat hinnoittelunennusteet tulivat puutavaralajimenetelmällä. Tässä tapauksessa voidaan päätellä, että rungonosahintojen tasot on asetettu metsänomistajan kannalta edullisemmalle tasolle. Tästä ei tosin voi vielä suoraan päätellä, miten hyvin ennusteet ja toteutunut katkosta vastaavat toisiaan.

Kun edellämämainitun kaltainen vertailu tehtiin toteutuneeseen hakkuutulokseen (STM-tieto), jossa metsänomistajalle maksettaisiin leimikosta taloudellisesti parhaimman hinnoittelumenetelmän mukaan, tulos oli yhteensä 131 738 €, heikoin mahdollinen toteutunut hakkuutulo oli vastaavasti 128860 € (taulukko 7). Paras ennuste oli siis hieman pienempi (2 652 €) kuin toteutunut ja vähän suurempi kuin heikoin toteutunut (226 €). Heikoin mahdollinen ennustettu kantorahatulo (111 949 €) jää puolestaan 16 911 Euroa heikoimmasta ja 19 789 parhaasta mahdollisesta toteutuneesta katkonasta. Tällöin heikoin mahdollinen ennuste tuotti siis noin 15 % pienemmän kantorahatulon toteutuneisiin verrattuna. On kuitenkin lisäksi huomioitava, että puutavaralajien ja rungonosien yksikköhintojen asettamisella oli suuri vaikutus sekä toteutuneisiin että ennustettuihin kantorahatulotasoihin.



**Taulukko 7.** Tulostaulukoista 4 ja 5 poimitut parhaat ja heikoimmat STM-tiedoista lasketut kantorahatulot (€) leimikoittain.

<b>Paras hinnoittelu</b>	<b>Leimikko ja mittaustapa</b>							<b>Summa</b>
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	
Hinnoittelumenetelmä	Ptl.	R-osa	Ptl.	R-osa	R-osa	R-osa	R-osa	
Kantorahatulo	17 412	13 595	18 113	23 595	22 049	21 111	15 864	<b>131 738</b>
<b>Heikoin hinnoittelu</b>								
Hinnoittelumenetelmä	R-osa	Ptl.	R-osa	Ptl.	Ptl.	Ptl.	Ptl.	
Kantorahatulo	16 725	13 288	17 725	23 053	21 648	20 969	15 452	<b>128 860</b>

Yksittäisten leimikoiden osalta kohteissa 4, 6 ja 7 ennusteiden ja toteutuneiden kantorahatulojen erot olivat suurimmat, mikä selittyy ennakkomittausmenetelmien tilavuusennusteiden mittavirheillä. Kyseiset leimikot olivat puumääriltään poikkeuksellisen suuria, eivätkä ennakkomittausmenetelmien mallinnukset tuottaneet riittävän suurta ennustetta. Näin suuria hakkuukertymiä ei useinkaan toteudu, joten yleensä mallien tarkkuus on todennäköisesti merkittävästi parempi.

## 4. Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen ensimmäisenä päätavoitteena oli selvittää ALS- ja Trestima-menetelmien kertymäennusteiden tarkkuutta, kun vertaillaan rungonosa- ja puutavaralajihinnoittelua keskenään. On selvää, että menetelmien tarkkuudet ovat avainasemissa, kun mallinnusten käyttökelpoisuutta jatkosovelluksissa arvioidaan. Kuten tutkimusaineiston keruun osalta, myös tässä tutkimuksessa hyödynnettyjen ennakkomittausten tulosten yksityiskohtaisempi tarkastelu on tehty Siipilehdon ym. julkaisussa (2016).

Tämän tutkimusaineiston pääpuulajilla eli männyllä, sahatukkien tilavuuden ennusteen suhteellinen keskivirhe oli lasertulkinnalla 40,1 %, sen sijaan kuusella ja koivulla keskivirhe oli 110,4 ja 105,6 % (Siipilehto ym. 2016). Lasertulkinnan keskivirheet olivat samaa suuruusluokkaa kuin Holopaisen ym. (2010) tutkimuksessa. Trestima-kuvatulkinnassa vastaavat keskivirheet olivat hieman pienempiä verrattuna lasertulkintaan ollen männyllä 34,5 %, kuusella 54,2 % ja koivulla 71,1 % (ks. Siipilehto ym. 2016).

Kun vertailtiin leimikoiden ja ennakkomittausmenetelmien suhteellisia kokonaiskantorahatuloja puukauppataivoittain (Taulukko 8), huomattiin että leimikoissa 4 ja 6 sekä Trestima- että ALS-menetelmät tuottivat suurimmat aliarviot verrattuna STM-tiedostoista laskettuihin tuloarvioihin. Leimikko 7:n kohdalla ennakkomittausmenetelmät tuottivat selvän yliarvion kantorahatuloihin. Yksittäisten puulajien ja leimikoiden tarkasteluissa suhteelliset erot vaihtelivat, mikä liittyi käytettyjen menetelmien puustotunnusten tulkintavirheisiin. Puustotunnusten virheet olivat siis suurimmillaan sekapuustoisissa leimikoissa, tällöin myös puulajiosuuksien, puutavaralajien, ja rungonosatilavuuksien ennustevirheet olivat suurimmillaan.

**Taulukko 8.** Todellisten katkontatuloksen (STM) perusteilla laskettujen kantorahatulojen suhteelliset erot ennakkomittausmenetelmien (Trestima ja ALS) perusteella laskettuihin ennusteisiin puukauppataivoittain, puulajeittain ja leimikoittain, %. Kursivoiduissa luvuissa ennakkomittauksissa ei ollut havaintoa vertailuun.

Korjuu- ja mittausmenetelmät	Puulaji	Leimikko						
		1	2	3	4	5	6	7
Puutavaralaji, STM - Trestima	Mänty	-1,5	7,4	-5,2	40,4	8,9	50,9	-38,5
	Kuusi	-100,9	82,7	100,0	0,8	-16,3	43,8	-30,8
	Koivu	95,7	-5,8	20,0	100,0	-5,9	100,0	-18,7
	<b>Yht.</b>	<b>-2,0</b>	<b>8,8</b>	<b>6,6</b>	<b>19,8</b>	<b>-1,3</b>	<b>46,7</b>	<b>-35,5</b>
Rungonosa, STM - Trestima	Mänty	-7,7	8,1	-6,7	38,9	8,9	50,8	-45,3
	Kuusi	-76,2	86,6	100,0	-0,3	-16,6	43,4	-20,3
	Koivu	95,5	-14,2	26,9	100,0	-5,8	100,0	-16,0
	<b>Yht.</b>	<b>-7,8</b>	<b>9,4</b>	<b>5,8</b>	<b>19,0</b>	<b>-1,2</b>	<b>46,4</b>	<b>-37,5</b>
Puutavaralaji, STM - ALS	Mänty	7,3	13,0	-1,8	-35,5	-56,8	67,7	-23,3
	Kuusi	-44,6	-402,0	58,6	87,2	63,7	-1,2	-30,2
	Koivu	-54,8	-185,0	48,6	-73,3	39,5	-3977,8	69,7
	<b>Yht.</b>	<b>6,3</b>	<b>2,8</b>	<b>6,4</b>	<b>31,2</b>	<b>-5,6</b>	<b>23,1</b>	<b>-19,3</b>
Rungonosa, STM - ALS	Mänty	6,7	12,3	-2,3	-40,8	-55,9	65,0	-21,1
	Kuusi	-41,2	-396,0	57,8	87,7	63,6	-1,5	-22,9
	Koivu	-52,9	-196,0	50,2	-76,1	38,5	-4151,2	72,3
	<b>Yht.</b>	<b>5,7</b>	<b>2,2</b>	<b>6,1</b>	<b>27,8</b>	<b>-6,5</b>	<b>22,4</b>	<b>-15,9</b>

Edellämainitut ennustevirheet tilavuusosuuksissa aiheuttivat sekapuustoisissa leimikoissa myös suurimmat kantorahatuloennuste-erot toteutuneisiin tuloihin verrattuna. Leimikot olivat pääasiassa mäntyvaltaisia (65 % kaikkien leimikoiden tilavuudesta). Mitä vähemmän leimikoissa oli puulajivaihtelua, sitä tarkempia olivat ennusteet. Suurimmat suhteelliset erot yksittäisten puulajien ennusteiden tarkkuuksissa selittyvät pienillä runkotilavuuksilla, jolloin pienikin absoluuttinen virhe voi olla suhteellisen suuri.

Tuloksia tarkasteltaessa voidaan huomata myös, että mikäli leimikon puulajisuhteet ovat suhteellisen tasaiset, puulajeittaisten mittausten virheet saattoivat myös kumota toisensa, kun laskettiin leimikon puunmyyntituloja. Tämä johtui eri puutavaralaji- ja rungonosahintojen samankaltaisuuksista puulajien välillä. Esimerkiksi leimikossa 5 männyn todellinen (STM) rungonosakantorahatulo oli 56 % pienempi kuin ALS-menetelmällä ennustettu. Samassa leimikossa puolestaan kuusella todellinen lukema oli lähes 64 % suurempi kuin ALS-menetelmän ennuste. Koivulla todellinen tulos oli noin 39 % ennustettua suurempi. Yhteenlaskettuna koko leimikon 5 ALS-kantorahaennuste oli kuitenkin vain noin 7 % suurempi kuin toteutunut STM-tiedoston perusteella laskettu kokonaistulo. Kun puulajien arvoerot ovat pieniä, kuten tässä tutkimuksessa oli, kokonaisuuden kannalta puulajien ennusteiden virheet ikään kuin katosivat kantorahatulojen ennusteista: tässä tutkimuksessa sekä kuusella että männynllä toisiaan vastaavien puutavaralajien (mäntytukki ja kuusitukki sekä mäntykuitupuu ja kuusikuitupuu) ja rungonosaluokkien yksikköhinnat ovat suhteellisen lähellä toisiaan.

Tutkimusleimikoiksi valikoitui melko suurirunkoisia (keskitilavuudeltaan 0,580 m<sup>3</sup>, kaikki puulajit ja leimikot yhteensä) päätehakuuleimikoita. Koska maksettavat kantorahatulot tulevat nykyään pääosin päätehakuuleimikoista ja sieltä tukkipuusta, on perusteltua tutkia kaukokartoitusmenetelmien hyödyntämistä erityisesti tällaisissa kohteissa. Käytännössä lentolaserkeilaukseen perustuva hilatason tieto on lyönyt läpi nykyisessä yksityismetsien puustotiedon keruussa, vaikka esim. puuston jaksoisuuden tai puulajien tunnistus on haasteellista (Uuttera ym. 1998, Mehtätalo 2006, Maltamo ym. 2008, Närhi ym. 2008). Toisaalta tämänkin tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että laserkeilauksella tuotettu puustotieto oli lähes yhtä tarkkaa tukemaan puukauppaan liittyvää päätöksentekoa, kuin leimikkokohtaisilla mittauksilla tuotettu puustotieto.

## 5. Johtopäätökset

On oletettavaa, että laserkeilauksen ja kuvatulkinnan kehitys jatkuu ja menetelmien tarkkuudet parantuvat myös puuston laatuominaisuuksien tunnistamisen osalta. Kuten edellä on mainittu, rungon tilavuus on vain yksi hinnoittelun perusteista ja erityisesti tukkipuutavaralajin ja vastaavien rungonosaluokkien kohdalla ulkoiset ominaisuudet, esimerkkinä mutkaisuus, vaikuttavat kantorahatuloihin. Toisin kuin puun sisäistä laatua (laho, värivika tms.), ulkoisia ominaisuuksia voidaan havaita ennen puunkorjuuta ja niiden esiintymistä käyttää puutavaralajijakaumien arviointiin. Puun laatuominaisuuksien huomioimista ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa erikseen tehty tarvittavan aineiston puuttuessa. Jos maksukertoimena on pelkästään ositteen mitta, muutoin samanlaisissa leimikoissa heikkolaatuisesta puusta maksetaan samaa hintaa kuin laadukkaasta puusta. Rungon käyttöarvo määräytyy kuitenkin ostajalle puun ominaisuuksien mukaan. Puuston laadun huomiointi on tärkeää, sillä leimikoiden välinen laatuero vaikuttaa hinnoitteluun ja sitä kautta kantorahatuloon. Yksi ratkaisu voisi olla eräänlainen laatukerroin tai laatuprosentti, joka voisi nostaa tai laskea rungonosaluokkien hintaa. Kertoimen tai prosenttiluvun perusteella laadukkaammasta leimikosta voidaan maksaa parempaa hintaa, ja tällöin metsänomistajaa kannustettaisiin puun laatuksivatukseen.

Koska tutkimusleimikot olivat päätehakkuita ja runkojen keskitilavuudet suhteellisen suuria, myös harvennushakkuilla tehtävät testit toisivat lisätietoa rungonosahinnoittelun soveltumisesta puukaupan menetelmäksi. Metsänomistajan riski (noin kaksi prosenttia kantorahatuloista) vaikuttaa melko pieneltä, mikäli rungonosahinnoittelu tulee yleistymään puukaupassa, koska puun myyjä saa tulon toteutuneen puunkorjuumäärän perusteella, eikä katkontapäätösten perusteella. Lisäksi, vaikka manuaalisen eli moottorisahahakkuun osuus puukaupasta onkin alle prosentti, on myös huomattava, ettei rungonosahinnoittelu sovellu sellaisenaan manuaalihakkuukäyttöön, koska puutavaraa ei mitata koneellisesti ja runkokohtaisesti. Lisäksi hankintahakkuilla, jossa puun ostaja ei voi vaikuttaa reaaliajassa katkontaan yhtä merkittävästi kuin pystykauppatilanteessa, on myös huomioitava, ettei rungonosahinnoittelun etuja voida hyödyntää täysimääräisesti. Mikäli koneellisia tai manuaalisia hankintahakkuita halutaan jatkettavan, jonkinlaista puutavaralajimenetelmää olisi edelleen pidettävällä osana puukauppaa.

ALS- ja Trestima-menetelmät sekä niiden perusteella tehdyt puutavaralajienusteet osoittautuivat lupaaviksi. ALS-perusteinen puustotulkinta vaikuttaa soveltuvan tukemaan puukauppaan liittyvää päätöksentekoa. Tosin jalostuslaitosten puuraaka-aineen yksityiskohtaista hankinnan suunnittelua nykyiset ennakkomittausmenetelmien tarkkuudet eivät vielä mahdollista.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella ennakkomittausmenetelmien epätarkkuuksien aiheuttamat mahdolliset riskit kantaa pääasiassa puun ostajapuoli, koska mittausmenetelmien epätarkkuudet puutavara -tai rungonosalajien jakaumien ennustamisessa aiheuttavat enemmän ongelmia metsäteollisuuden tuotannon suunnittelussa. Koska puulajien väliset puutavaralajien yksikköhintaerot olivat tutkimuksentekohetkellä pieniä (esimerkiksi sekä mänty- että kuusitukin yksikköhinta oli 54 €/m<sup>3</sup>), metsänomistaja ei kärsi taloudellista tappiota, mikäli ennusteista lasketut puulajienusteet ovat vääriä, kunhan tukin ja kuitupuun kokonaisjakaumaennusteet – tai vastaavat rungonosien jakaumaennusteet – ovat lähellä toteutuneita. Jos kuitenkin kuusitukin tai siitä tehdyn sahatavaran kysyntä on korkeampi kuin mäntytukilla, virheellisten ennakkomittaus tulosten perusteella tehdyt kaupat voivat johtaa entistä hankalampaan markkinatilanteeseen puun jatkojalostuksessa.

Rungonosaluokkien hinnanasettelun onnistuminen on erittäin tärkeää sekä puun ostajan että myyjän kannalta, jotta puun arvoketjun lenkit pysyvät taloudellisesti kannattavina aina metsästä kannolta tehtaille ja asiakkaille saakka. Mikäli rungonosahinnoittelua aiotaan käyttää laajemmin puukaupassa, menetelmän läpinäkyvyys ja informaation jakaminen ovat avainasioita.

## Viitteet

- Holopainen, M., Vastaranta, M., Rasinmäki, J., Kalliovirta, J., Mäkinen, A., Haapanen, R., Melkas, T., Yu, X. & Hyyppä, J. (2010). Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European journal of forest research*, 129(6): 1131-1142.
- Holopainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Liang, X., Lin, Y., Vaaja, M., ... & Kukko, A. (2013). Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning—A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban forestry & urban greening*, 12(4), 546-553.
- Hudak, A. T., Crookston, N. L., Evans, J. S., Hall, D. E., & Falkowski, M. J. (2008). Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2232-2245.
- Kilkki, P., Maltamo, M., Mykkänen, R. & Päivinen, R. 1989. Use of the Weibull function in the estimation the basal area dbh-distribution. *Silva Fennica* 23(4):311-318.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Männyyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 108:1–74. Luke tilastotietokanta. 2016. Teollisuuspuun kauppa 2015, kantohinnat vuosittain. Viitattu 21.8.2016.
- Malinen, J., Wall, T., Kilpeläinen, H. & Verkasalo, E. 2011. Leimikon arvonmuodostus vaihtoehtoisissa loppukäyttökohteissa. *Metlan työraportteja* 206. 45 s.
- Maltamo, M., Packalén, P., Uuttera, J., Ärölä, E. & Heikkilä, J. 2008. Laserkeilaustulkinnan hyödyntäminen metsäsuunnittelun tietolähteenä. *Tieteen tori. Metsätieteen aikakauskirja* 4/2008: 304–309.
- Mehtätalo, L. 2004. A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 131-140.
- Mehtätalo, L. 2006. Eliminating the effect of overlapping crowns from aerial inventory estimates. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 1649-1660.
- Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Metsäntutkimuslaitos. 2014. 426 s.
- Næsset E., Gobakken T., Holmgren J., Hyyppä H., Hyyppä J., Maltamo M., Nilsson M., Olsson H., Persson Å., Söderman U. (2004). Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1(4): 493–502.
- Närhi, M., Maltamo, M., Packalén, P., Peltola, H., Soimasuo, J., 2008. Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittäminen laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmätietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2008: 5–15.
- Packalén, P., Suvanto, A., & Maltamo, M. (2009). A two stage method to estimate species-specific growing stock. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(12), 1451-1460.
- Rouvinen, T. 2014. Kuvia metsästä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2014: 119-122.
- Ruoka- ja luonnonvarojen e-vuosikirja 2015. Luonnonvarakeskus. Viitattu 19.5.2016. 87 s.
- Salomäki, M., Niemistö, P. & Uusitalo, J. 2012. Ensiharvennuksen toteutusvaihtoehdot ja niiden vaikutukset männikön tuotokseen ja kasvatuksen kannattavuuteen ojitetuilla turvemaille – simulointitutkimus. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2012: 163–178.
- Siipilehto, J. 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. *Silva Fennica* 33(4): 281-301.
- Siipilehto, J. & Mehtätalo, L. 2013. Parameter recovery vs. parameter prediction for the Weibull distribution validated for Scots pine stands in Finland. *Silva Fennica* 47(4): 1-22.
- Siipilehto, J. & Kangas, A. 2015. Näslundin pituuskäyrä ja siihen perustuvia malleja läpimitan ja pituuden välisestä riippuvuudesta suomalaisissa talousmetsissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2015: 215–236.
- Siipilehto, J., Lindeman, H., Vastaranta, M., Yu, X. & Uusitalo, J. 2016. Reliability of the predicted stand structure for clear-cut stands using optional methods: ALS-based methods, Trestima and EMO applications. *Silva Fennica* (50)3: 1–24.
- Suvanto A., Maltamo M., Packalén, P., Kangas J. (2005). Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Uusitalo, J. (1995). Pre-harvest Measurement of Pine Stands for Sawing Production Planning. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management. 59 s.
- Uusitalo, J., & Kivinen, V.-P. (1998). Constructing bivariate dbh/dead-branch height distribution of pines for use in sawing production planning. *Scandinavian journal of forest research*, 13(1-4), 509-514.

- Uusitalo, J., Kivinen, V.-P. & Korpunen, H. 2011. A step towards optimal wood supply chain: A case study on optimal tree bucking in Central Finland. Formec Austria 2011. Pushing the boundaries with research and innovation in forest engineering. 11 s.
- Utterä, J., Haara, A., Tokola, T. & Maltamo, M. 1998. Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs. *Forest Ecology and management* 110: 275-282.
- Vastaranta M, Gonzalez Latorre, E, Luoma V, Saarinen N, Holopainen M, Hyyppä J. Evaluation of a Smartphone App for Forest Sample Plot Measurements. *Forests*. 2015; 6(4):1179-1194.
- Vastaranta M., Saarinen N., Kankare V., Holopainen M., Kaartinen H., Hyyppä J., Hyyppä H. (2014). Multisource single-tree inventory in the prediction of tree quality variables and logging recoveries. *Remote Sensing* 6(4): 3475–3491.
- Veltheim, T. 1987. Puumallit männylle, kuuselle ja koivulle. University of Helsinki. 60 s.



luke.fi

Luonnonvarakeskus  
Latokartanonkaari 9  
00790 Helsinki  
puh. 029 532 6000