



HELSINGIN YLIOPISTO  
MAATALOUS-METSÄTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

# **Männyn (*Pinus sylvestris* L.) sisäoksien läpimit- taprofiilin mallintaminen – maastolaserkeilauk- sen hyödyntäminen kalibrointiaineiston ke- ruussa**

---

Okko Tonteri  
Maisterintutkielma  
Helsingin yliopisto  
Metsien ekologia ja käyttö  
Marraskuu 2019

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä – Författare – Author Okko Tonteri			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Männyn ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) sisäoksien läpimittaprofiilin mallintaminen – maastolaserkeilauksen hyödyntäminen kalibrointiaineiston keruussa			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Metsien ekologia ja käyttö, puuteknologia			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma		Aika – Datum – Month and year Marraskuu 2019	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 49 sivua + liitteet 4 sivua
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Mänty on Suomen teollisesti tärkeimpiä puulajeja ja oksaisuus sen tärkein laatuun vaikuttava tekijä. Puun luontaiseen kasvuun kuuluvina tekijöinä oksia ei voida kuitenkaan täysin välttää, mutta niiden sijainti, määrä ja kokoluokka tulisi tietää ennen jatkojalostusta raaka-aine häviöiden minimoimiseksi. Suuremmilla sahoilla tämä onkin mahdollista röntgen- tai 3D-kuvantamisen avulla. Hankintapäätös tehdään kuitenkin jo ennen hakkuita, joten olisi kannattavaa saada tarkempaa tietoa pystyvuista hankintaketjun tässä vaiheessa.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa laadullisesti tarkempaa tietoa yksittäisistä pystyvuista käyttäen hyväksi maastolaserkeilausta aineiston keruussa. Aineistoa varten valittiin 10 koepuuta Evon alueella toukokuussa 2017. Puut mitattiin sekä käsin että maastolaserkeilaimella. Koepuut sahattiin ja laudoista mitattiin käsin sisäoksien läpimitat. Aineistosta muodostettiin malli, joka kuvasi männyn sisäoksien läpimitan kaventumista. Mallin avulla estimoititiin sisäoksien läpimittoja suhteessa TLS-pistepilvistä ja maastomittauksissa manuaalisesti mitattuihin ulko-oksien läpimittoihin.</p> <p>TLS-pistepilvistä mitattuja ulko-oksia löytyi 710 kappaletta kun manuaalisesti mitattiin 975 oksaa. Havaintoaste oli keskimäärin 72,8 %. Havaintojen virheprosentti oli pienimmillään n. 7 % ja suurimmillaan n. 60 %. TLS-mittaukset hieman yliarvioivat ulko-oksien kokoa, mikä vaikutti sisäoksien läpimittaestimaattien tarkkuuteen.</p> <p>Tutkimustuloksien perusteella on mahdollista ennustaa hyväksyttävissä rajoissa olevia sisäoksien läpimittaprofiileja käyttäen hyväksi maastolaserkeilausta. Tärkeimpiä tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mallin valinta ja sen sovitus sekä TLS-pistepilvestä mitattujen oksien läpimitan mallintamisen onnistuminen. Tämän laskennan automatisointi mahdollistaisi sisäisten laatutunnusien hankkimisen jo ennen hakkuita.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Mänty, <i>Pinus sylvestris</i> L., oksaisuus, oksikkuus, TLS			
Ohjaaja tai ohjaajat – Handledare – Supervisor or supervisors Jiri Pyörälä, Juha Rikala, Marketta Sipi			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikin tiedekirjasto ja Metsätieteiden laitos			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus sai alkunsa keskusteltuani Helsingin yliopiston tohtorikoulutettavan Jiri Pyörälän kanssa hänen tutkimuksistaan maastolaserkeilauksen ja puun laatutekijöiden parissa. Tutkimus toteutettiin osana Helsingin yliopiston ja Paikkatietokeskusken (FGI) laatuprojektia. Kantavana ajatuksena oli tutkia jotain, mitä ei aiemmin oltu tutkittu ja mielestäni tässä onnistuttiin.

Haluan kiittää erityisesti ohjaajana toiminutta Jiri Pyörälää jatkuvasta kannustuksesta ja vertaistuesta. Kiitos hyvistä kysymyksistä ja ajattelun haastamisesta. Kiitän ohjauksesta ja hyvistä kommentteista Marketta Sipiä ja Juha Rikalaa. Kiitän Markus Holopaista työn mahdollistamisesta ja Evon mittauksien rahoituksesta. Lisäksi kiitos Marketta Sipille, joka tuki työn valmistumista stipendillä, sekä Evon metsäopiston ystävälliselle henkilökunnalle.

Lopuksi kiitokset tuesta ja loppumattomasta uskosta vanhemmilleni. Ilman teitä eivät opiskeluni olisi olleet mahdollisia.

# Sisällysluettelo

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 KIRJALLISUUSKATSAUS .....</b>	<b>8</b>
2.1 MÄNNYN OKSIEN MUODOSTUMINEN.....	9
2.1.1 OKSIEN OMINAISUUKSIA.....	11
2.1.2 OKSIEN MERKITYS VIKANA PUUAINEESSA .....	12
2.1.3 ULKO- JA SISÄOKSIEN HAVAINNOINTI .....	14
2.2 MAASTOLASERKEILAUS PUUSTON TUNNUKSIEN MITTAVÄLINEENÄ .....	15
<b>3 AINEISTO JA MENETELMÄT .....</b>	<b>18</b>
3.1 AINEISTON HANKINTA .....	18
3.1.1 MITATUT TUNNUKSET .....	20
3.1.2 JOHDETUT TUNNUKSET .....	23
3.2 MENETELMÄT .....	26
3.2.1 TLS-PISTEPILVIEN KÄSITTELY .....	26
3.2.2 MALLINNUKSET .....	26
3.2.3 TULOKSIEN ARVIOINTI .....	27
<b>4 TULOKSET .....</b>	<b>29</b>
4.1 ULKO-OKSAMITTAUKSET .....	29
4.2 SISÄOKSIEN LÄPIMITTAMALLIN SOVITUS .....	31
4.3 SISÄOKSIEN LÄPIMITTOJEN ENNUSTAMINEN .....	35
<b>5 TULOSTEN TARKASTELU .....</b>	<b>40</b>
<b>6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>42</b>
<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>44</b>
<b>LIITTEET.....</b>	<b>50</b>

## **Käsitteitä**

**TLS:** Terrestrial Laser Scanning, maastolaserkeilaus.

**Sisäoksa:** Rungon sisäpuolinen osa oksaa.

**Oksaisuus:** Sisäoksien esiintyminen rungossa (Kärkkäinen 2007). Viittaa sekä lukumäärään että kokoluokkaan.

**Ulko-oksa:** Rungon ulkopuolinen, näkyvä osa oksaa.

**Oksikkuus:** Ulko-oksien esiintyminen rungossa (Kärkkäinen 2007). Viittaa sekä lukumäärään että kokoluokkaan.

# 1 JOHDANTO

Sahateollisuuden suurimpia kustannuksia ovat puunhankinnasta aiheutuvat kulut, joihin vaikuttaa raaka-aineen hinta ja erityisesti sen laatu. Raaka-aineen laadulla on suora vaikutus lopputuotteisiin (Hyytiäinen ym. 2010). Mekaanisen jalostuksen kannalta tarkastellen puu on haastava materiaali, sillä puuaineen laatu vaihtelee suuresti samassa leimikossa olevien yksittäisten puiden välillä ja vaihtelu on tätäkin suurempaa yksittäisen puun sisällä (Mäkelä ym. 2010). Kustannusten ja kilpailukyvyn tehostamiseksi sekä riskien- ja laadunhallinnan vuoksi olisi tärkeää saada leimikoista mahdollisimman paljon yksityiskohtaista metsävaratietoa laadun varmistamiseksi ja laatuhäviön minimoimiseksi. Tarkempi tieto puuston laadusta tehostaa puunhankintaa sekä vähentää materiaalihäviötä ja helpottaa lopputuotteiden tuotannosuunnittelua. Suunnittelun päätöksenteon helpottaminen lisätiedoilla johtaa lopulta pienempiin varastokustannuksiin. Hilker ym. (2012) mukaan taloudelliset paineet ajavat yrityksiä kohti pienempiä raakapuuvarastoja ja siksi pystypuiden laatu tiedoista olisi suurta hyötyä tuotannosuunnittelussa.

Mänty (*Pinus sylvestris* L.) on kotimaisista puistamme kuusen (*Picea abies* (L.) Karst.) ohella toinen teollisesti hyvin merkittävä puulaji. Esimerkiksi vuonna 2017 kotimaisen männyn tukki- ja kuitupuun käyttö metsäteollisuudessa oli yhteensä  $27\,675 * 10^3 \text{ m}^3$  (27,7 milj.  $\text{m}^3$ ), männyn ollen näin kokonaiskulutukseltaan suurin yksittäisistä puulajeista ja tukkipuiden käytön suhteen kuusen jälkeen toiseksi suurin (Ruoka- ja luonnonvaratilastojen e-vuosikirja 2018). Männyn käyttö on hieman nousussa, sillä vertailun vuoksi vuonna 2013 yhteismäärä oli  $26\,295 * 10^3 \text{ m}^3$  (26,3 milj.  $\text{m}^3$ ) (Metsätalastollinen vuosikirja 2014). Pystypuita tarkastellessa voi huomata, kuinka kuusen oksat jakautuvat lähes koko puun pituudelle. Männyllä oksakerros alkaa selvästi ylempää. Elävän latvuksen osuus koko puun pituudesta onkin kuusella keskimäärin 80 %, kun männyllä vastaava osuus on 55 % (Hakkila ym. 1972). Näin ollen voidaan väittää, että männyn oksikkuus on käytön kannalta paremmin jakautunut suuremman oksattoman alueen vuoksi.

Oksaisuus on Suomessa tärkein mäntysahatavaran laatuun vaikuttava tekijä (STMY 2016), jonka havainnoiminen ja mahdollinen puuaineen oksaisuuden ennustaminen pystyistä palvelee koko hankintaketjua. Runkopuun syyt joutuvat oksan kohdatessaan kiertämään sen vastoin niiden normaalia kasvusuuntaa, mikä aiheuttaa paikallisia syyhäiriöitä ja tätä kautta epäsäännöllisyyksiä puun rakenteeseen (Zink-Sharp 2003). Johtuen siitä, että puu on luonnontuote ja oksat ovat osa sen luontaista kasvua, ei oksia voida

täysin välttää. Oksaisuuden määrällä ja sijainnilla kappaleessa on kuitenkin suuri merkitys lopputuotteen ominaisuuksiin. Vähäinen oksaisuus ja sisäoksien sijainti keskellä kappaletta ei aiheuta samanlaisia lujuusongelmia kuin suuri oksaisuuden määrä ja sisäoksien sijainti kappaleen reunoilla (Zink-Sharp 2003). Tästä syystä lajitteluohjeissa (STMY 2016) onkin eri laatuarvot niin sahatavarakappaleen särmä- ja päätyoksien määrälle kuin lappeen oksaisuudelle.

Yksittäisen puun laatua on ennen harvennusta ja sahausta mahdotonta tietää tarkasti, mutta metsänarvioinnissa on vertailtu silmämääräisesti ulkoisia laatuominaisuuksia ja pyritty kehittämään menetelmiä tämän perusteella (Uusitalo 1997). Sisäoksien sijaintia, kokoa ja kapenemista on mallinnettu kirjallisuudessa hyödyntämällä erilaisia mittausmenetelmiä, esim. röntgentomografiaa (Björklund 1997) ja röntgen-CT-kuvausta (*Computed tomography*, kerroskuvaus) (Duchateau ym. 2013). Oksien läpimitan ennustamiseen on käytetty myös prosessimalleja (Mäkinen ja Mäkelä 2002). Oksien kokoa ja sisäoksia on ennustettu ja analysoitu rekonstruktioilla käyttäen erilaisia kuva-analyysejä (esim. Pinto ym. 2003, Todoroki ym. 2005).

Kirjallisuudessa on päästy hyviin mallinnustuloksiin, mutta niitä ei ole pystytty yhdistämään maastossa käytettäviin sovelluksiin, joita tässä tutkimuksessa edustaa TLS (*Terrestrial Laser Scanning*, maastolaserkeilaus). Puuston laatutunnusien mahdollinen ennustaminen pystyistä onkin kaukokartoitusmenetelmien kehittymisen myötä alkanut herättää taas kiinnostusta. Kiinnostuksen kohteena on ennusteiden jalostusketjuun tuotama lisäarvo tuotannon optimoinnin kehittämiseksi ja automaation mahdollisuus puuston laatumittauksien suhteen. Edistyksellistä olisi, jos mallinnus voitaisiin kytkeä osaksi maastomittauksia. Sisäoksien mallintamisesta on tehty aikaisempia tutkimuksia (esim. Samson 1993, Pinto ym. 2003, Duchateau 2013, Osborne ja Maguire 2015), mutta niistä kaikista puuttuu käytännön sovellus maastomittauksiin.

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa laadullisesti tarkempaa tietoa yksittäisistä pystyistä kolmessa vaiheessa:

- I. Muodostetaan malli, joka kuvaa männyn sisäoksien läpimitan kehitystä suhteessa rungon kasvuun

- II. Mallin avulla estimoidaan sisäoksien läpimittoja suhteessa TLS-pistepilvistä ja maastomittauksissa manuaalisesti mitattujen ulko-oksien läpimittoihin
- III. Vertaillaan estimoituja sisäoksien läpimittoja keskenään sekä suhteessa referenssimittauksiin, ja arvioidaan eri virhelähteiden merkitystä estimointitarkkuuteen

Mallin avulla tulisi olla mahdollista ennustaa oksien läpimitta korkeuden ja rungon läpimitan funktiona ytimeistä pintaan päin tarkasteltaessa. Tulokset käydään läpi tutkimalla eroavaisuudet keskiarvojen osalta. Tutkimuksessa analysoidaan lisäksi mahdollisten virheiden lähteet sekä mallin valinnan ja mittauksien vaikutukset tuloksiin. Puuston laadusta ennen sahausta saatava tarkempi tieto pienentäisi laatu- ja materiaalihäviötä ja voisi mahdollistaa sahauksen optimoinnin etukäteen virtuaalitukkiin avulla (Todoroki ym. 2005). Saatava tieto tulisi pystyä sitomaan tuotannonohjausjärjestelmään täyden hyödyn saavuttamiseksi hankinnan ja tuotannosuunnittelun osalta.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Männyn laatuindikaattorit jaetaan yleisesti kahteen luokkaan: ulkoiseen laatuun ja sisäiseen laatuun (Kellomäki ym. 1992), joista ulkoisen laadun tunnuksia voidaan havaita suoraan rungon pinnalta. Sisäisen laadun tunnuksia ovat näkymättömissä rungon sisällä. Oksien esiintyminen rungossa on puuteollisuuden kannalta suurin mäntysahatavaran laatuun vaikuttava yksittäinen tekijä ja siksi tämä tutkimus keskittyykin siihen. Oksat käsitetään usein pelkästään vikana sahatavarassa, mutta ne ovat runkokuun kasvun kannalta elintärkeitä (Wilson ja White 1986) ja siksi runkokuun kasvu ja oksien kasvu ovatkin sidoksissa toisiinsa.

Englannin kielessä puussa esiintyvistä oksista käytetään selkeitä, toisistaan erottuvia termejä: ulko-oksista *branch* ja sisäoksista termiä *knot*. Suomeksi on ehdotettu käytettäväksi termejä *oksikkuus* ulko-oksaisuutta kuvaillaessa ja *oksaisuus* sisäoksista puhuttaessa (Kärkkäinen 2007). Vaikka terminologia ei ole täysin vakiintunut, tässä tutkimuksessa käytetään kyseisiä termejä selkeyden ja yhtenäisyyden vuoksi. Lisäksi käytetään termejä *sisäoksa* ja *ulko-oksa* yksittäisistä oksista puhuttaessa.



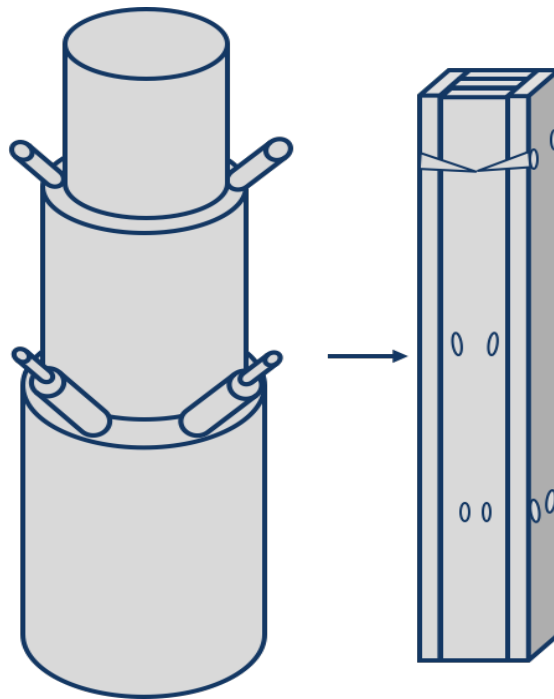
Oksikkuus voidaan havaita helposti silmämääräisesti, mutta oksien koko ja sijainti rungon sisällä ei selviä ilman rungon läpäisevää tukkiröntgeniä ennen sahausta. Oksaisuuden selvittäminen aikaisemmassa vaiheessa olisikin puuteollisuuden kannalta arvokasta tietoa. Lisäarvon ja kustannustehokkuuden tuottamiseksi tämän vaiheen tulisi olla joko nopeampi tai tarkempi kuin silmämääräinen arviointi esimerkiksi oksarajojen avulla. Optimitilanteessa oksaisuuden selvittäminen automaattisesti täyttäisi nämä molemmat kriteerit. Oksikkuus sekä muita laatutunnuksia, kuten oksarajat, on jo mahdollista mitata kaukokartoitusmenetelmin käyttäen maastolaserkeilainta (Kankare ym. 2014), mutta on tärkeää selvittää, voidaanko pystyistä ennustaa ulko-oksien perusteella myös sisäoksien muodostumista ja laatua. Lisäksi TLS-pistepilvien käsittelyn automatisointi veisi mittausmahdollisuuksia paljon eteenpäin, sillä mitatun datan käsittely manuaalisesti vie paljon aikaa.

Männyn sisäisten laatutunnuksien ennustaminen ulkoisten laatutunnuksien perusteella mahdollistaisi tarkemman arvion mäntyleimikoiden arvosta ja palvelisi näin sekä metsänomistajia että ostajia. Tarkan mallinnuksen perusteella voitaisiin myös mahdollisesti tulevaisuudessa laskea oksien kasvua ja karsiutumista eteenpäin alkaen tietyistä ajanhetkestä. Lopputulos olisi ennuste puun oksien kasvusta ja karsiutumisesta, minkä perusteella voisi arvioida sisäistä laatua. Tämä on mahdollista kokoamalla ensin mallinnusaineisto saatavilla olevista ulko-oksamittauksista, ja muodostamalla sitten esim. sisäoksien jakautumista rungon pituussuunnassa tai sisäoksien kapenemista rungon säteensuunnassa kuvaavia malleja ulko-oksamittauksien pohjalta (Mäkelä ym. 2010). TLS mahdollistaa yksittäisten puiden ja eri tunnuksien mittaamisen tehokkaasti, sillä sen avulla voidaan kerätä paljon dataa nopeasti verrattuna manuaalisiin mittauksiin.

## **2.1 Männyn oksien muodostuminen**

Oksien anatominen samankaltaisuus runkopuun kanssa johtuu niiden kehittymisestä samasta kärkikasvusolukosta kuin vuosikasvain (Barbour 2004). Kasvukauden lopussa mänty muodostaa pääsilmun, josta muodostuu seuraavan kasvukauden pääranka, sekä pienempiä sivusilmuja, joista syntyvät oksat (Kärkkäinen 1986). Näin syntyneet oksat jatkavat kasvuaan samalla tavoin kuin runkopuu. Mänty tuottaa vain yhden oksakiehkuran vuosittain, minkä perusteella vuosittaisen pituuskasvun voikin päätellä oksakiehkuroiden välimatkasta (Wilson ja White 1986). Oksan kasvu alkaa aikaisemmin kasvukau-

den alussa kuin runkopuun, kun oksan ympärille muodostuu vuosilusto, joka on yhteydessä rungon soluihin ainoastaan oksan alapuolelta (Kärkkäinen 2007). Kuvassa 1 on yksinkertaistettu kuva oksista rungon sisällä ja sahatavarakappaleessa.



**Kuva 1.** Yksinkertaistettu kuva oksista rungon sisällä ja niiden sijoittumisesta sahatavaran poikkileikkauksessa.

Oksien kasvu myös loppuu sillä hetkellä, kun tämä oksan alapuolinen yhteys rungon johtosolukoihin katkeaa. Tämä yhteyden katkeaminen johtaa ensin oksan kuolemaan, ja edelleen vuosien kuluessa oksan karsiutumiseen yleensä lahoamisen tai fyysisen rasituksen, esimerkiksi lumen painon, seurauksena. Kasvun loppuminen ennen oksan kuolemaa ei pääty täysin yllättäen, vaan oksan kasvu ensin hidastuu ja juuri ennen kasvun loppua oksa saattaa muodostaa vielä hyvin pienen vuosiluston, jonka jälkeen vuosilustojen muodostus loppuu ja yhteys johtosolukoon katkeaa (Schweingruber 2007).

Kuolleen ulko-oksen kautta lahottajat voivat myös päästä runkopuuhun ja lahoaminen saattaa levitä näin oksan ympäristöön. Lahoaminen ei kuitenkaan yleensä etene sen pidemmälle, vaan pysähtyy sisäoksen ytimeen eikä leviä ylemmäs runkopuussa (Shigo 1984). Optimaalisessa tilanteessa lahoaminen pysähtyy heti ulko-oksen tyveen runkopuun pinnalla, josta ulko-oksa myöhemmin katkeaa ja karsiutuu luonnollisesti. Schweingruberin (2007) mukaan runkopuu alkaa välittömästi pitää kuollutta ulko-oksaa vierasaineena ja eristää sen kasvamalla sen ympärille ja lopulta kyljestämällä oksakohdan. Oksikkuus vaikuttaa oksaisuuteen, sillä runkopuu kasvaa ajan myötä oksan ympärille ja oksan karsiuduttua oksakohdan yli. Termistö vaihtuu runkopuun solukon kasvussa oksan ympärille: elävästä ulko-oksasta muodostuu terve sisäoksa ja kuolleesta ulko-oksasta jää jäljelle kuiva sisäoksa, jolla on kuitenkin elävä osa lähempänä puun ydintä (Kärkkäinen 2007). Elävän osan ympärille runko on kasvanut ennen oksan kuolemaa.

### ***2.1.1 Oksien ominaisuuksia***

Runkopuun kaventuessa pelkästään tyvestä latvaa kohden kapenevat oksat kahteen suuntaan; välittömästi puun kuoren päällä on elävän oksan maksimiläpimitta, joka pienenee niin ulko-oksen kärkeä kohti kuin sisäoksen tyveä kohti (Kärkkäinen 2007). Ulko-oksen voi kuvitella olevan kuin runkopuu, jossa maan pintaa korvaa rungon pinta ja maassa olevia juuria sisäoksa. Kaventuminen kahteen suuntaan johtuu siitä, että rungon kasvussa oksan ympärille menettää sisäoksa yhteytensä jälteen eikä näin ollen enää jatka kasvua puuaineessa, mutta ulko-oksa jatkaa edelleen pituus- ja paksuuskasvua kuten runkopuu (Bowyer ym. 2007).

Männyllä oksakiehkurassa olevien oksien määrä on keskimäärin 4–6 kpl kasvupaikan viljavuuden vaikuttaessa sekä oksien määrään, että suurimman oksan läpimittaan; karumilla kasvupaikoilla oksia on vähemmän ja ne ovat pienempiä (Lämsä ym. 1990). Ulko-oksien keskimääräinen läpimitta kasvaa vielä elävän latvuksen rajan jälkeenkin, mutta pienenee taas latvaa kohden (Pinto ym. 2003). On myös havaittu, että Pohjoismaissa ja pohjoisella pallonpuoliskolla oksat reagoivat auringon valon tulosuuntaan kehittyen puun eteläpuolella sekä läpimitaltaan että lukumäärältään suuremmiksi kuin pohjoispuolella (Kärkkäinen 2007). Lemieux ym. (1997) havaitsi saman ilmiön.

Oksaisuuden tunnuksena on käyttökelpoiseksi todettu paksuimman elävän tai kuolleen oksan läpimitta, sillä se erottuu helposti ulkoista laatua tarkkailtaessa, mutta vaikuttaa

myös sahatavaran laatuun varsinkin oksan läpimitan ollessa yli 20 mm (Lämsä ym. 1990). Esimerkiksi Todoroki ym. (2005) tutkimuksessa havaittiin, että sahatavaran luokituksen mukainen laatu laskee ulko-oksien keskiläpimitan kasvaessa. On myös havaittu, että männyllä oksan kasvun pysähtymisen jälkeen menee keskimäärin seitsemän vuotta siihen, että oksa on kuollut (Mäkinen 1999). Vaikka oksa olisi ulkoisesti kuollut, saattaa se pysyä kiinni runkopuussa vielä useita vuosia ja vaikuttaa näin sisäiseen laatuun. Esimerkiksi Mäkisen (1999) mukaan kuollut oksa voi sopivissa olosuhteissa pysyä kiinni rungossa yli 40 vuotta. Alempana rungossa olevat, iältään vanhemmat oksat taipuvat vuosien kuluessa alaspäin painovoiman vaikutuksesta (Pietilä 1989). Tämä ilmiö vaikuttaa sisäoksan läpimittaprofiiliin. Oksan läpimitta vaikuttaa karsiutumiseen, sillä oksien ominaisuudet ovat verrattavissa runkopuuaineen ominaisuuksiin ja taivutuslujuus korreloi paksuuden kanssa. Kärkkäisen (2007) mukaan oksien karsiutuminen käy luonnossa hitaasti ja riippuu monista eri tekijöistä, kuten puulajista, metsikön tiheydestä, kasvupaikasta ja valoisuudesta.

### ***2.1.2 Oksien merkitys vikana puuaineessa***

Vaikka oksien anatominen rakenne onkin samankaltainen runkopuun kanssa, poikkeavat oksien ominaisuudet kuitenkin siinä määrin runkopuusta, että ne käsitetään yleisesti häiriöinä tai vikoina puuaineessa. Männyllä oksaisuus on selkeästä vuosikasvusta (oksakiehkura per vuosi) ja valokasveille tyypillisestä, plastisesta kasvutavasta johtuen tärkeimpiä yksittäisiä laatuun vaikuttavia tekijöitä. Männyn latvus reagoi voimakkaammin ympäristöön verrattuna esimerkiksi kuuseen, mikä aiheuttaa suurempia laatuvariaatioita.

Puukaupassa arvokkain osa on se osa tukkipuuta, jossa oksamassaa on vähemmän suhteessa tilavuuteen kuin muualla. Männyllä ja havupuilla yleensä tämä on puun tyviosa, sillä suhteellinen oksikkuus ja samasta syystä oksaisuus kasvaa tyvestä latvaa kohden (Lemieux ym. 1997). Oksat karsiutuvat ajan kuluessa, ja siksi tyveen jää lyhyempiä ja läpimitaltaan pienempiä oksia, kun kasvu on niiden osalta loppunut.

Björklund (1997) havaitsi sisäoksan suurimman läpimitan kasvavan elävään latvukseen asti kääntyen sitten jyrkästi laskuun. Tämä on loogista, sillä ylimmillä oksilla on ollut vähemmän aikaa paksuuskasvuun, ja elävän latvuksen ulkopuolella oksat eivät enää kasva. Sisäoksat alentavat sahatavaran lujuutta johtuen niiden puuaineeseen aiheuttamasta epäsäännöllisyydestä ja murtumat syntyvätkin siksi usein oksien läheisyyteen

(Kärkkäinen 2007). Sisäoksan epäsäännöllisyyttä ja puuaineen käyttäytymistä oksan ympärillä on havainnollistettuna kuvassa 2.



**Kuva 2.** Puuaineen käyttäytyminen männyn oksan ympärillä. Puun syyt taittuvat kasvusuuntansa vastaisesti oksan kohdalla. Poikkileikkaus sahatuista kappaleista.

Oksat voidaan myös nähdä visuaalisena vikana ja lajitteluohjeiden (STMY 2016) mukaisesti sahatavara jaetaan eri laatuluokkiin oksaisuuden perusteella. Kuivatettaessa sahatavaraa oksat halkeilevat ja saattavat irrota johtuen niiden nopeammasta kuivumisesta ympäröivään puuaineeseen verrattuna. Kemiallisessa puunjalostuksessa ne lisäävät kemikaalien kulutusta kuidutuksessa halutun lopputuloksen onnistumisen varmistamiseksi (Kärkkäinen 2007).

Oksilla on myös yhteys muihin puun ulkoisiin, laatuun vaikuttaviin tunnuksiin. Puun kasvu nopeus vaikuttaa myös oksien kasvuun ja tällöin muodostuu enemmän oksia ja mekaanisen jalostuksen kannalta huonompilaatuista puuainesta (Kuprevicius ym. 2013). Oksien

kasvun minimoimiseksi ja hyvän sisäisen laadun saamiseksi olisi parasta runkopuun hidas kasvu, ja oksien karsiutumista varten mahdollisimman pitkä kasvujakso ennen hakuita latvuserroksen sulkeuduttua. Kuprevicius ym. 2013 mukaan elävän latvuksen osuudella ja puuaineen lujuusominaisuuksilla on myös havaittu olevan yhteys, jolloin pienempi elävän latvuksen osuus merkitsee parempaa lujuuslaatua.

Elävässä latvuksessa sekä nuorpuun että oksien osuus on suurimmillaan, mikä ei ole suotuisin vaihtoehto puun käytön kannalta. Larsonin (1969) mukaan elävän latvuksen erittämät kasvuhormonit (auksiinit) vaikuttavat kevätpuusolujen muodostumiseen kiihdyttämällä sen tuotantoa. Suuri kevätpuusolujen osuus alentaa puun tiheyttä. Alhainen tiheys laskee puun lujuusominaisuuksia ja vaikuttaa negatiivisesti puun jalostusarvoon hyviä lujuusteknisiä ominaisuuksia vaativien lopputuotteiden osalta. Auksiinia vapautuu varsinkin uusien silmujen ja neulasten muodostuessa ja tärkein muutoksiin vaikuttava tekijä on auksiinin konsentraatio puuaineessa (Fajstarin ym. 2018). Kääntäen voikin siis todeta, että pienempi elävän latvuksen suhteellinen osuus tarkoittaa vähemmän auksiinia ja sitä kautta enemmän kesäpuuta, jolloin puun lujuusominaisuudet ovat paremmat.

Latvusrajaa on perinteisesti käytetty oksaisuuden laatuindikaattorina. Männyn elävän latvuksen on havaittu käyttäytyvän suhteellisissa vertailuissa hyvin säännöllisesti (Mäkelä ja Vanninen 2001), mikä parantaa ennustettavuutta. Tietoa puun laadun ennustamiseen latvusrajan perusteella voi kaukokartoitusmenetelmillä kerätä pienemmällä vaivalla ja nopeammin verrattuna manuaalisiin, ihmisen käsin suorittamiin mittauksiin. Toisaalta vaikka itse datan keräys onkin nopeaa, sitä pitää vielä keräyksen jälkeen tulkita ja käsitellä. Näin ei voida suoraan puhua lopullisen mittaustuloksen suhteen helpommasta tavasta.

### ***2.1.3 Ulko- ja sisäoksien havainnointi***

Ulko-oksat eli puun oksikkuus voidaan havaita rungon pinnalta, jolloin on mahdollista käyttää esimerkiksi TLS-mittausta, joka nopeuttaa tiedonkeruuta huomattavasti verrattuna manuaalisiin mittaustapoihin. Optista havainnointia on käytetty jo pitkään, jolloin dataan on kirjattu kuivaoksaraja eli ensimmäisen kuolleen oksan korkeus sekä elävän latvuksen raja eli korkeus, jossa kuolleet oksat muuttuvat pääsääntöisesti eläviksi. Havainnointi paljaalla silmällä on luonnollisesti hitaampaa ja mahdolliset mittavirheet ovat todennäköisiä.

Oksaisuutta ja sen vaikutusta sahatavaran laatuun on käytännössä mahdollista tutkia vain kahdella tapaa; kuvausmenetelmillä kohdetta vaurioittamatta tai sahaamalla puu kappaleiksi, jolloin sisäoksat paljastuvat. Esimerkiksi Oja ym. 2004 mukaan sahoilla on käytössä yleensä joko optinen 3D-skanneri tai tukkiröntgenlaitteisto oksaisuuden selvittämiseksi sahauksen optimointia varten. Tyvitukissa hakkuukypsän männyn tapauksessa ulko-oksat ovat karsiutuneet niin aikaisessa vaiheessa kasvua, että ne ovat lähes täydellisesti kyljestyneet eivätkä näin paljasta rungon pinnalta oksan sijaintia.

Oksaisuuden selvittämiseksi pystyistä on tehty tutkimuksia sisäoksien sijainnin ja muodon ennustamiseen sekä alueittain rungossa (Björklund ja Moberg 1999) että ulko-oksien ominaisuuksien perusteella (Duchateau ym. 2013). Duchateau ym. (2013) tutki sisäoksien ennustamista kaksivaiheisella mallilla, jossa mallinnettiin erikseen ensin sisäoksan läpimittaa ja sitten sijaintia puuaineessa. Malli muodostettiin sisäoksista saaduista mittaustuloksista röntgen-CT-kuvien perusteella. Duchateau ym. (2013) tutkimuksessa todettiin, että sisäoksien ominaisuuksia on mahdollista ennustaa rungon ulkoisten tunnus-ten avulla. Tulosten perusteella myös tulevan kasvun ennustaminen on mahdollista ilman aiempaa tietoa puun kasvuhistoriasta.

## **2.2 Maastolaserkeilaus puuston tunnuksien mittavälineenä**

Maastolaserkeilaus (Terrestrial Laser Scanning, TLS) on kaukokartoitusmenetelmä, joka soveltuu erityisesti yksittäisten puiden mittaamiseen (Holopainen ym. 2014). Muita kaukokartoitusmenetelmiä ovat esimerkiksi lentolaserkeilaus (Airborne Laser Scanning, ALS) ja mobiililaserkeilaus (Mobile Laser Scanning). Liang ym. (2016) mukaan maastolaserkeilaus tulee nopeasti operatiiviseen käyttöön metsien inventoinnissa sopivien ohjelmistojen kehittyessä ja mittaustapojen vakinaistuessa. Verrattuna perinteisiin, manuaalisesti suoritettaviin puutunnuksien – esimerkiksi rinnan ympäräsläpimitan ja oksarajan – mittauksiin voi maastolaserkeilauksella kerätä enemmän ja yksityiskohtaisempaa tietoa yksittäisistä puista (Kankare ym. 2014).

Maastolaserkeilauksella kerätty data puustosta pitää kuitenkin useimmissa tapauksissa käsitellä vielä manuaalisesti, sillä sen tuottama tieto tunnuksista ei ole sellaisenaan informatiivisesti käytettävissä muodossa. Tämä hidastaa mittausprosessia. Tunnuksien automaattista käsittelyä kuitenkin tutkitaan jatkuvasti ja esimerkiksi Kankareen ym. (2015) tutkimuksessa onnistuttiin rinnan ympäräsläpimitan automaattisessa mallintamisessa.

Maastolasermittaukset tehdään maastolaserkeilaimella, jota on yleensä tukemassa kolmijalka vakaan kuvauksen mahdollistamiseksi. Kuvaustilanne on esitettyä kuvassa 4, jossa näkyvät myös erillisten keilauksien referenssikohteina käytettävät pallot.



**Kuva 3.** Maastolaserkeilausmittauksen valmistelu. Maastolaserkeilaimen vakauttaminen kolmijalan päälle. Referenssikohteina käytetyt pallot näkyvät taustalla. Kuva: Jiri Pyörälä



Keilaimet jaetaan laserin etäisyysmittaustavan mukaan kahteen eri luokkaan: vaihe-erokeilaimiin ja pulssilaserkeilaimiin (esim. Liang ym. 2016). Vaihe-erokeilain lähettää jatkuvasti lasersädettä ja mittaa kohteen sijaintia takaisin keilaimeen heijastuvan laserin vaihe-erojen perusteella. Pulssilaserkeilain lähettää lyhyen laserpulssein ja mittaa aikaa, joka kuluu sen matkaan maastolaserkeilaimesta kohteeseen ja takaisin.

Keilaimen tyypistä riippumatta maastolaserkeilain muodostaa laserin osumien perusteella pistepilven mitattavasta kohteesta ja sen ympäristöstä. Pistepilvi muodostuu kolmiulotteiseksi, kun jokaisella pisteellä on oma x, y, z-koordinaattinsa (Raumonen ym. 2013).

Mittaukset voidaan toteuttaa joko yhtenä keilauksena mitattavan koealan keskeltä tai useampana keilauksena koealan ympäriltä (Liang ym. 2012, Liang ym. 2016). Yksittäisellä keilauksella saadaan dataa nopeammin ja pistepilvestä ei muodostu yhtä tiheää, mutta mittaus ei ole yhtä tarkka mahdollisten katvealueiden takia. Useammalla keilauksella saadaan tiheä ja kattava pistepilvi mitattavasta kohteesta, mutta erilliset keilaukset pitää rekisteröidä yhdeksi pistepilveksi käyttämällä mitattavalle alueelle asetettuja referenssi-kohteita. Yleensä nämä ovat kolmijalkojen päälle noin metrin korkeudelle maanpinnasta pystytettyjä muovipalloja kuten kuvattu esimerkiksi Pyörälä ym. (2018a) mittauksissa. Pallot erottuvat selvästi pistepilvestä ja mahdollistavat useampien keilauksien sitomisen yhdeksi pistepilveksi.

Kolmiulotteisen pistepilven avulla yksittäisen puun mallintaminen sekä sen ominaisuuksien estimointi on mahdollista tehdä tarkasti ja se onkin saavuttanut suurta suosiota viime vuosina (Liang ym. 2016). Puun runko ja oksat voidaan mallintaa sovittamalla pistepilveen ympyrä, sylinteri tai vastaava oikeaan muotoon sopiva geometrinen kappale. Mallinnus on sitä tarkempi mitä enemmän pisteitä kohteesta on ja sen tulos riippuu suurilta osin täten mittauksen onnistumisesta.

Maastolaserkeilauksen tarkkuuteen vaikuttaa ratkaisevasti kaksi tekijää: a) mitattavan kohteen etäisyys maastolaserkeilaimesta sekä b) lasersäteiden kulkeutuminen kohteeseen (Pyörälä ym. 2018a). Etäisyyden kasvaessa pistepilvi hajautuu enemmän eikä pistepilvi muodostu tiheäksi. Lasersäteiden tielle taas voi osua oksia, jolloin muodostuu katvealueita. Näin käy erityisesti rungon yläosassa elävän latvuksen jälkeen, kun sekä etäisyys maastolaserkeilaimeen, että oksien lukumäärä kasvaa. Maastossa tehtäviin mittauksiin

vaikuttavat tietysti aina myös ympäröivät olosuhteet. Erityisesti tuuliset olosuhteet hankaloittavat maastolaserkeilausta aiheuttaen harhaa mittaustuloksiin (Vaaja ym. 2016) ja tämä tulisikin aina ottaa huomioon mittauksia tehtäessä.

## **3 AINEISTO JA MENETELMÄT**

### **3.1 Aineiston hankinta**

Mittaukset tehtiin 2.5.–12.6.2017 Evolla Hämeenlinnan kunnan alueella ja ne koostuivat pystypuiden kuvantamisesta maastolaserkeilaimella, puiden kaatamisen jälkeisistä ulkoisten tunnuksien mittauksista sekä tukkien sahauksen jälkeisistä sisäoksien mittauksista. Maastolaserkeilain oli FARO:n Focus 3D X330 vaihe-erokeilain. Mittaukset alkoivat puiden (10 kpl) valitsemisella ja merkitsemisellä. Puut valittiin puolukkatyyppin (VT)-metsiköstä edustamaan kahta eri läpimittaluokkaa. Läpimittojen vaatimuksiksi rinnankorkeudelta valittiin ensimmäisen luokan kohdalla 20–24 cm ja toisen kohdalla 28–34 cm. Molempien luokkien (5 kpl puita molemmissa) valintavaiheessa jokaisen läpimitta rinnankorkeudelta (1,3 m) mitattiin mittasaksilla ja kirjattiin ylös. Valittujen puiden kaato kohta merkittiin kuitunauhalla sekä spraymaalilla, jotta pistepilvestä nähtäisiin oikea pituuslaskennan alkupiste. Lisäksi merkittiin lapulla puun numero ja kiinnitettiin se puun pohjoispuolelle, jotta keilausaineisto saatiin kohdistettua oikein ja ilmansuuntien mittaaminen olisi mahdollista.

Yksittäiset puut keilattiin kolmesta eri pisteestä kuvattavan puun ollessa pisteiden keskellä ja lopullinen pistepilvi muodostui näin useamman keilauksen lopputuloksena. Kaikissa mittauksissa puun ympärillä oli referenssikohteina kolme muovipalloa kolmijalkojen päällä. Ensimmäinen kuvauspiste oli aina kohtisuoraan puun pohjoispuoleen nähden. Maastolaserkeilaimen etäisyys mitattavasta puusta oli aina 25 % puun mitatusta pituudesta ja keilaimen korkeus maanpinnasta oli puun rinnanympäryskorkeus. Muodostuneeseen pistepilveen tallentui kuvattavan puun lisäksi aina myös ympäröivää maastoa. Mittaustilanne on havainnollistettuna kuvassa 5.



**Kuva 4.** TLS-mittaustilanne. Kuvassa näkyy maastolaserkeilain sekä mitattava, laputettu mänty keskellä. Referenssikohteina käytetyt pallot ympäröivät mitattavaa kohdetta. Kuva: Jiri Pyörälä.

Maastolasermittauksien jälkeen valitut puut kaadettiin. Kenttäsaahausta varten rungot katkottiin moottorisahalla 4 m pitkiksi tukeiksi. Rajoittavaksi tekijäksi valittiin se, että viimeisen tukin katkaisukohta tuli olla minimissään latvaläpimitan arvolla 8 cm. Puiden 3, 5, 6, 7 ja 8 kohdalla osa tukeista sahattiin 3 m:n sekä 5 m:n pituuteen latvaläpimitan mukaan. Jokaisen tukin tyvipäähän merkittiin kaadetun puun numero sekä kyseisen tukin

numero numeroinnin alkaessa tyvitukista ylöspäin. Pohjoissuunta merkittiin myös jokaisen tukin tyvi- ja latvapäähän sahausta varten. Tukkeja saatiin 50 kpl.

Kenttäsaahalla tukit sahattiin keskeltä halki niin, että toisen puoliskon muodosti rungon pohjoispuoli ja toisen rungon eteläpuoli. Tukit sahattiin läpisaauksella 25 mm paksuiksi laudoiksi, kun tukin latvaläpimitta oli yli 15 cm, ja 19 mm paksuiksi laudoiksi, kun tukin latvaläpimitta oli 15 cm tai alle. Lautoihin merkittiin heti saauksen jälkeen tunnistetiedot, jotta mittaukset kohdistuisivat oikein. Lautojen lopullinen lukumäärä oli 297 kpl.

### **3.1.1 Mitatut tunnuks**

Kaadetuista puista mitattiin mittanauhalla rungon **pituus (*h*)** katkaisukohdasta latvaan. Puun syntypisteeksi määritettiin maanpinnan taso, sillä se on helposti havaittavissa myös maastolaserkeilauksen pistepilvestä. Syntypisteestä mitattu kannon korkeus lisättiin vielä rungon pituuteen ja näin muodostettiin rungon lopullinen pituus metreinä (m).

**Rungon läpimitat (*d, cm*)** mitattiin mittasaksilla kahden metrin välein alkaen 2 m korkeudesta, lisäksi mitattiin **rinnankorkeusläpimitta (*dbh*)** 1,3 m korkeudelta. Läpimittojen mittausta lopetettiin seuraavaan 2 m tasalukuun sen jälkeen, kun latvaläpimitta saavutti 8 cm arvon.

**Oksien läpimitat (*D, mm*)** mitattiin työntömitalla horisontaalisesti (vaakasuoraan) 1 cm etäisyydeltä rungosta mahdollisten oksan ja rungon rajapinnassa olevien paksuuntumien välttämiseksi. Mittauksien helpottamiseksi oksat katkottiin aluksi n. 10 cm tyngiksi. Samalla mitattiin myös **oksan korkeus (*H, cm*)** rungossa katkaisukohdasta mitaten. Ulko-oksien mittaustilannetta on havainnollistettu kuvassa 6.



**Kuva 5.** Ulko-oksen läpimitan mittaustilanne. Työntömitalla mitattiin vaakasuoran läpimitan arvo millimetreinä. Runkoa vasten näkyy mittanauha ja korkeusarvo. Ulko-oksia on katkaistu mittauksien helpottamiseksi. Kuvan oksa on kuollut eli kuiva oksa. Kuva: Jiri Pyörälä

Lautojen pinnoilta mitattiin työntömitalla havaituista oksakohdista **oksen pienin läpimitta ( $D_p$ , mm)** (STMY 2016). Lisäksi mitattiin **oksen etäisyys ytimestä ( $E$ , mm)** sekä **oksen korkeus laudassa ( $H$ , cm)** tyvestä mitattuna. Kuva 7 havainnollistaa mittaus-suuntia ja sisäoksien eri dimensioita sahatavarassa. Kuvassa 8 on esitettyä oksakohdan siirtymä ja muutos puuaineessa.

Mittauksia varten oli sovittu sisäoksen läpimitan alaraja (5 mm). Ulko-oksille tämän alarajan oli sovittu olevan 9 mm. Alarajoilla pyrittiin karsimaan pois sisäoksia, jotka eivät olisi laatuvaikutuksien suhteen kriittisiä sekä ulko-oksia, joita ei TLS-mittauksissa havaittaisi. Perusteena oli esimerkiksi Pyörälän ym. (2018a) tutkimus, jossa ulko-oksen alarajana oli 10 mm koska sitä pienempien oksien havaittiin näkyvän huonosti ja olevan usein jo itsestään karsiutuneita.



**Kuva 7.** Erikokoisia männyn oksia sahatavarassa. Oksan pienin läpimitta ja mittaussuunta merkattu kuvaan punaisella viivalla, Puun ydin näkyy sahatavaran keskellä. Kuvaan on merkitty myös oksan korkeuden ja etäisyyden mittaustapa keltaisella suorakulmalla. Kuva: Jiri Pyörälä



**Kuva 8.** Oksan kasvusta aiheutuva siirtymä puuaineessa. Kuvassa suunta ytimestä pintaan päin on katsottuna vasemmalta oikealle. Puun ydin näkyy sahatavaran keskellä. Kuva: Jiri Pyörälä

### **3.1.2 Johdetut tunnuksset**

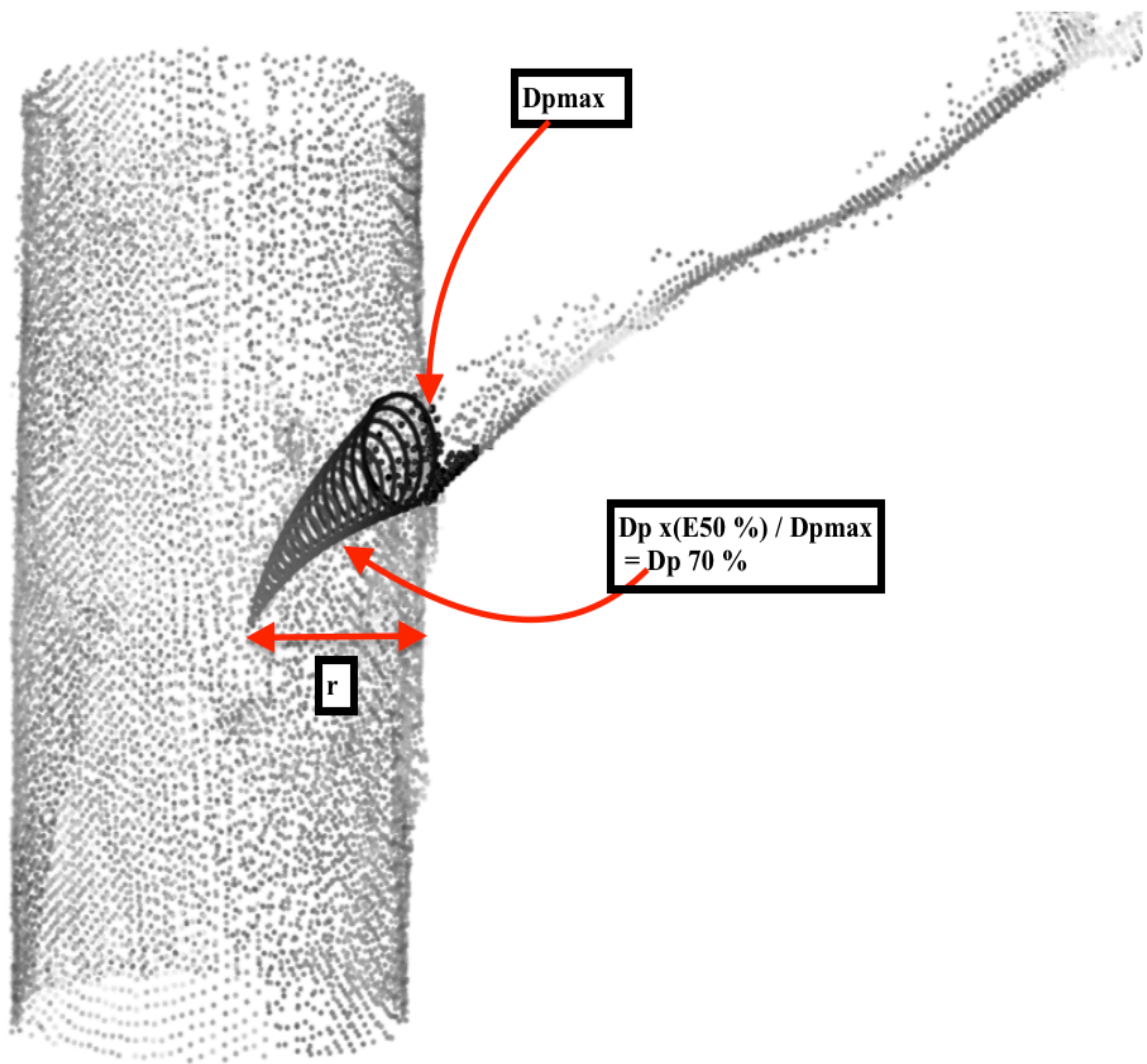
Mitatuista tunnuksista johdettiin lisäksi laskentaa ja tuloksia varten paremmin sopivia tunnuksia. Monessa kohtaa oli tarkoituksenmukaisempaa käyttää suhteellista arvoa kuin oikeaa numeraalista arvoa. Johdettuja tunnuksia olivat:

***Rungon läpimitat eri korkeuksille (cm)*** muodostettiin jokaiselle puulle laskemalla runkokäyrä käyttäen neljännen asteen polynomiyhtälöä rungon mitattujen läpimittojen toimiessa lähtöarvoina. Laskennassa oletuksena oli, että runko on säännöllisen ympyrän muotoinen.

***Sisäoksan suhteellinen etäisyys ytimestä (%)*** laskettiin oksan horisontaalinen (vaaka-suora) etäisyys puun ytimestä jaettuna rungon säteellä. Arvo 0 % tarkoittaa rungon ydintä ja 100 % pintaa.

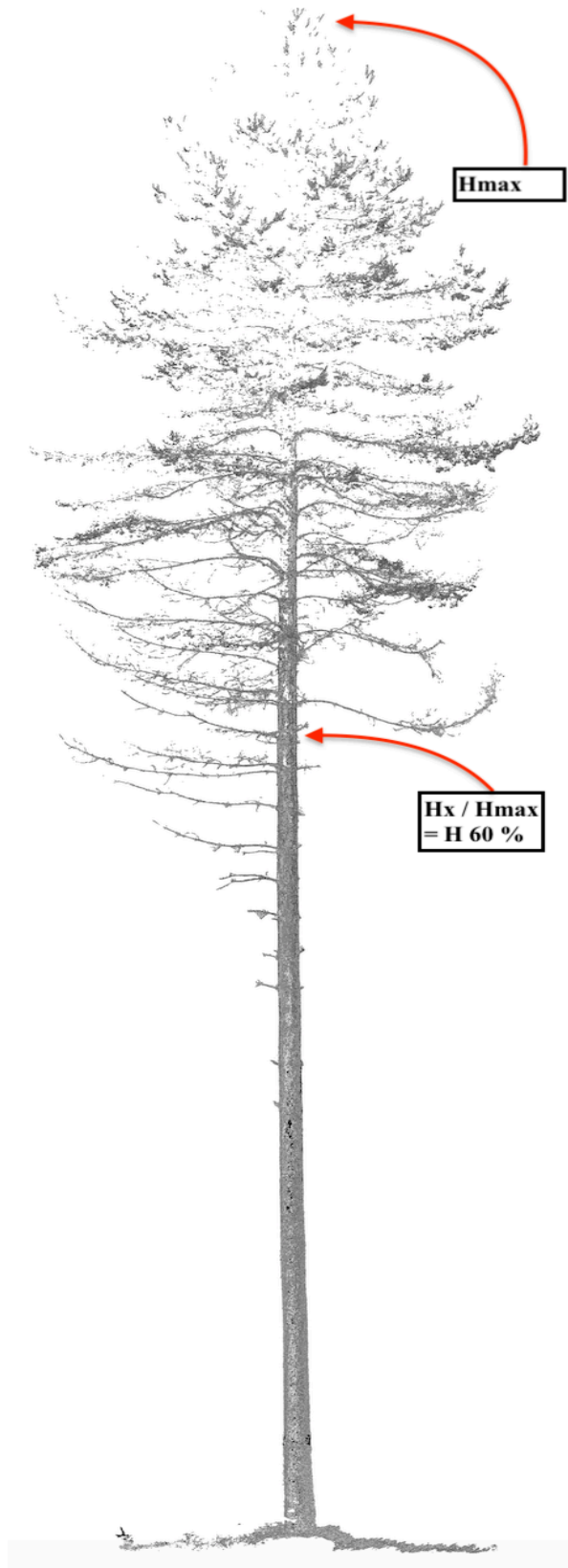
***Puun suhteellinen korkeus (%)*** tarkasteltava rungon kohdan korkeus jaettuna kyseisen puun kokonaispituudella,  $H_x / H_{max}$ .

***Sisäoksan suhteellinen läpimitta (%)  $Dp_x / Dp_{max}$*** . Mitatun sisäoksan läpimitta tietyllä etäisyydellä jaettuna saman oksan suurimmalla läpimitan arvolla. Kuvissa 8 ja 9 havainnollistetaan johdettuja tunnuksia mitattujen arvojen kautta.



**Kuva 6.** Pistepilvimuotoinen havainnollistava kuva käytetyistä läpimitan ja etäisyyden tunnuksista. Kuvassa  $D_{pmax}$  on sisäoksan maksimiläpimitta ja  $D_p$  on oksan läpimitta tietyllä etäisyydellä ytimestä pintaan. Lisäksi E50 % kuvaa etäisyyttä ytimestä pintaan ja  $r$  on säde.





**Kuva 7.** Pistepilvimuotoinen havainnollistava kuva käytetyistä korkeuden tunnuksista. Kuvassa Hmax on puun maksimipituus ja Hx on tarkasteltavan oksan korkeus. Suhteelliseksi korkeudeksi on kuvassa merkitty H 60 % eli 60 % maksimipituudesta.

## 3.2 Menetelmät

### 3.2.1 TLS-pistepilvien käsittely

Pistepilvien käsittelyyn käytettiin Terrasolidin valmistamaa TerraScan-ohjelmaa. Jokainen pistepilvi oli muodostunut kolmesta eri keilauksesta, ja nämä kolme mittausta piti yhdistää yhdeksi kuvaksi käyttäen sidontapisteinä referenssikohteina toimineita valkoisia muovipalloja. Yhdistelyn jälkeen pistepilvi tuli vielä rajata käsittämään vain kuvattu puu oksineen ja mahdollisimman vähän ympäröivää maastoa tai vieressä olleiden puiden oksia.

Oksien läpimittojen havaitsemiseen pistepilvestä käytettiin samoja menetelmiä kuin Pyörälän ym. (2018b) tutkimuksessa. Ensin ulko-oksat piti havaita ja todentaa pistepilvestä ja leikata ne oksakiekuroittain kiekokoiksi irralleen rungosta. Ulko-oksen alapuolella on pistepilvestä havaittavissa puoliympyrän muotoinen pistetihentymä, jonka jatkoksi kaikille havaituille oksille sovitettiin ympyrä. Tihentymä muodostuu oksan alapuolelle, koska lasersäteiden suunta on oksien kohdalla alhaalta ylöspäin ja oksan yläpuoli jää osuimilta peittoon. Oksapisteisiin sovitetun ympyrän läpimittaa käytettiin ulko-oksen läpimittana.

### 3.2.2 Mallinnus

Mallin rakentaminen aloitettiin valitsemalla teoksesta Catalog of Curves for Curve Fitting (Sit ja Poulin-Costello 1994) sopivia funktioita, joiden muodostama käyrä muistutti aineistosta saatuja sisäoksien läpimittakuvaajia. Vaatimuksina oli funktion käyttäytyminen mahdollisimman samoin kuin sisäoksien läpimitan kasvu ytimeistä pintaan. Funktion tuli kyetä saamaan nopeastikin suuria arvoja, mutta myös laskemaan jyrkästi. Vaatimuksien mukaan käyrän tuli lähtökohtaisesti kasvaa kohti pintaa, mutta myös kyetä laskemaan tällä välillä, sillä kuolleiden ja karsiutuneiden oksien läpimitan maksimiarvo saattoi näissä tapauksissa olla jo reilusti ennen pintaa.

R-ohjelman avulla sovitettiin erilaisia funktioita havaintoihin. Funktio sovitettiin erikseen suhteellisiin sisäoksien läpimittoihin kunkin puun eri suhteellisilla korkeuksilla 5 %

korkeusvälein. Jokaiselle puulle tuli näin eri korkeuksille kasvua kuvaava yhtälö, josta saatiin yksilölliset parametrien arvot jokaiselle puulle ja jokaiselle mitatulle korkeudelle.

Sopiva funktio, toisen asteen käännteinen polynomifunktio, koostui lopulta kolmesta parametrilla a, b ja c ja oli muotoa:

$$Y = \frac{x}{a+bx+cx^2},$$

jossa y = oksan suhteellinen läpimitta välillä 0-1, x = oksan suhteellinen etäisyys ytimeistä välillä 0-1 ja a, b ja c parametrien arvot funktiolle.

Datan käsittelyyn käytettiin Excel-tilukkolaskentaa sekä R-ohjelmaa. Dataa testattaessa huomattiin paljon yksittäisiä sisäokshavaintoja mitattuna läheltä runkojen ydintä. Nämä yksittäiset havainnot karsittiin pois, jotta malliin ei tulisi virhelähdettä.

### ***3.2.3 Tuloksien arviointi***

Sisäoksien läpimittamallin sovituksen tarkkuuden testaamiseksi mallin avulla estimoituja arvoja verrattiin referenssiarvoihin.

TLS- ja maastomittauksissa mitatut ulko-oksat yhdistettiin oikean puun ja suhteellisen korkeuden parametreihin. Yhdistämisen jälkeen lopputuloksena saatiin taulukko, jossa oli sarakkeina mitattu puu, oksan suhteellinen korkeus rungossa, säde ytimeistä pintaan oksalle kyseisellä havaintokorkeudella, oksan läpimitta rungon pinnassa sekä parametrit a, b ja c. Näiden avulla laskettiin mallin mukainen ulko-oksien suhteellinen läpimitta ja siitä mallin ennustama maksimiarvo. Ulko-oksien läpimitan ja sisäoksin maksimiarvon

perusteella laskettiin sisäoksan läpimitat suhteellisille etäisyyksille 0,1–1, etäisyyden 0,1 ollessa lähinnä ydintä ja 1 puun pinnassa.

Molempia estimointeja verrattiin sisäoksien oikeisiin arvoihin. Erikseen tarkasteltiin oksien läpimittojen keskiarvoja eri kohdissa runkoa, suhteessa korkeuteen ja rungon läpimittaan. Yleisesti ulko-oksien havaitut mittakorkeudet olivat välillä 20–80 % koko puun korkeudesta, koska tukit sahattiin 8 cm latvaläpimittaan asti. Viimeisen tukin katkaisukohta oli tällä määritelmällä siksi aina ennen puun täyttä pituutta.

Vertailut jaettiin kolmeen osaan (Ia ja Ib sekä II) seuraavasti:

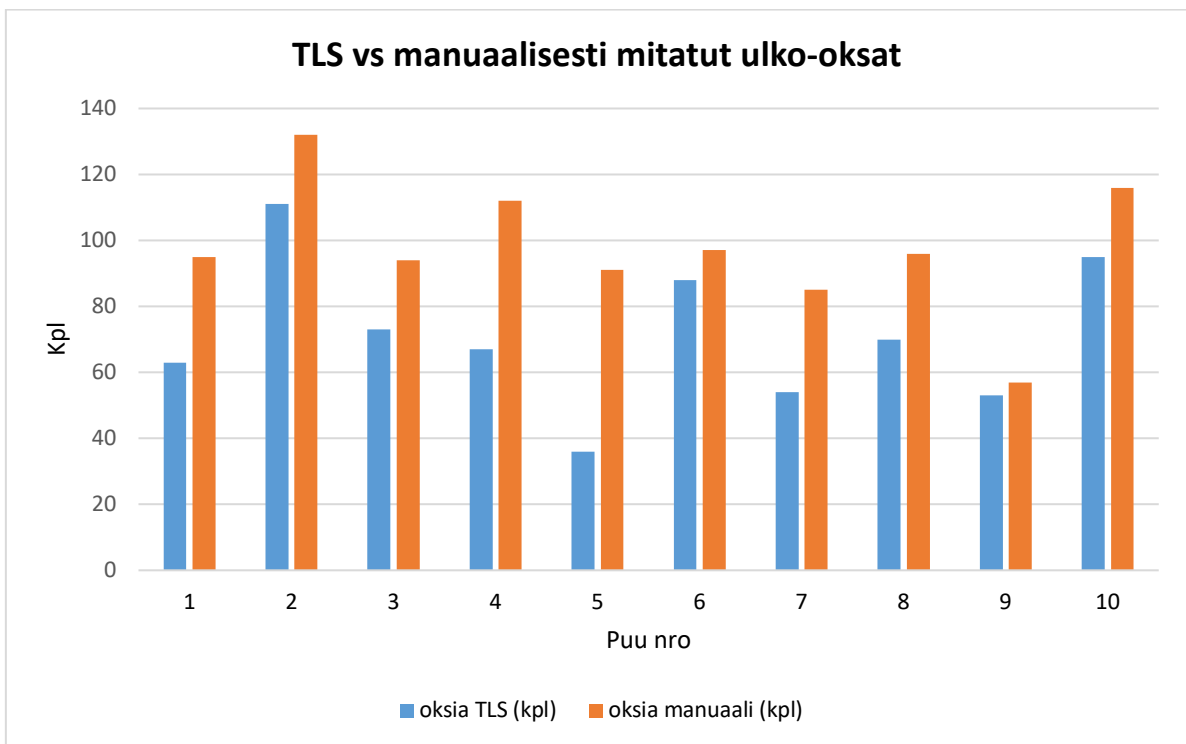
- I. Sisäoksien läpimittaestimaattien vertailu manuaaliseen referenssiin, kun estimoinnin lähtöarvoina olivat
  - a. Manuaaliset ulko-oksamittaukset
  - b. TLS-ulko-oksamittaukset
  
- II. Maasto- ja TLS-lähtöisten sisäoksien läpimittaestimaattien keskiarvojen vertailu keskenään

Arvioinnissa verrattiin mittaustapojen käytettävyyttä tutkimuksessa käytettyjen mäntyjen ulko-oksa-aineistojen perusteella (maasto- ja TLS-mittaukset) keskenään sekä selvitettiin sisäoksan läpimitan estimaattien eroavaisuus referenssiaineistoon verrattuna eri osissa runkoa molemmilla lähtöaineistoilla. Eroavaisuuksia mitatuissa ulko-oksien lukumäärässä tarkasteltiin mittaustavan toimivuuden kannalta. Sisäoksien läpimitan ennusteita tarkasteltaessa käytiin läpi mahdollisia syitä estimaattien eroavaisuuksiin.

## 4 TULOKSET

### 4.1 Ulko-oksamittaukset

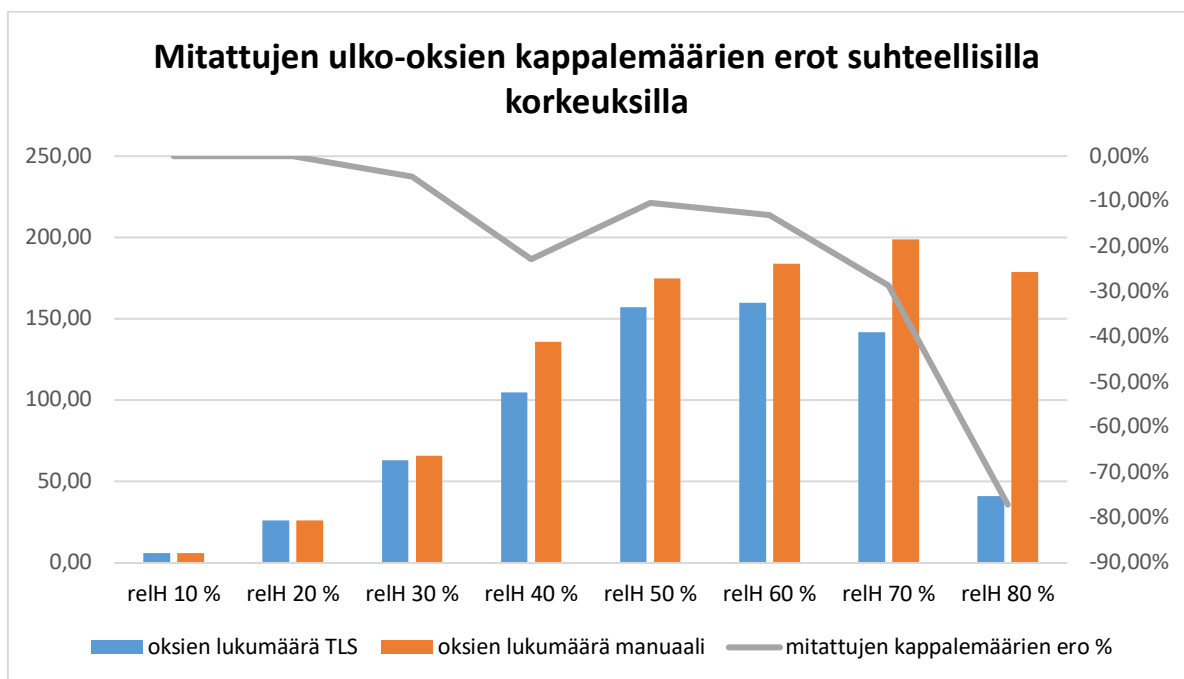
TLS-mittauksilla havaittiin 710 ulko-oksa, kun manuaalisesti käsin mittaamalla ulko-oksia löydettiin 975 kappaletta. Pistepilvestä havaittujen oksien osuus käsin mitatuista oksista oli 72,8 % mikä on linjassa aiempien tutkimuksien kanssa (esim. Pyörälä ym. 2018b tutkimuksessa havaittiin 69,9 %). Suurin virheaste oli puun numero 5 kohdalla, jossa pistepilvestä havaittiin vain 36 oksaa kun vastaava arvo manuaalisesti käsin mitattuna oli 91 oksaa. Pienin virheaste oli puun numero 9 kohdalla, jossa vastaavat arvot olivat 53 oksaa (TLS) ja 57 oksaa (manuaalisesti). Eroa tässä tapauksessa oli vain 7 %. Kuvassa 10 on esitetty havaintojen puukohtainen jakautuminen.



**Kuva 8.** Havaittujen ulko-oksiensa jakautuminen eri puilla. X-akselilla tutkimusta varten mitatut puut, y-akselilla oksien lukumäärä kappaleina. Puu numero viisi aiheutti suurimman eron mittaustapojen välillä, kun taas puu numero yhdeksän oli ulko-oksiensa lukumäärien mukaan lähes identtinen.

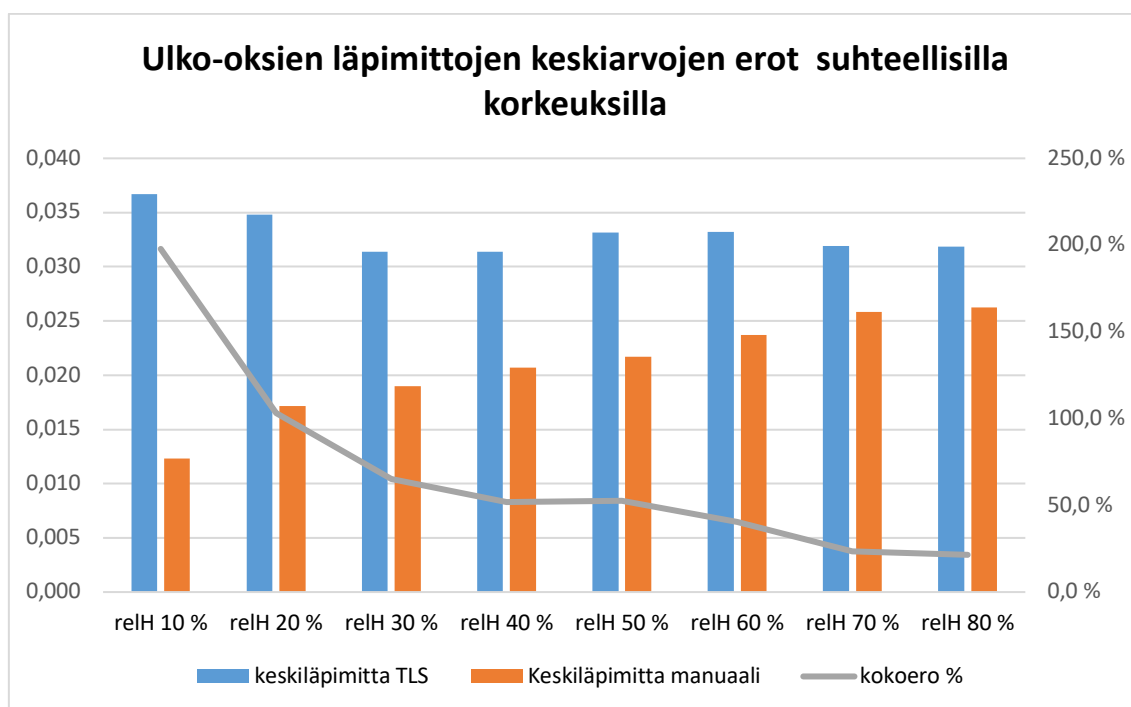
Tarkasteltaessa oksien havaintomäärien keskiarvoja suhteellisilla korkeuksilla huomataan, että alemmilla korkeuksilla TLS-mittaus ja manuaalinen käsimitaus pääsivät täsmälleen samoihin kappalemääriin. Vielä puolessakin välissä runkoa erot kappalemäärissä olivat alle 20 %. Vasta suhteellisella korkeudella 70 % pistepilvestä havaittiin merkittävästi vähemmän (28,6 %) ulko-oksia verrattuna manuaalisesti löydettyihin ulko-oksiin.

Oksien kappalemäärät olivat tällä suhteellisella korkeudella 142 kappaletta pistepilvestä löytyneitä oksia verrattuna 199 kappaleeseen manuaalisesti löytyneitä oksia. Suhteellisella korkeudella 80 % ero kasvoikin jo hyvin merkittäväksi. TLS-mittauksissa havaittiin enää 41 kappaletta ulko-oksia, kun käsin löydettiin 179 kappaletta. Pistepilvestä havaittuja oksia löydettiin täten 77,1 % vähemmän. Kuvassa 11 tarkastellaan kappalemääriä eri suhteellisilla korkeuksilla.



**Kuva 9.** Mittaustapojen vertailu kappalemäärällä suhteellisilla korkeuksilla. Keskiarvot kaikista puista. X-akselilla suhteelliset korkeudet, y-akselilla vasemmalla puolella kappalemäärät. Y-akselilla oikealla puolella prosenttiasteikko vertailua varten.

Läpimittojen keskiarvot olivat TLS-mittauksien osalta lähes käänteiset manuaalisesti mitattuihin oksiin. Manuaalisten mittausten keskiarvot kasvoivat kohti latvaa, mutta piste-pilvestä havaittujen ulko-oksien läpimittojen keskiarvot olivat suurimmillaan lähempänä tyveä. Eroavaisuudet tasoittuivat tästä syystä kohti latvaa alkaen 10 % suhteellisella korkeudella olevasta 197,8 % erosta ja päättyen 80 % korkeudella enää 21,5 % yliarvioon. Manuaalisiin mittauksiin verrattuna TLS kuitenkin yliarvioi läpimittoja järjestelmällisesti jokaisella korkeudella. Kuvassa 12 on kuvattu läpimittojen keskiarvojen muutoksia.



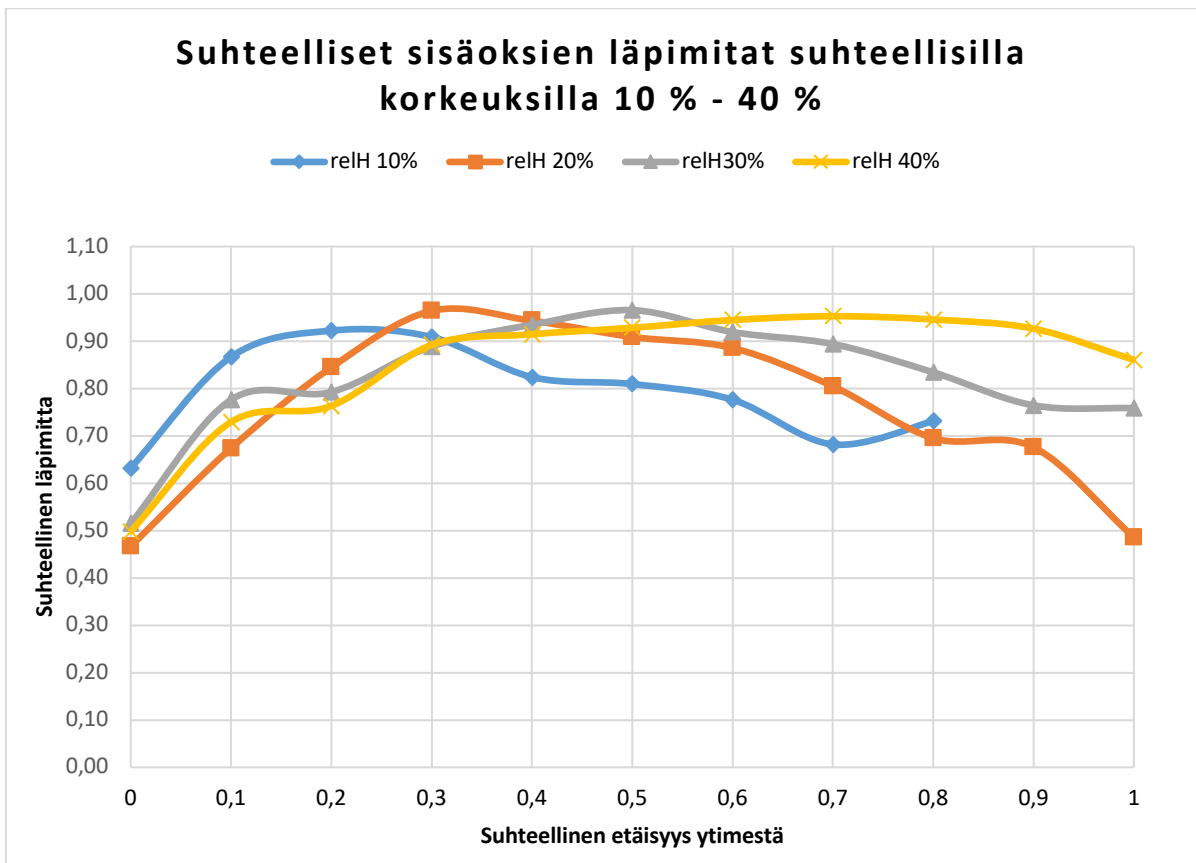
**Kuva 10.** Mittaustapojen eroavaisuudet ulko-oksien läpimittojen arvioinnissa. Keskiarvot kaikista puista. X-akselilla suhteelliset korkeudet, y-akselilla vasemmalla puolella ulko-oksien keskiläpimitta. Y-akselilla oikealla puolella prosenttiasteikko vertailua varten.

## 4.2 Sisäoksien läpimittamallin sovitus

Sisäoksia mitattiin 1828 kappaletta. Puiden kasvun aikana rungon sisään kyljestyneitä oksia oli näin 853 kappaletta (46,7 % oksista) verrattuna manuaalisesti mitattujen ulko-oksien kappalemääriin ja 1118 kappaletta (61,2 % oksista) verrattuna TLS-pistepilvestä havaittuihin ulko-oksiin. Ulko-oksia jäi mittaamatta rungon pinnalta lisäksi liian pienen

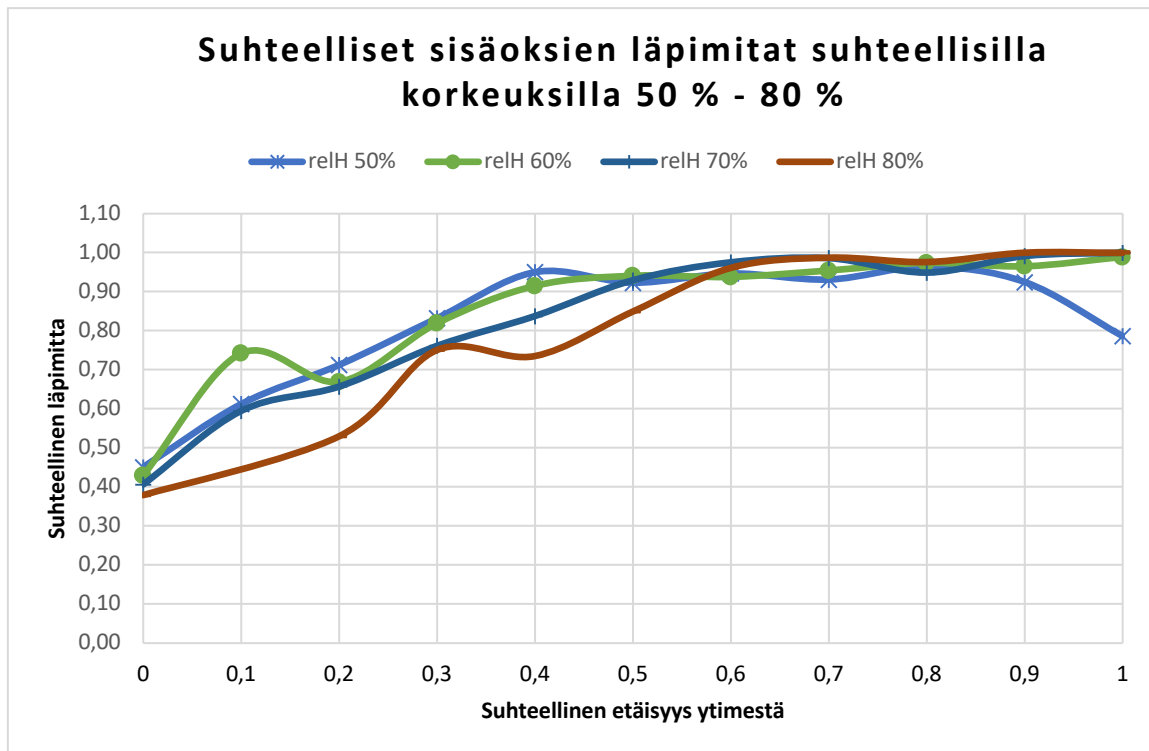
läpimitan takia, joten suoraan ei voi olettaa kaikkien havaitsemattomien oksien olevan kyljestyneitä.

Kuvassa 13 on kuvattu suhteellisen läpimitan muutoksia suhteellisen etäisyyden suhteen runkopuun alemmilla korkeuksilla laudoista mitattujen sisäoksien perusteella. Kuvassa käytetyt lukuarvot ovat havaintojen keskiarvoja ja läpimitan kohdalla sisäoksan havaintoa on aina verrattu saman oksan suurimpaan havaittuun läpimitaan etäisyydellä ytimestä pintaan. Kuvassa 14 on kuvattu samaa muutosta, mutta ylemmillä runkopuun korkeuksilla eroavaisuuksien hahmottamiseksi. Sisäoksien suurin suhteellinen läpimita näkyy puiden alemmilla korkeuksilla olevan selvästi ennen rungon pintaa verrattuna ylempiin korkeuksiin.



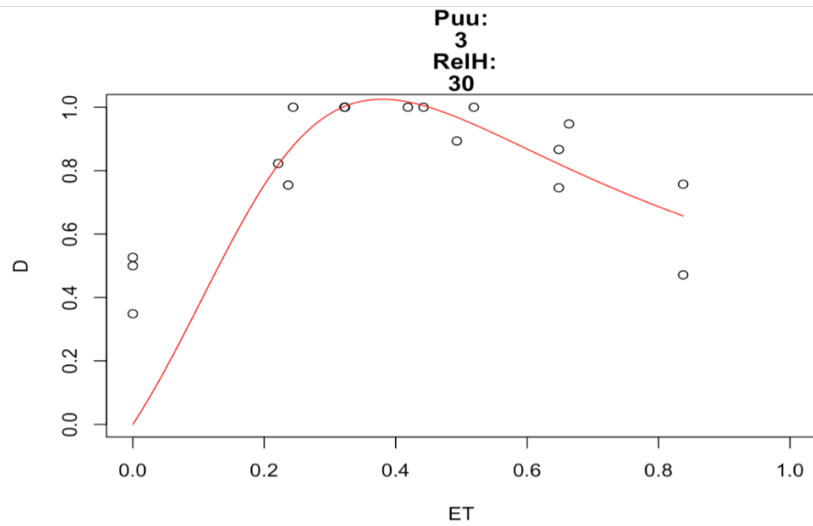
**Kuva 11.** Suhteellinen muutos 10 % - 40 % korkeuksilla oksan suhteellisen läpimitan ja etäisyyden suhteen. Kuvassa  $y = 1$  on sisäoksan maksimiläpimita ja  $x = 1$  on rungon pinta.



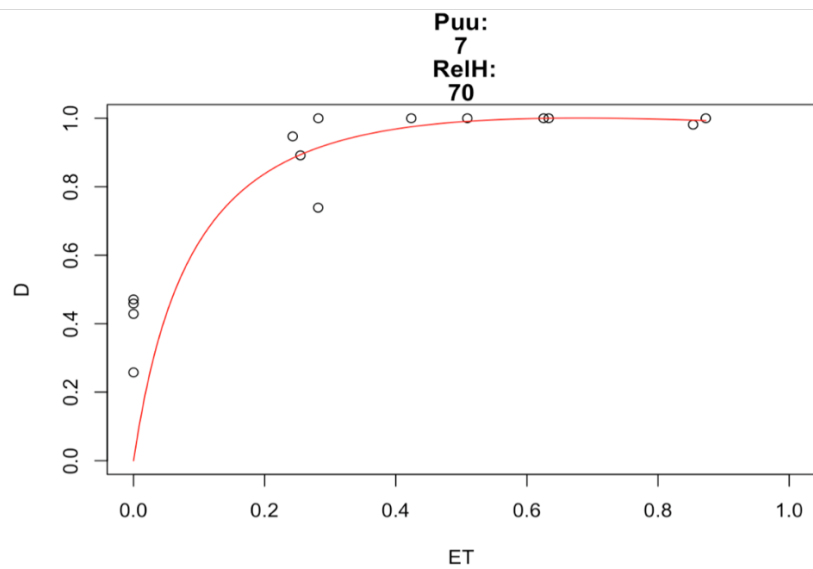


**Kuva 12.** Suhteellinen muutos 50 % - 80 % korkeuksilla sisäoksan suhteellisen läpimitan ja etäisyyden suhteen. Kuvassa  $y = 1$  on sisäoksan maksimiläpimitta ja  $x = 1$  on rungon pinta.

Läpimittamallin sovitus mitattuihin sisäoksiin tehtiin puukohtaisesti jokaiselle 5 % suhteelliselle korkeudelle kunhan niissä riitti läpimittojen havaintopisteitä. Mallin muodostumista aineistosta ja sovitekäyriä tarkastellaan kuvissa 17 ja 18. Kuvista näkyy, miten varsinkin pienemmillä suhteellisilla korkeuksilla sovitekäyrän kasvun tulisi olla nopea. Sovitus onnistui sitä paremmin, mitä enemmän mitattuja sisäoksan läpimittoja alueella oli.



**Kuva 15.** Sovitekäyrä puulle numero 3 suhteelliselle korkeudelle 30 %. X-akselilla suhteellinen etäisyys-arvo ja y-akselilla suhteellinen oksan läpimitta.



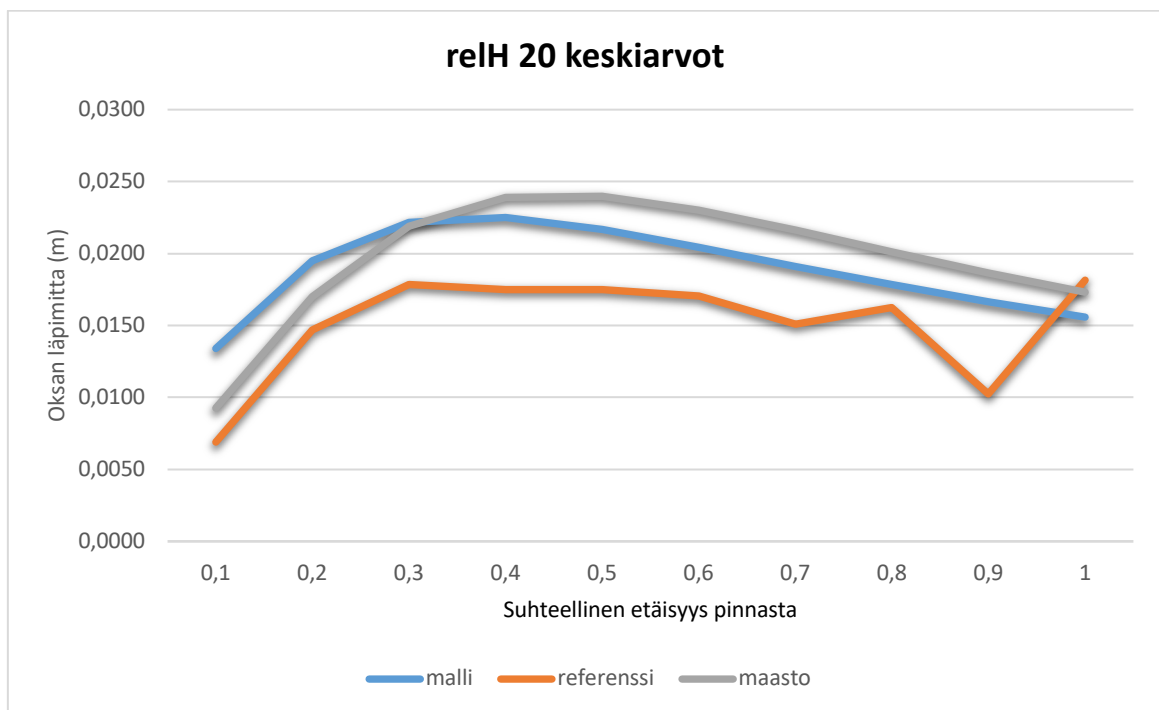
**Kuva 16.** Sovitekäyrä puulle numero 7 suhteelliselle korkeudelle 70 %. X-akselilla suhteellinen etäisyys-arvo ja y-akselilla suhteellinen oksan läpimitta.

### 4.3 Sisäoksien läpimittojen ennustaminen

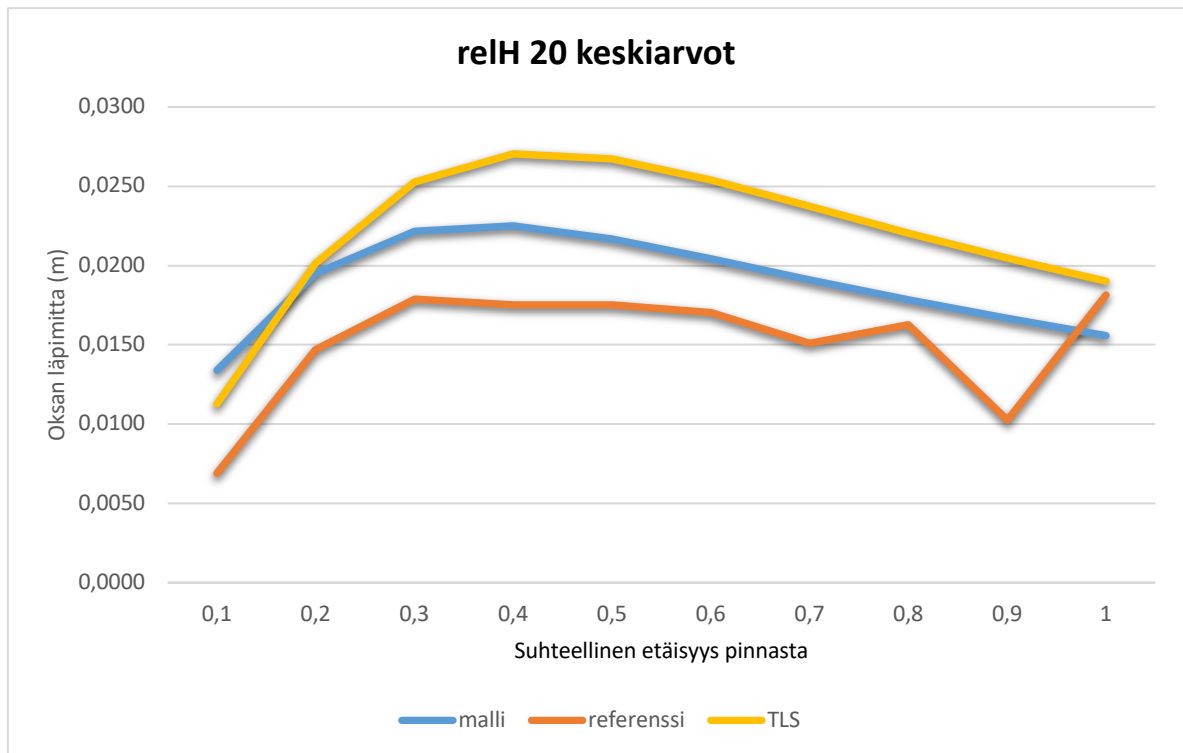
TLS-pistepilvistä mitattujen ulko-oksien läpimitoista estimoidut sisäoksien läpimitat olivat yleisesti alemmilla korkeuksilla arvioitu suuremmiksi kuin manuaalisesti mitatuista ulko-oksien läpimitoista estimoidut sisäoksien läpimitat. Tämä on linjassa aikaisempien tutkimuksien TLS-mittauksien yliarvion (esim. Pyörälä ym. 2018b) kanssa.

Molempien lähtöaineistojen kautta tuotetuilla estimaateilla oli vaikeuksia päästä manuaalisesti mitattujen sisäoksien referenssiaineiston tarkkuuteen lähellä puun ydintä. Estimaattien tuottamia ennusteita 20 % suhteellisella korkeudella on kuvattu kuvissa 15 ja 16. Lopuille korkeuksille ennustekuvaajat löytyvät liitteistä alkaen sivulta 50.

Lähellä ydintä mallin ennusteet erosivat merkittävästi referenssiaineiston sisäoksien läpimitoista. Sisäoksamittauksiin sovitettu malli kuitenkin yliarvioi mittaustuloksia.



**Kuva 17.** Referenssiaineiston, sovitetun mallin ja maastomittauksista ennustettujen oksien keskiläpimitat rungon suhteellisella korkeudella 20 %.



**Kuva 18.** Referenssiaineiston, sovitetun mallin ja TLS-mittauksista ennustettujen oksien keskiläpimitat rungon suhteellisella korkeudella 20 %.

Suurin positiivinen keskiarvojen välinen virhe oli TLS-estimaattien kohdalla 0,0422 m (42,2 mm) suhteellisella korkeudella 5 % ja suurin negatiivinen virhe oli -0,0119 m (11,9 mm) suhteellisella korkeudella 80 %. TLS-estimaattien tulokset poikkesivat referenssistä varsinkin aivan alemmilla ja ylempillä korkeuksilla. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty tarkemmin keskiarvojen välisiä virheitä ja niiden suuruusluokkia.

**Taulukko 1.** TLS-mittauksista mallinnettujen sisäöksien läpimittaestimaattien virheet. Mittayksikkö metri, estimaattien keskiläpimitoista vähennetty referenssiaineiston sisäöksien keskiläpimitat. Keskivirhe tarkoittaa taulukossa täten keskiarvojen välistä eroa. Lajittelu suhteellisen korkeuden ja rungon suhteellisen läpimitan mukaan. Kaikki yli 4 mm erot on korostettu värein, positiiviseen suuntaan vihreällä ja negatiiviseen suuntaan punaisella. Tummillä väreillä korostettu suurimpia virheitä, vaaleilla väreillä lähimmäs referenssiaineistoa osuneita estimaatteja.

Suhteellinen korkeus	Suhteellinen etäisyys	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	Keskivirhe (m)	0,0422	0,0381	0,0355	0,0324	0,0301	0,0283	0,0265	0,0259	0,0236	
10	Keskivirhe (m)	0,0068	0,0080	0,0083	0,0089	0,0089	0,0096	0,0115	0,0093	0,0165	
15	Keskivirhe (m)	0,0007	0,0032	0,0045	0,0027	0,0031	0,0047	0,0055	0,0054	-0,0054	
20	Keskivirhe (m)	0,0044	0,0064	0,0082	0,0096	0,0097	0,0082	0,0081	0,0049	0,0107	0,0009
25	Keskivirhe (m)		0,0034	0,0076	0,0056	0,0061	0,0052	0,0050	0,0046	0,0106	0,0061
30	Keskivirhe (m)	-0,0032	-0,0008	0,0018	0,0004	-0,0002	0,0005	0,0015	0,0000	-0,0018	-0,0013
35	Keskivirhe (m)	0,0055	0,0028	0,0073	0,0034	0,0069	0,0031	0,0060	0,0068	0,0046	0,0108
40	Keskivirhe (m)	-0,0042	0,0008	0,0004	-0,0029	-0,0012	-0,0018	-0,0020	-0,0025	-0,0009	-0,0038
45	Keskivirhe (m)	0,0022	0,0007	0,0026	0,0011	-0,0010	0,0033	-0,0017	0,0001	0,0001	-0,0104
50	Keskivirhe (m)	0,0046	0,0035	0,0043	0,0016	0,0025	0,0051	0,0020	0,0028	-0,0014	-0,0001
55	Keskivirhe (m)	-0,0029	-0,0021	0,0020	0,0020	-0,0015	0,0015	-0,0029	-0,0010	-0,0082	-0,0065
60	Keskivirhe (m)		-0,0019	0,0025	0,0037	0,0002	0,0016	0,0024	-0,0005	-0,0047	-0,0078
65	Keskivirhe (m)		-0,0013	0,0021	0,0023	0,0004	0,0000	0,0031	-0,0024	0,0011	-0,0047
70	Keskivirhe (m)		0,0031	0,0019	0,0033	-0,0005	0,0034	-0,0003	-0,0013	-0,0002	0,0016
75	Keskivirhe (m)		0,0075	-0,0016	0,0040	0,0048	-0,0039	-0,0043	0,0003	-0,0029	-0,0023
80	Keskivirhe (m)		0,0002		-0,0098	-0,0045	-0,0119	-0,0091	-0,0093	-0,0111	-0,0057

**Taulukko 2.** Manuaalisista mittauksista mallinnettujen sisäoksien estimaattien virheet. Mittayksikkö metri, estimaattien keskiläpimitoista vähennetty referenssiaineiston sisäoksien keskiläpimitat. Keskivirhe tarkoittaa taulukossa täten keskiarvojen välistä eroa. Lajittelu suhteellisen korkeuden ja rungon suhteellisen läpimitan mukaan. Kaikki yli 4 mm erot on korostettu värein, positiiviseen suuntaan vihreällä ja negatiiviseen suuntaan punaisella. Tummillä väreillä korostettu suurimpia virheitä, vaaleilla väreillä lähimmäs referenssiaineistoa osuneita estimaatteja.

Suhteellinen korkeus	Suhteellinen etäisyys	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	Keskivirhe (m)										
10	Keskivirhe (m)	0,0003	0,0006	0,0003	0,0005	0,0002	0,0008	0,0025	0,0003	0,0075	
15	Keskivirhe (m)	0,0012	0,0033	0,0044	0,0026	0,0030	0,0046	0,0054	0,0053	-0,0053	
20	Keskivirhe (m)	0,0024	0,0033	0,0048	0,0064	0,0070	0,0058	0,0060	0,0030	0,0089	-0,0008
25	Keskivirhe (m)		0,0024	0,0066	0,0045	0,0051	0,0042	0,0041	0,0037	0,0097	0,0053
30	Keskivirhe (m)	-0,0029	0,0000	0,0026	0,0013	0,0005	0,0012	0,0020	0,0005	-0,0014	-0,0010
35	Keskivirhe (m)	0,0057	0,0031	0,0076	0,0038	0,0072	0,0035	0,0064	0,0072	0,0050	0,0113
40	Keskivirhe (m)	-0,0020	0,0041	0,0043	0,0013	0,0030	0,0025	0,0022	0,0015	0,0031	0,0000
45	Keskivirhe (m)	0,0038	0,0026	0,0047	0,0033	0,0012	0,0056	0,0005	0,0023	0,0022	-0,0083
50	Keskivirhe (m)	0,0070	0,0054	0,0060	0,0030	0,0039	0,0065	0,0034	0,0043	0,0002	0,0017
55	Keskivirhe (m)	-0,0009	0,0009	0,0057	0,0062	0,0030	0,0063	0,0020	0,0039	-0,0034	-0,0017
60	Keskivirhe (m)		0,0008	0,0055	0,0070	0,0037	0,0051	0,0060	0,0031	-0,0011	-0,0041
65	Keskivirhe (m)		0,0009	0,0049	0,0055	0,0039	0,0037	0,0069	0,0015	0,0050	-0,0008
70	Keskivirhe (m)		0,0054	0,0056	0,0081	0,0048	0,0091	0,0056	0,0046	0,0057	0,0073
75	Keskivirhe (m)		0,0093	0,0012	0,0076	0,0091	0,0008	0,0005	0,0052	0,0020	0,0026
80	Keskivirhe (m)		0,0075		-0,0004	0,0055	-0,0015	0,0015	0,0016	-0,0001	0,0053

Manuaalisesti mitattujen ulko-oksien ollessa ennusteiden lähtöarvoina suurin positiivinen keskiarvojen välinen virhe oli 0,0093 m (9,3 mm) suhteellisella korkeudella 75 % ja suurin negatiivinen virhe oli vastaavasti -0,0083 m (8,3 mm) suhteellisella korkeudella 45 %. Manuaalisten mittauksien estimaatit antavat referenssiin verrattuna hieman suurempia arvoja kautta linjan. Molempien lähtöarvojen kautta päästiin myös tuloksiin, joissa estimaatti oli lähes täysin sama kuin referenssiarvo. Nämä näkyvät taulukoissa 1 ja 2 harmaina soluina.

Taulukossa 3 on kuvattu vertailu maasto- ja TLS-lähtöisten sisäoksien keskiläpimitaestimaattien kesken. Maastoestimaateista vähennettiin TLS-estimaattien arvot. Toisin kuin aiemmissa taulukoissa, on tässä taulukossa kuvattu selkeyden vuoksi kaikki positiiviset arvot vihreän eri sävyillä ja negatiiviset arvot punaisen sävyillä. Yli tai lähes 10 mm eroavaisuudet ovat kuvattuina kirrkaammilla sävyillä.

Estimaattien kesken suurin negatiivinen keskivirhe, -0,009 m (9 mm), toistui useamman kerran suhteellisella korkeudella 10 %. Suurin positiivinen keskivirhe oli 0,011 m (11 mm) suhteellisella korkeudella 80 %, sekä suhteellisella etäisyydellä 0,9 että 1. TLS-lähtöiset estimaatit ovat selvästi suurempia alemmilla korkeuksilla aina 20 % suhteelliseen korkeuteen asti, tämän jälkeen maastolähtöiset estimaatit antavat kautta linjan hieman suurempia arvoja. Suhteellisilla korkeuksilla 70 % - 80 % manuaalisten mittauksien estimaattien arvot vielä kasvattavat eroa TLS-mittauksien estimaatteihin verrattuna. Suuria, reilusti yli 10 mm eroavaisuuksia ei ole.

**Taulukko 3.** Maasto- ja TLS-lähtöisten sisäoksien keskiläpimittaestimaattien vertailu keskenään. Mittayksikkö metri, manuaalisten mittauksien estimaattien keskiläpimitoista vähennetty TLS-mittauksien estimaattien keskiläpimitat. Keskivirhe tarkoittaa taulukossa täten keskiarvojen välistä eroa. Lajittelu suhteellisen korkeuden ja rungon suhteellisen läpimitan mukaan. Tummillä väreillä korostettu suurimpia virheitä, vaaleilla väreillä lähempänä nollaa olevia arvoja.

Suhteellinen korkeus	Suhteellinen etäisyys	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	Keskivirhe (m)										
10	Keskivirhe (m)	-0,0065	-0,0074	-0,0080	-0,0084	-0,0087	-0,0089	-0,0090	-0,0090	-0,0090	-0,0089
15	Keskivirhe (m)	0,0005	0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
20	Keskivirhe (m)	-0,0020	-0,0032	-0,0034	-0,0031	-0,0027	-0,0024	-0,0021	-0,0019	-0,0018	-0,0017
25	Keskivirhe (m)	-0,0008	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0009	-0,0009	-0,0008	-0,0008
30	Keskivirhe (m)	0,0003	0,0008	0,0009	0,0009	0,0008	0,0007	0,0005	0,0004	0,0004	0,0002
35	Keskivirhe (m)	0,0002	0,0003	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005
40	Keskivirhe (m)	0,0022	0,0033	0,0039	0,0042	0,0043	0,0043	0,0042	0,0041	0,0039	0,0038
45	Keskivirhe (m)	0,0016	0,0019	0,0022	0,0023	0,0023	0,0022	0,0022	0,0022	0,0021	0,0021
50	Keskivirhe (m)	0,0023	0,0020	0,0016	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0015	0,0016	0,0017
55	Keskivirhe (m)	0,0019	0,0030	0,0037	0,0043	0,0046	0,0048	0,0048	0,0049	0,0048	0,0048
60	Keskivirhe (m)	0,0020	0,0027	0,0031	0,0033	0,0034	0,0035	0,0035	0,0036	0,0036	0,0036
65	Keskivirhe (m)	0,0014	0,0022	0,0028	0,0032	0,0035	0,0037	0,0038	0,0039	0,0039	0,0039
70	Keskivirhe (m)	0,0006	0,0023	0,0037	0,0047	0,0054	0,0057	0,0059	0,0059	0,0058	0,0057
75	Keskivirhe (m)	0,0010	0,0019	0,0028	0,0036	0,0042	0,0046	0,0049	0,0049	0,0050	0,0049
80	Keskivirhe (m)	0,0033	0,0073	0,0087	0,0094	0,0100	0,0103	0,0106	0,0108	0,0110	0,0110

## 5 TULOSTEN TARKASTELU

Mitattujen oksien kappalemäärät ja sitä kautta mallinnuksen aineiston määrä vaikuttavat myös lopputuloksiin. Pistepilvestä saatiin vähän ulko-oksia ylemmiltä elävän latvuksen kerroksilta ja toisaalta lähellä tyveä läpimitat olivat yliarvioituina, johtuen todennäköisesti pienempien kuolleiden oksien jäämisestä pois mittauksista. Tämä kertoo osaltaan automaattisen oksantunnistuksen vaikeuksista prosessissa ja on todettu aiemminkin (esim. Pyörälä ym. 2018a). Rungon keskiosissa samaa ongelmaa ei havaittu ja tulokset olivatkin hyvin verrattavissa manuaalisten mittausten estimaattien kanssa. TLS myös havaitsee todennäköisemmin kokoluokaltaan suurempia kuin pienempiä oksia jolloin suuremmat oksat ovat korostettuina mittauksissa.

Tarkasteltaessa mallinnuksien virhelähteitä huomattiin myös, että virheet tulivat usein tietyn puun kohdalla samasta suhteellisesta korkeudesta, esimerkiksi puun numero 5 kohdalla 50 % suhteelliselta korkeudelta. Sisäoksien läpimittamallin sovituksessa käytetty funktio ei ole näissä tapauksissa saanut tarpeeksi havaintoja aineistosta muodostaakseen tarpeeksi tasaisen käyrän ja tarkat parametrit kasvun mallinnusta varten. Suurin lukumäärä negatiivisia arvoja havaittiin puissa 2 ja 7 niin TLS-aineiston osalta kuin manuaalisten mittausten osalta. Puun 5 ja 7 kohdalla havaittiin pistepilven olevan epämuodostunut. Epämuodostuma johtui todennäköisesti mittaushetkellä vallinneista tuulisista olosuhteista, jotka Vaaja ym. (2016) onkin todennut yhdeksi TLS-mittausten suurimmista virhelähteistä. Mittaustilanteet tulisikin ajoittaa tarkasti, etteivät sääolosuhteet pääse vaikuttamaan tuloksiin. Pistepilvestä havaittujen ulko-oksiensa lukumäärät olivat myös pienimmillään puissa numero 5 ja 7 verrattuna manuaalisiin käsimitoituksiin.

Osittain nämä tulokset johtuivat mallin valinnasta, jolla havaittiin olevan suuri vaikutus tuloksiin. Mallin sovitusta toisaalta tasoitti suurimpia heittoja, mutta toisaalta korosti kasvua kohdissa, joissa oksan läpimitan kasvun tulisi jo kääntyä laskuun. Vaikeudet mallin muodostumisessa täysin referenssiaineistoa vastaavaksi olivat havaittavissa sovitekäyriä muodostettaessa. Sisäoksien kasvu on todella nopeaa alkuvaiheessa mikä näkyy kuvissa sovitekäyrän vasemmalle puolelle jäävistä pisteistä. Mallin havaittiin myös muutamassa kohdassa tuottavan virheellisesti negatiivisia läpimittoja estimaateille lähellä ydintä. Näitä negatiivisia arvoja lähellä ydintä on ilmennyt myös aiemmissa tutkimuksissa



(Duchateau ym. 2013). Lähes kaikki negatiiviset arvot tulivat alueelta, joka oli 0,1 – 0,2 suhteellisella etäisyydellä ytimestä (TLS –virheiden osuus alueella n. 69 % ja manuaalisen mittauksen virheet n. 66 %). Syynä on mitä luultavimmin mallin sopimattomuus nopeaan läpimitan kasvuun lähellä ydintä tapauksissa, joissa kasvu ei kuitenkaan jatku samalla voimakkuudella pintaan asti. Tämän vääristymän aiheuttaa todennäköisesti lähtöaineiston kuolleet oksat, jolloin maksimiläpimita ei aina olekaan pinnassa.

TLS-ennusteet yliarvioivat sisäoksien läpimittoja alemmilla rungon korkeuksilla, kun taas ylemmillä korkeuksilla ennusteisiin syntyy aliarviota. Maastolähtöisten mittausten ollessa lähtöaineistona tuottavat ennusteet lähes kautta linjan hieman yliarviota sisäoksien läpimitoista. Lähellä latvaa olevilla suhteellisilla korkeuksilla tämä vielä hieman korostui. Keskiarvoja tarkastellessa TLS-mittauksella päästiin suhteellisilla korkeuksilla 30 % - 65 % jopa tarkempiin tuloksiin kuin manuaalisten mittausten pohjalta luoduilla ennusteilla. Yksittäisten mallinnustulosten hajonta oli kuitenkin TLS-mittauksissa maastomittauksiin verrattuna suurempaa. Mallinnuksen vaikeus 80 % suhteellisella korkeudella oleville sisäöksille selittyy myös osittain sillä, että jatkuvia mittauksia sisäoksien läpimitoille ei sauhuksen jälkeen saatu läheltä latvaa samalla volyymilla kuin alempana rungossa.

Toisaalta TLS-ennusteiden yliarviointi johtui siitä, että TLS-mittaus yliarvioi myös mitattuja ulko-oksia kuten aiemmissa tutkimuksissa on havaittu (Pyörälä ym. 2018b). Tässäkin tutkimuksessa tehtiin havainto, että TLS-aineistosta automaation kautta poimitut oksat olivat lähtökohtaisesti horisontaaliselta läpimitaltaan suurempia, varsinkin lähellä tyveä. Mittauksissa ilmeni myös valeoksia 5 % suhteellisella korkeudella, joita ei manuaalisesti ollut mitattu. Lisäksi pistepilvestä poimitut ulko-oksien keskiläpimitat pienenevät tyvestä latvaa kohti, kun taas manuaalisesti mitattujen oksien kohdalla kasvu tapahtui juuri toisinpäin. Tutkimusten (Björklund (1997, Pinto 2003) mukaan keskiarvoltaan suurimman sisä- sekä ulko-oksen läpimitan tulisi löytyä elävästä latvuksesta.

Ennusteet onnistuivat parhaiten kuvaamaan latvuksen kehitystä puun keskivaiheilla, mutta alemmilla korkeuksilla sisäoksen läpimitan ennusteilla oli hankaluuksia kuvata oikeanlaista kehitystä. Latvan kuvaaminen realistisesti oli myös ongelmallista. Puunhankinnan kannalta voisi miettiä TLS-mittauksiin perustuvaa mallintamista käytettävän pienemmissä kohteissa tai välitukkien suunnittelussa, mutta tyvitukki tulisi joka tapauksessa kuvata vielä erikseen oksaisuuden varmistamiseksi. Puuttuvia havaintoja runkojen alaosista voitaisiin täydentää myös mallinnuksella. Pistepilvestä on kuitenkin mahdollista

erottaa oksarajat, mikä helpottaa jo osaltaan suunnittelua. Yhdistämällä TLS-mittauksiin perustuvia sisäoksien estimaatteja esimerkiksi Lutherin ym. (2013) tapaisiin, ALS-mittausten pohjalta tehtyihin mallinnuksiin voitaisiin saada laajemmiltakin alueilta lisätietoja.

Lisätutkimuksen aiheena voisi olla myös ilmansuuntien vaikutus läpimittaprofiiliin, sillä aineistoon kerättiin myös tieto oksan ilmansuunnasta. Lisäksi aineistoon mitattiin sekä selvitettiin, onko oksa elävä (E) vai kuollut (K) tarkastelemalla oksan ydintä ja pintapuuta. Tämä tieto, oksan morfologia (M), kirjattiin myös jokaisen mitatun oksan kohdalle. Rungon mitattua pohjoispuolta käyttäen määritettiin myös ilmansuunta, jota kohti oksa oli kasvanut. Sisäoksien kohdalla toimittiin samoin kuin ulko-oksien kohdalla ja mitattiin oksan kasvun suuntainen ilmansuunta ja määriteltiin oksan fysiologinen tila, morfologia (E, K tai L). Erotuksena ulko-oksien mittauksiin sisäoksien kohdalla lisättiin morfologian vaihtoehdoksi elävän ja kuolleen oksan lisäksi vielä laho-oksia (L). Sisäoksien morfologian määrittäminen tehtiin visuaalisesti Pohjoismaiden sahatavara – Lajitteluohjeet (STMY 2016) ohjeiden perusteella. Mittaukset tehtiin ajatellen, että aineistosta olisi hyötyä muutenkin kuin vain tämän tutkimuksen osalta.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin vain sisäoksien läpimittoihin, mutta tarkemman tiedon saamiseksi tulisi muodostaa myös sisäoksan sijainnin ja oksakulman ennustava mallinnus. Tutkimusta varten kerätty aineisto antaa siihen mahdollisuuden.

## **6 JOHTOPÄÄTÖKSET**

Päätellen siitä, että tulosten perusteella TLS-mittauksella päästiin rungon keskikorkeuksilla jopa tarkempiin tuloksiin kuin manuaalisten mittausten pohjalta luoduilla estimaateilla, voidaan todeta TLS-mittausten soveltuvan kalibrointiaineiston keräämiseen. Tulosten ja aiempien tutkimusten perusteella TLS-mittauksilla on taipumus yliarvioida ulko-oksien kokoa, mikä tulee ottaa huomioon. Sisäoksien estimointi ulko-oksien perusteella on teoriassa jo mahdollista, mutta tarkkojen mittaustulosten saavuttaminen vaatii vielä lisämittauksia. Rajoittavampi tekijä tuntuu kuitenkin olevan mallin valinta kuin mittaustapa.

Sisäoksien ennustamiseen käytettävän läpimittamallin valintaan tulisikin käyttää erityistä tarkkuutta. Lisämittauksia ja -mallinnuksia tehtäessä sekä suurempaa aineistoa käytettäessä voisi olla hyvä tehdä erikseen mallit kuolleille oksille ja terveille oksille. Terveillä oksilla maksimiläpimitta on aina rungon pinnassa, kun taas kuolleilla oksilla maksimiläpimitta voi olla missä tahansa kohtaa matkalla ytimeistä pintaan. Erillisillä malleilla päästäisiin tästä syystä todennäköisesti tarkempiin tuloksiin.

Tekniikan kehittyessä TLS-pistepilvestä voisi olla mahdollista erottaa terve ja kuollut oksa, sillä ALS-mittauksissa tähän suuntaan ollaan jo menossa. Pyörälä ym. (2018b) piti tätä myös todennäköisenä vaihtoehtona tulevaisuuden kannalta. Jos mallit onnistuttaisiin sovittamaan terveen ja kuolleen oksan mukaan lisäksi se huomattavasti tiedon määrää ja parantaisi mallien tuottamaa ennustetta.

Tulevaisuudessa TLS-mittausten osalta voidaan pistepilvestä saada tarkempaa tietoa ja automatisoida tiedon keruuta. Käytännön sovelluksena yksi vaihtoehto on maastolaserkeilaimen asentaminen harvesteriin. Tässä vaihtoehdossa MLS-mittaukset ja pistepilven kerääminen kohteesta suoritettaisiin muiden operatiivisten toimenpiteiden ohessa. Lopullinen tavoite olisi reaaliaikaisten laatutunnusten estimaattien tuottaminen tuotannonohjausjärjestelmää varten.

Aiempien tutkimuksien (esim. Duchateau ym. 2013, Osborne ja Maguire 2015) hyvät mallinnustulokset antavat syytä uskoa, että sisäoksien läpimittaprofiilin mallintaminen onnistuu tarkasti myös maastolaserkeilausta käyttämällä. Tarkan mallinnuksen saavuttamiseksi sisäoksien kohdalla voitaisiin yhdistää mittauksia röntgen-CT-kuvauksista ja sahatuista kappaleista.

## LÄHDELUETTELO

Barbour, J. (2004). Wood Formation and Properties: Wood Quality. Julkaisussa: Burley J. (toim.). Encyclopedia of Forest Sciences. Elsevier Ltd, Kidlington, Oxford. S.1840-1846.

Björklund, L. (1997). The interior knot structure of *Pinus sylvestris* stems. Scandinavian Journal of Forest Research 12: 403–412. <http://dx.doi.org/10.1080/02827589709355429>.

Björklund, L. & Moberg, L. (1999). Modelling the inter-tree variation of knot properties for *Pinus sylvestris* in Sweden. Studia forestalia Suecica 207. 23 s.

Bowyer, J.L., Shmulsky, R. & Haygreen, J.H. (2007). Forest Products and Wood Science: An Introduction. Blackwell Publishing, Ames, Iowa. 558 s.

Duchateau, E., Longuetaud, F., Mothe, F., Ung, C., Auty, D. & Achim, A. (2013). Modelling knot morphology as a function of external tree and branch attributes. Canadian Journal of Forest Research 43: 266-277. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0365>.

Fajstar, M., Paschová, Z., Giakli, K., Vavrčik, Hš., Gryc, Ví. & Urban, J. (2018). Auxin (IAA) and soluble carbohydrate seasonal dynamics monitored during xylogenesis and phloemogenesis in Scots pine. iForest 11: 553-562. <https://doi.org/10.3832/ifor2734-011>.

Hakkila, P. (1971). Coniferous branches as a raw material source. A sub-project of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 75.1. 60 s.

Hakkila, P., Laasasenaho, J. & Oittinen, K. (1972). Korjuuteknisiä oksatietoja. Folia

Forestalia 147. 15 s.

Hilker, T., Coops, N. C., Newnham, G. J., van Leeuwen, M., Wulder, M. A., Stewart, J. & Culvenor, D. S. (2012). Comparison of Terrestrial and Airborne LiDAR in Describing Stand Structure of a Thinned Lodgepole Pine Forest. *Journal of Forestry* 110(2): 97-104. Doi: <https://doi.org/10.5849/jof.11-003>

Hyytiäinen, A., Viitanen, J. & Mutanen, A. (2010). Suomalaisten itsenäisten sahojen tuotannon tehokkuus 2000-luvulla. Metlan työraportteja 167. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp167.htm>. [Viitattu 5.3.2018].

Kankare, V., Joensuu, M., Vauhkonen, J., Holopainen, M., Tanhuanpää, T., Vastaranta, M. & Sipi, M. (2014). Estimation of the timber quality of scots pine with terrestrial laser scanning. *Forests*. 5(8): 1879-1895. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/f5081879>

Kankare, V., Liang, X., Vastaranta, M., Yu, X., Holopainen, M. & Hyyppä, J. (2015). Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 108: 161–171. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007>

Kellomäki, S., Lämsä, P., Oker-Blom, P. & Uusvaara, O. (1992). Männyn laatukasvatus. *Silva Carelica* 23. 141 s.

Kuprevicius, A., Auty, D., Achim, A. & Caspersen, J. P. (2013). Quantifying the influence of live crown ratio on the mechanical properties of clear wood. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 86: 361 - 369. Doi: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt006>

Kärkkäinen, M. (1986). Malli männyn, kuusen ja koivun puuaineen oksaisuudesta. *Silva Fennica* 20(2): 107-116.

Kärkkäinen, M. (2007). Puun rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus oy. Karisto Oy, Hämeenlinna. 468 s.

Larson, P.R. (1969). Wood Formation and the Concept of Wood Quality. *Yale School of Forestry & Environmental Studies Bulletin Series* 69. 54 s.

Lemieux, H., Samson, M. & Usenius, A. (1997). Shape and distribution of knots in a sample of *Picea abies* logs. *Scandinavian Journal of Forest Research* 12: 50 – 56.

Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M. & Holopainen, M. (2012). Automatic Stem Mapping Using Single-Scan Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50: 661–670. Doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161613>

Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M. & Vastaranta, M. (2016). Terrestrial Laser Scanning in Forest Inventories.

Luther, J. E., Skinner, R., Fournier, R. A., van Lier, O. R., Bowers, W. W., Côté, J-F., Hopkinson, C. & Moulton, T. Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 87(2): 313–326. Doi: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt039>

Lämsä, P., Kellomäki, S. & Väisänen, H. (1990). Nuorten mäntyjen oksikkuuden riippuvuus puuston rakenteesta ja kasvupaikan viljavuudesta. *Folia Forestalia* 746.

Metsäntutkimuslaitos. (2014). Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Tammerprint Oy, Tampere. 426 s.

Mäkelä, A., Grace, J. C., Deckmyn, G., Kantola, A. & Campioli, M. (2010). Simulating wood quality in forest management models. *Forest Systems* 19: 48 – 68.

Mäkelä, A. & Vanninen, P. (2001). Vertical structure of Scots pine crowns in different age and size classes. *Trees* 15: 385. <https://doi.org/10.1007/s004680100118>.

Mäkinen, H. & Mäkelä, A. (2002). Predicting basal area of Scots pine branches. *Forest Ecology and Management* 179: 351 - 362.

Osborne, N. & Maguire, D. (2015). Modeling knot geometry from branch angles in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Canadian Journal of Forest Research* 46: 215 – 224. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0145>

Pietilä, J. (1989). Shape of Scots pine knots close to the stem pith. *Silva Fennica* 4: 287-299.

Pinto, I., Pereira, H., & Usenius, A. (2003). Analysis of log shape and internal knots in twenty Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems based on visual scanning and computer aided reconstruction. *Annals of Forest Science* 60: 137–144.

Pyörälä, J., Kankare, V., Vastaranta, M., Rikala, J., Holopainen, M., Sipi, M., Hyypä, J., & Uusitalo, J. (2018). Comparison of terrestrial laser scanning and X-ray scanning in measuring Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) branch structure. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33: 291 – 298.

Pyörälä, J., Liang, X., Vastaranta, M., Saarinen, N., Kankare, V., Wang, Y., Holopainen, M., & Hyypä, J. (2018). Quantitative Assessment of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Whorl Structure in a Forest Environment Using Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11: 3598 – 3607.

Ruoka- ja luonnonvaratilastojen e-vuosikirja 2018. (2018). [Verkkodokumentti]. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: [https://stat.luke.fi/sites/default/files/luke-luobio\\_59\\_2018-v2-kp.pdf](https://stat.luke.fi/sites/default/files/luke-luobio_59_2018-v2-kp.pdf).

Samson, M. (1993). Modelling of knots in logs. *Wood Science and Technology* 27(6): 429-437. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00193865>

Schweingruber, F.H. (2007). *Wood Structure and Environment*. Springer Series in Wood Sciences. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York. 279 s.

Shigo, A.L. (1984). Tree Decay and Pruning. *Arboricultural Journal* 8: 1-12. Doi: <https://doi.org/10.1080/03071375.1984.9746646>.

Sit, V. & Poulin-Costello, M. (1994). *Catalog of Curves for Curve Fitting*. Biometrics information handbook series. Forest Science Research Branch, Ministry of Forests, Victoria, British Columbia. 116 s.



Suomen Sahateollisuusmiesten Yhdistys. (2016). Pohjoismainen sahatavara. Mänty- ja kuusisahatavaran lajitteluohjeet. Alkuperäinen otsikko: Nordic Timber. 66 s.

Todoroki, C., Monserud, R.A., Parry, D.L. (2005). Predicting internal lumber grade from log surface knots: actual and simulated results. *Forest Products Journal* 55: 38 – 47.

Uusitalo, J. (1997). Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. *Acta Forestalia Fennica* 259. 56 s.

Vaaja, M., Virtanen, J-P., Kurkela, M., Lehtola, V., Hyyppä, J., & Hyyppä, H. (2016). The Effect of Wind on Tree Stem Parameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III-8: 117 – 122.

Wilson, K. & White, D.J.B. (1986). *The Anatomy of Wood: its Diversity and Variability*. Stobart & Son Ltd, London. 309 s.

Zink-Sharp, A. (2003). The mechanical properties of wood. Julkaisussa: Barnett J.R. ja Jeronimidis G. (toim.). *Wood Quality and its Biological Basis*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford. s.187 – 210.

## LIITTEET

**Liite 1.** Ennusteiden kuvaajat jaettuna eri mittaustapojen ja suhteellisten korkeuksien mukaan. Samasta korkeudesta aina kaksi kuvaajaa, molemmissa eri mittaustavan lisäksi sisäoksien läpimittoihin sovitettu malli ja pelkkä referenssiaineisto mukana.

