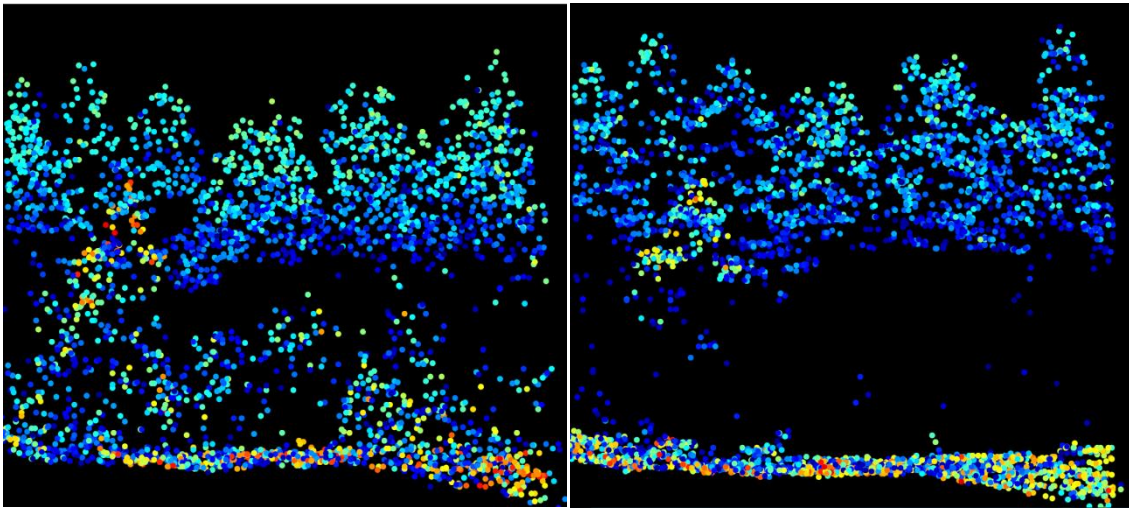


Alikasvoksen mittaaminen ja kartoitus laserkeilauksella



Pro gradu -tutkielma

Aarne Hovi

Helsingin yliopisto

Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta

Metsätieteiden laitos

Kesäkuu 2011

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos — Institution — Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä — Författare — Author Hovi, Arne Johannes			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Alikasvoksen mittaus ja kartoitus laserkeilauksella			
Oppiaine — Läroämne — Subject Metsäekologia			
Työn laji — Arbetets art — Level Maisterin tutkielma		Aika — Datum — Month and year Kesäkuu 2011	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 74 s. + liitteet 9 s.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Tasaikäisen metsän alle muodostuvilla alikasvoksilla on merkitystä puunkorjuun, metsänuudistamisen, näkemä- ja maisema-analyysien sekä biodiversiteetin ja hiilitaseen arvioinnin kannalta. Ilma-aluksista tehtävä laserkeilaus on osoittautunut tehokkaaksi kaukokartoitusmenetelmäksi varttuneiden puustojen mittauksessa. Laserkeilauksen käyttöönotto operatiivisessa metsäsuunnittelussa mahdollistaa aiempaa tarkemman tiedon tuottamisen alikasvoksista, mikäli alikasvoksen ominaisuuksia voidaan tulkita laseraineistoista. Tässä työssä käytettiin tarkasti mitattuja maastokoealoja ja kaikulaserkeilausaineistoja (<i>discrete return LiDAR</i>) usealta vuodelta (1–2 km lentokorkeus, 0,9–9,7 pulssia m²). Laserkeilausaineistot oli hankittu Optech ALTM3100 ja Leica ALS50-II sensoreilla. Koealat edustavat suomalaisia tasaikäisiä männiköitä eri kehitysvaiheissa. Tutkimuskysymykset olivat: 1) Minkälainen on alikasvoksesta saatu lasersignaali yksittäisen pulssin tasolla ja mitkä tekijät signaaliin vaikuttavat? 2) Mikä on käytännön sovelluksissa hyödynnettävien aluepohjaisten laserpiirteiden selitysvoima alikasvospuuston ominaisuuksien ennustamisessa? Erityisesti haluttiin selvittää, miten laserpulssin energiahäviöt ylempiin latvuskerroksiin vaikuttavat saatuun signaaliin, ja voidaanko laserkaikujen intensiteetille tehdä energiahäviöiden korjaus. Puulajien väliset erot laserkaipun intensiteetissä olivat pieniä ja vaihtelivat keilauksesta toiseen. Intensiteetin käyttömahdollisuudet alikasvoksen puulajin tulkinnassa ovat siten hyvin rajoittuneet. Energiahäviöt ylempiin latvuskerroksiin aiheuttivat alikasvoksesta saatuun lasersignaaliin kohinaa. Energiahäviöiden korjaus tehtiin alikasvoksesta saaduille laserpulssin 2. ja 3. kaiuille. Korjauksen avulla pystyttiin pienentämään kohteen sisäistä intensiteetin hajontaa ja parantamaan kohteiden luokittelutarkkuutta alikasvoskerroksessa. Käytettäessä 2. kaikuja oikeinluokitusprosentti luokituksessa maan ja yleisimmän puulajin välillä oli ennen korjausta 49,2–54,9 % ja korjauksen jälkeen 57,3–62,0 %. Vastaavat kapp-arvot olivat 0,03–0,13 ja 0,10–0,22. Tärkein energiahäviöitä selittävä tekijä oli pulssista saatujen aikaisempien kaikujen intensiteetti, mutta hieman merkitystä oli myös pulssin leikkausgeometrialla ylempään latvuskerroksen puiden kanssa. Myös 3. kaiuilla luokitustarkkuus parani. Puulajien välillä havaittiin eroja siinä, kuinka herkästi ne tuottavat kaiun laserpulssin osuessa puuhun. Kuusi tuotti kaiun suuremmalla todennäköisyydellä kuin lehtipuut. Erityisen selvä tämä ero oli pulsseilla, joissa oli energiahäviöitä. Laserkaikujen korkeusjakaumapiirteet voivat siten olla riippuvaisia puulajista. Sensorien välillä havaittiin selviä eroja intensiteettijakaumissa, mikä vaikeuttaa eri sensoreilla hankittujen aineistojen yhdistämistä. Myös kaiun todennäköisyydet erosivat jonkin verran sensorien välillä, mikä aiheutti pieniä eroavaisuuksia kaikujen korkeusjakaumiin. Aluepohjaisista laserpiirteistä löydettiin alikasvoksen runkolukua ja keskipituutta hyvin selittäviä piirteitä, kun rajoitettiin tarkastelu yli 1 m pituisiin puihin. Piirteiden selitysvoima oli parempi runkoluvulle kuin keskipituudelle. Selitysvoima ei merkittävästi alentunut pulssi-tiheyden pienentyessä, mikä on hyvä asia käytännön sovelluksia ajatellen. Lehtipuun osuutta ei pystytty selittämään. Tulosten perusteella kaikulaserkeilausta voi olla mahdollista hyödyntää esimerkiksi ennakkoraivaustarpeen arvioinnissa. Sen sijaan alikasvoksen tarkempi luokittelu (esim. puulajitulkinta) voi olla vaikeaa. Kaikkein pienimpiä alikasvospuita ei pystytä havaitsemaan. Lisää tutkimuksia tarvitaan tulosten yleistämiseksi erilaisiin metsiköihin.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords laserkeilaus, LiDAR, intensiteetti, alikasvos, energiahäviöt			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited Helsingin yliopisto, Viikin tiedekirjasto			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos — Institution — Department Department of Forest Sciences	
Tekijä — Författare — Author Hovi, Aarne Johannes			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Mapping understory trees using airborne discrete return LiDAR			
Oppiaine — Läroämne — Subject Forest ecology			
Työn laji — Arbetets art — Level M.Sc. thesis		Aika — Datum — Month and year June 2011	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 74 p. + appendices 9 p.
Tiivistelmä — Referat — Abstract <p>Understory trees often emerging beneath dominant tree layer in even-aged stands have significance for timber harvesting operations, forest regeneration, landscape and visibility analysis, biodiversity and carbon balance. Airborne laser scanning (ALS) has proven to be an efficient remote sensing method in inventory of mature forest stands. Recent introduction of ALS to operational forest inventory systems could potentially enable cost-efficient acquisition of information on understory tree layer. In this study, accurate field reference and discrete return LiDAR data (1–2 km flying altitude, 0.9–9.7 pulses m⁻²) were used. The LiDAR data were obtained with Optech ALTM3100 and Leica ALS50-II sensors. The field reference plots represented typical commercially managed, even-aged pine stands in different developmental stages. Aims of the study were 1) to study the LiDAR signal from understory trees at pulse level and the factors affecting the signal, and 2) to explore what is the explanatory power of area-based LiDAR features in predicting the properties of understory tree layer. Special attention was paid in studying the effect of transmission losses to upper canopy layers on the obtained signal and possibilities to make compensations for transmission losses to the LiDAR return intensity. Differences in intensity between understory tree species were small and varied between data sets. Thus, intensity is of little use in tree species classification. Transmission losses increased noise in intensity observations from understory tree layer. Compensations for transmission losses were made to the 2nd and 3rd return data. The compensations decreased intensity variation within targets and improved classification accuracy between targets. In classification between ground and most abundant understory tree species using 2nd return data, overall classification accuracies were 49.2–54.9 % and 57.3–62.0 %, and kappa values 0.03–0.13 and 0.10–0.22, before and after compensations, respectively. The classification accuracy improved also in 3rd return data. The most important variable explaining the transmission losses was the intensity from previous echoes and pulse intersection geometry with upper canopy layer had a minor effect. The probability of getting an echo from an understory tree was studied, and differences between tree species were observed. Spruce produced an echo with a greater probability than broadleaved trees. If the pulse was subject to transmission losses, the differences were increased. The results imply that area-based LiDAR height distribution metrics could depend on tree species. There were differences in intensity data between sensors, which are a problem if multiple LiDAR data sets are used in inventory systems. Also the echo probabilities differed between sensors, which caused minor changes in LiDAR height distribution metrics. Area-based predictors for stem number and mean height of understory trees were detected if trees with height < 1 m were not included. In general, predictions for stem number were more accurate than for mean height. Explanatory power of the studied features did not markedly decrease with decreasing pulse density, which is important for practical applications. Proportion of broadleaved trees could not be predicted. As a conclusion, discrete return LiDAR data could be utilized e.g. in detecting the need for initial clearings before harvesting operations. However, accurate characterization of understory trees (e.g. detection of tree species) or detection of the smallest seedlings seems to be out of reach. Additional research is needed to generalize the results to different forests.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords airborne laser scanning, LiDAR, intensity, understory, transmission loss			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited University of Helsinki, Viikki Campus Library			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			

Kiitokset

Haluan kiittää kaikkia tämän työn valmistumiseen vaikuttaneita. Työ toteutettiin Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksella osana MMT Ilkka Korpelan johtamia tutkimushankkeita. Korpela toimi myös työn ohjaajana, ja tutkimusidea oli hänen. Rahoitusta työhön on saatu Helsingin Yliopiston Rahastoilta sekä Suomen Luonnonvarojen Tutkimussäätiöltä. Lisäksi prof. Timo Tokola Joensuun yliopistosta auttoi maastotöiden rahoituksen järjestämisessä. Dr. sc. Felix Morsdorf Zürichin yliopistosta antoi neuvoja laskentaan ja tulosten analysointiin liittyen.

Maastomittauksista valtaosa tehtiin kesällä 2009. Kiitos metsätalousinsinööri Pauliina Kulhalle kärsivällisyydestä maastotöissä. Hyytiälän metsäaseman henkilökunta järjesti hyvät puitteet maastotöiden toteuttamiselle. Kesällä 2008 tehtyihin maastomittauksiin osallistuivat metsäylioppilaiden ensimmäisen vuosikurssin opiskelijat sekä tutkijat Jari Vauhkonen ja Lauri Korhonen Joensuun yliopistosta.

Lopuksi kiitos perheelle ja ystäville kannustuksesta sekä avusta työn oikoluvussa.

Helsingissä 27.6.2011

Aarne Hovi

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Laserkeilaus metsäinventoinnissa - yleiskuvaus	2
1.3	Lasersignaali ja siihen vaikuttavat tekijät.....	4
1.3.1	Laserpulssin ominaisuudet	4
1.3.2	Laserkaiun intensiteetti ja siihen vaikuttavat tekijät	5
1.3.3	Laserpulssin vuorovaikutus puiden latvusten kanssa.....	6
1.3.4	Muut lasersignaaliin vaikuttavat tekijät	7
1.4	Tutkimustulokset alikasvoksen mittauksesta kaikulaserilla	8
1.5	Alikasvoksen lasertulkinnassa huomioon otettavia tekijöitä.....	10
1.6	Tutkimuksen tavoitteet	11
2	Aineisto ja menetelmät	13
2.1	Maastoaineisto	13
2.1.1	Tutkimusalue ja koealat	13
2.1.2	Puiden paikannus.....	14
2.1.3	Puustosta tehdyt mittaukset.....	16
2.1.4	Puuston kuvaus.....	18
2.2	Laserkeilausaineistot	21
2.2.1	Yleiskuvaus	21
2.2.2	Laserintensiteetin etäisyys ja AGC -korjaus	23
2.2.3	Maanpinnan korkeusmalli	24
2.3	Lasersignaali yksittäisen pulssin tasolla.....	25
2.3.1	Puuston ja laserpulssien geometrinen mallinnus.....	25
2.3.2	Laskentarutiini lasersignaalin yhdistämiseksi kohteeseen	26
2.3.3	Geometrisen mallinnuksen tarkkuus	28
2.3.4	Laserkaiun intensiteetin vertailu kohteiden välillä.....	32

2.3.5	Energiahäviöt ylempiin latvuserroksiin	33
2.3.6	Intensiteettien korjaus pulssin energiahäviöillä	35
2.3.7	Kaiun muodostumisen todennäköisyys	40
2.4	Aluepohjaiset laserpiirteet	40
3	Tulokset.....	43
3.1	Alikasvospuista saadun näytteen edustavuus	43
3.2	Laserkaiun intensiteetti alikasvoksessa	44
3.2.1	Intensiteetti puulajin tulkinnassa.....	44
3.2.2	Etäisyys/AGC -korjauksen vaikutus	46
3.2.3	Energiahäviöiden korjauksen vaikutus intensiteettiin.....	47
3.2.4	Muut intensiteettiin vaikuttavat tekijät.....	50
3.3	Kaiun muodostumisen todennäköisyys	52
3.4	Aluepohjaiset laserpiirteet	56
3.4.1	Alikasvoksen täydellisen poiston vaikutus laserkaikujen korkeusjakaumaan ...	56
3.4.2	Runkoluvun ennustaminen.....	57
3.4.3	Keskipituuden ennustaminen	58
3.4.4	Lehtipuiden osuuden ennustaminen	58
4	Tulosten tarkastelu	59
4.1	Laserkaiun intensiteetti alikasvoksessa	59
4.2	Kaiun muodostumisen todennäköisyys	62
4.3	Sensoreiden väliset erot	63
4.4	Aluepohjaiset laserpiirteet	65
4.5	Menetelmäkehitys tulevaisuudessa.....	66
5	Johtopäätökset.....	68
	Kirjallisuus	70

1 Johdanto

1.1 Tausta

Ilma-aluksista suoritettava laserkeilaus (engl. ALS, *airborne laser scanning*) kehitettiin alun perin maan pinnanmuotojen kartoitukseen 1990-luvun alkupuolella (Petrie ja Toth 2009). Tarkkojen 3D-mittausten tekemisen mahdollisti GPS-tekniikoiden nopea kehittyminen. Pian huomattiin laserkeilauksen hyödyntämismahdollisuudet metsänmittauksessa, ja ensimmäiset tutkimuskokeilut tällä sovellusalueella tehtiin muutamaa vuotta myöhemmin (Naasset 1997a, Naasset 1997b, Magnussen ja Boudewyn 1998). Laserkeilaustekniikoiden ja aineistojen tulkintamenetelmien kehitys on ollut nopeaa, ja viimeisten 5–8 vuoden aikana laserkeilausmenetelmiä on alettu ottaa metsien inventoinnissa operatiiviseen käyttöön (Naasset 2002, Naasset 2004a).

Metsänhoito Suomessa on perustunut pitkään tasaikäismetsätalouteen, minkä takia talousmetsien rakenne on usein homogeeninen. Kasvatettava puusto muodostuu vallitsevasta latvuskerroksesta, jonka alle voi suotuisten olosuhteiden vallitessa kehittyä toinen puujakso eli alikasvos. Alikasvoksen muodostavat tavallisesti pääasiassa varjoa sietävät puulajit kuusi (*Picea abies* (L.) Karst.), hieskoivu (*Betula pubescens* Ehrh.) ja pihlaja (*Sorbus aucuparia* L.). Alikasvoksen tiheys ja pituus ovat riippuvaisia vallitsevan latvuskerroksen läpi tulevan valon määrästä (Bartemucci ym. 2006). Alikasvoksia on siten erityisesti metsiköissä, joiden vallitsevan latvuskerroksen puuston muodostavat lyhytlatvuksiset mänty (*Pinus sylvestris* L.) ja koivu (*Betula* sp.). Valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI) kerätään tietoa metsien lukumäärästä, joissa voidaan erottaa kaksi latvuskerrosta (jaksoa). Etelä-Suomessa kaksijaksoisten metsien osuus metsämaan pinta-alasta on n. 10 % (Korhonen ym. 2000).

Tiheä alikasvos muodostaa näköesteen koneellisissa kasvatus- ja päätehakkuissa ja on siksi raivattava hakkuun hyvän lopputuloksen takaamiseksi. Raivaus toteutetaan tavallisesti miestyönä, ja se lisää metsänhoidon kustannuksia. Vuonna 2009 Suomessa tehtiin ennakkoraivausta kasvatushakkuiden yhteydessä 49000 ha alalla (Metsätalastollinen vuosikirja 2010), mikä vastaa 14 % kasvatushakkuiden kokonaispinta-alasta (347000 ha). Vastaavasti uudistusalojen raivausta tehtiin yhteensä 57000 ha eli 52 % uudistushakkuiden kokonaispinta-alasta (110000

ha). Ennakkoraivauksen aiheuttamat kustannukset kasvatushakkuissa olivat 12,6 milj. € ja uudistusalojen raivauksen aiheuttamat kustannukset 7,8 milj. €

Alikasvos ei ole pelkästään haittatekijä metsänhoidon kannalta, vaan sitä voidaan hyödyntää uuden puusukupolven aikaansaamisessa avohakkuun jälkeen. Viime vuosina kysyntä vaihtoehtoisille metsän kasvatusmenetelmille on lisääntynyt. Alikasvokset ovat tärkeä resurssi esimerkiksi jatkuvaan kasvatukseen siirryttäessä (Pukkala ym. 2011). Turvemailla alikasvoksella saattaa olla merkitystä puunkorjuun kannalta, sillä tiheä juuristoverkko voi lisätä turpeen kantavuutta (Heikkilä 2007) ja parantaa siten korjuuolosuhteita sekä pidentää koneelliseen korjuuseen sopivaa kautta. Lisäksi alikasvoksella voi olla positiivinen vaikutus ravinteiden saataavuuteen (Vogel ja Gower 1998) ja sitä kautta metsien kasvuun. Metsätaloudellisen merkityksen lisäksi alikasvos on tärkeä metsien monimuotoisuuden vaikuttava rakennepiirre. Alikasvos mm. lisää puulajiston monimuotoisuutta boreaalisisissa metsissä (Kuuluvainen ym. 1998). Tietoa alikasvoksen määrästä ja laadusta sekä spatiaalisesta jakaumasta voidaan hyödyntää metsien paloherkkyuden mallintamisessa (Riaño ym. 2003), näkemä- ja maisema-analyyseissa sekä metsien hiilivarojen arvioinnissa.

Tarkkaa tietoa alikasvoksesta ei ole kerätty perinteisessä metsäsuunnittelun kuvioittaisessa arvioinnissa. Yhtenä syynä on, että alikasvostiedon kerääminen maastossa olisi aikaa vievää ja työlästä eikä saatu taloudellinen hyöty kustannuksiin nähden kovin merkittävä. Suomessa metsäkeskukset ovat siirtyneet vuodesta 2010 alkaen metsävaratiedon keruussa järjestelmään, jossa hyödynnetään harvapulssista laserkeilausaineistoa ja maastossa mitattuja referenssi-koealoja (Metsäkeskus 2011). Tämä tarkoittaa maastotyön osuuden pienentymistä inventoinnin kokonaiskustannuksista. Mikäli pystytään kehittämään menetelmä alikasvoksen mittaamiseksi laserkeilauksella, tietoa alikasvoksesta voitaisiin tuottaa muun puuston inventoinnin yhteydessä sivutuotteena ilman merkittäviä lisäkustannuksia.

1.2 Laserkeilaus metsäninventoinnissa - yleiskuvaus

Kaukokartoitukseen pohjautuva metsäninventointi voi perustua joko mittaukseen, jossa kaukokartoitusaineistosta saadaan mitattua suoraan puuston ominaisuuksia kuvaavia tunnuksia, tai mallinnukseen, jolloin puustotunnuksia ennustetaan mitattavissa olevan tiedon perusteella erilaisilla malleilla. Ilmakuvia käytettäessä ongelmana oli pitkään ilmakuvulta mitattavissa

olevien piirteiden ja puustotunnusten välinen heikko korrelaatio, minkä takia ilmakuvia on metsäsuunnittelussa käytetty vain kuvioden visuaaliseen rajaukseen. Laserkeilaus muutti tilanteen tuottaen tarkkaa geometrista informaatiota mitattavasta puustosta. Laserkeilausaineistosta voidaan mitata esimerkiksi puuston pituus suoraan, minkä lisäksi laserpisteiden korkeusjakaumasta lasketut piirteet korreloivat hyvin puustotunnusten kanssa. Samanaikaisesti laserkeilausmenetelmien kanssa kehitettiin myös ilmakuvilta tehtäviin 3D-mittauksiin perustuvia menetelmiä (Korpela 2004). Laserin etuna ilmakuviin nähden on kuitenkin aineistojen suhteellisen yksinkertainen prosessointi ja pienempi laskentakapasiteetin tarve.

Laserkeilausaineistoja hyödyntävät metsäinventointimenetelmät voidaan karkeasti ottaen jakaa aluepohjaisiin menetelmiin ja yksinpuin tulkintaan. Aluepohjaisissa menetelmissä (esim. Naasset 1997a, Naasset 2002, Naasset ja Okland 2002, Naasset 2004a, Maltamo ym. 2006a, Maltamo ym. 2006b) laseraineistosta lasketaan piirteitä tietylle kuvaikkunalle (esim. 16×16 m). Puustotunnusten ennustaminen tapahtuu joko laatimalla malleja puustotunnusten ja laserpiirteiden välille tai etsimällä maastoaineistosta laserpiirteiden perusteella eniten ennustettavaa aluetta muistuttavia kohteita (lähimmän naapurin menetelmät). Perusteena menetelmille on, että laserpisteiden korkeusjakauma korreloi latvusmassan korkeusjakauman kanssa (Goodwin ym. 2006, Morsdorf ym. 2010). Kumpikin menetelmä edellyttää maastoreferenssiaineistoa, joka kattaa ennustettavan alueen puustotunnusten sisältämän vaihtelun. Aluepohjaisessa menetelmässä laserkeilausaineistolta vaadittava pulssitiheys on alhainen (0,5–2,0 pulssia m⁻²). Aluepohjaisilla menetelmillä päästään puuston keskitunnusten estimoinnissa yhtä hyvään tai parempaan tarkkuuteen kuin perinteisessä metsäsuunnittelun kuvioittaisessa arvioinnissa (Naasset 2004b, Maltamo ym. 2006a, Maltamo ym. 2006b).

Tiheäpulsisesta laseraineistosta on mahdollista löytää yksittäisiä puita (esim. Hyypä ja Inkinen 1999, Persson ym. 2002, Brandtberg ym. 2003, Morsdorf ym. 2003, Solberg ym. 2006). Puille mitataan laseraineistosta pituus ja mahdollisesti latvusleveys, ja muut puun tunnuksat ennustetaan näiden perusteella. Menetelmän etuna on, että siinä mitataan suoraan puun ominaisuuksia, jolloin ei tarvita mallien kalibrointia tai maastotöitä (Hyypä ja Inkinen 1999). Lisäksi saadaan tarkka tieto metsikön runkolukusarjasta. Myös metsäsuunnittelun laskenta tapahtuu yksittäisen puun tasolla. Ongelmana yksinpuin tulkinnessa on lähes kaikissa aiheita koskevissa tutkimuksissa ollut puiden huono löytyminen nuorissa ja tiheissä metsissä, alikasvoksessa tai puiden sijaitessa rypäinä. Tästä aiheutuu systemaattista aliarviota metsikkötason puustotunnuksia laskettaessa. Ratkaisuksi ongelmaan on esitetty aluepohjaista ja yksinpuin-

tulkintaa yhdistäviä hybridimenetelmiä (Lindberg ym. 2010). Virheet puulajin tunnistuksessa aiheuttavat harhaa metsikkötasolle ennustettuihin puustotunnuksiin, koska puun läpimittaa ja tilavuutta ennustavat mallit ovat puulajikohtaisia (Korpela ja Tokola 2006).

Laserkeilauksen metsäinventointisovellusten pioneerina on toiminut Norja, missä ensimmäinen käytännön laserkeilausinventointi tehtiin jo vuonna 2002 (Naasset 2004a). Tämän lisäksi laserkeilausta on operatiivisessa käytössä kokeiltu mm. Itävallassa, Kanadassa, Saksassa ja USA:ssa (Naasset 2007). Suomessa metsäkeskukset aloittivat vuonna 2010 systemaattiset koko maan kattavat laserkeilaukset inventointitiedon keräämiseksi metsäsuunnittelua varten.

1.3 Lasersignaali ja siihen vaikuttavat tekijät

1.3.1 Laserpulssin ominaisuudet

Ilma-aluksissa käytettävät laserkeilaimet (engl. *airborne laser scanning*, ALS) ovat pulssilasereita (Wehr 2009), jotka lähettävät kartoitettavaan kohteeseen lyhytkestoisen laserpulssin ja havaitsevat kohteesta takaisin heijastuneen signaalin eli kaiun. Kohteen etäisyyden selvittämiseksi mitataan aika, joka kuluu pulssin edestakaiseen matkaan kohteen ja sensorin välillä. Lisäksi laite tallentaa pulssin lähetys suunnan sekä sensorin tarkan sijainnin (GPS-mittaus). Näiden sekä kohteen etäisyyden perusteella lasketaan pulssin heijastaneen kohteen sijainti (XYZ-koordinaatit).

Laserpulssin ominaisuuksia ovat pulssin pituus eli ajallinen kesto (engl. *pulse width*), joka tyypillisesti on välillä 4–10 ns sekä keilan leveys (engl. *beam divergence*). Keilan leveys kertoo, kuinka suurelle alalle pulssin energia leviää pulssin kulkemaa matkaa kohti. Keilan leveydestä ja kartoitettavan kohteen etäisyydestä riippuu, miten suuri on pulssin valaisema pinta-ala kohteessa eli laserin jalanjälki (engl. *footprint*). Jalanjäljen koon perusteella laserkeilaimet voidaan jakaa pienen (0,2–2 m) ja suuren jalanjäljen (>2 m) lasereihin (engl. *small footprint/large footprint LiDAR*) (Hyypä ym. 2009). Pulssin energia ei ole vakio koko pulssin pituudella. Tätä signaalin voimakkuutta ajan funktiona kutsutaan pulssin aaltomuodoksi (Wagner ym. 2006). Laserkeilaimesta lähtevän pulssin aaltomuoto on lähes symmetrinen, ja aallon maksimiamplitudi on pulssin keskikohdalla. Kartoitettavan kohteen geometriasta ja heijastusominaisuuksista riippuu, minkälainen takaisin heijastuneen kaiun aaltomuoto on.

Kaiun tallennustavan perusteella laserkeilaimet voidaan jakaa kaikulasereihin (engl. *discrete return LiDAR*), jotka rekisteröivät kohteesta palaavasta pulssista kaiun (1–4 kpl/pulssi) signaalin voimakkuuden ylittäessä ennalta määritetyn raja-arvon, sekä aaltomuotolasereihin (engl. *full waveform LiDAR*), jotka ottavat palaavasta pulssista näytteitä lyhyin (esim. 1 ns) välein.

1.3.2 Laserkaiun intensiteetti ja siihen vaikuttavat tekijät

Kaikulaser tallentaa tavallisesti etäisyysmittauksen lisäksi kaiun intensiteetin. Intensiteetin tulkinta ei ole täysin yksiselitteinen vaan riippuu mm. vastaanottimen kaiun tulkintaan käytämästä algoritmista (Kaasalainen ym. 2009). Intensiteetti on kuitenkin verrannollinen vastaanotetun kaiun maksimiampplitudiin, joten siitä voidaan tehdä päätelmiä kohteen heijastusominaisuuksista. Ilmakehä aiheuttaa pulssin vaimenemista, mikä heikentää havaittua intensiteettiä. Wagner ym. (2006) esittävät yleiskuvauksen intensiteettiin vaikuttavista tekijöistä. Seuraavassa tarkastellaan sensorin tallentamaan intensiteettiin vaikuttavia tekijöitä oppikirjatietoon sekä Wagnerin ym. (2006) artikkeliin pohjautuen. Ilmakehän vaikutukset ovat tavallisesti vakiot eivätkä eroa lähtevän ja palaavan kaiun välillä. Tämän takia ilmakehän vaikutukset on jätetty tarkastelussa huomioimatta.

Laserkeilaimen tallentamaan intensiteettiin vaikuttavat 1) kohteeseen tulevan pulssin teho, 2) kohteen heijastusominaisuudet, jotka riippuvat sekä kohteen geometriasta että kohteen heijastavuudesta eli reflektanssista, sekä 3) vastaanottimen asetukset. Kohteeseen tulevan pulssin teho pinta-alayksikköä kohti on riippuvainen laitteen lähettämän pulssin tehosta, kohteen etäisyydestä sensoriin (engl. *range*) sekä keilan leveydestä. Kohteesta takaisin heijastuvan kaiun teho puolestaan riippuu kohteen reflektanssista sekä valaisualasta eli kuinka suuren osuuden laserin jalanjäljestä kohde täyttää. Erityisesti metsäsovelluksissa, joissa kohteet ovat tavallisesti laserin jalanjälkeä pienempiä, havaittuun signaaliin vaikuttaa se, että laserpulssin teho ei ole vakio laserin jalanjäljen alueella vaan heikkenee jalanjäljen reunoja kohti (Morsdorf ym. 2010). Jalanjäljen reunalla sijaitseva kohde tuottaa siten heikomman signaalin kuin aivan jalanjäljen keskellä sijaitseva. Lisäksi valaisukulmalla on merkitystä. Takaisinheijastus on voimakkaimmillaan kun pulssi osuu valaistavalle pinnalle kohtisuorasti. Takaisinheijastuksen jälkeen sensorille asti tulevan pulssin teho pinta-alayksikköä kohti riippuu jälleen kohteen

etäisyydestä sensoriin ja sensorin tallentaman signaalin voimakkuus vastaanottimen asetuksista.

Passiivisiin sensoreihin (esim. ilmakuvat) verrattuna laserintensiteetin etuja ovat, että se ei ole herkkä katselukulman muutoksille tai kohteiden varjostukselle (Wagner ym. 2006). Lisäksi laserin hyvä geometrinen tarkkuus takaa sen, että intensiteetti mittaa vain kohteen (esim. puuston) heijastusominaisuuksia, eivätkä muut tekijät (esim. maan heijastavuus) vaikuta havaittuun signaaliin. Toisaalta intensiteetin tulkintaa vaikeuttaa se, että intensiteettiin vaikuttavia kohteen ominaisuuksia (kohteen pinta-ala, valaistuskulma, reflektanssi) on vaikea erottaa toisistaan. Lisäksi intensiteetti mittaa kohteen heijastusominaisuuksia vain laserinsäteilyn aallonpituudella. Valaistuskulman vaikutusta vähentää se, että skannauskulma eli laserpulssin kulma pystytasoon nähden on tavallisesti suhteellisen pieni ($<20^\circ$), jolloin kohdetta katsellaan koko ajan ylhäältä päin.

Rajoituksista huolimatta laserintensiteettiä on käytetty puulajin tunnistamisessa sekä yksipuolittain tulkinassa (Holmgren ja Persson 2004, Korpela ym. 2010b) että aluepohjaisissa menetelmissä (Donoghue ym. 2007). Lisäksi intensiteettiä on käytetty mm. metsän latvuspeittävyyden arvioinnissa (Hopkinson ja Chasmer 2009). Suuren jalanjäljen lasereiden aaltomuodon energiajakaumaa, joka vastaa intensiteettiä, on hyödynnetty metsien rakenteen kuvauksessa (Lefsky ym. 1999).

1.3.3 Laserpulssin vuorovaikutus puiden latvusten kanssa

Koska metsä ja sen puusto eivät ole selkeitä pintoja vaan koostuvat joukosta erikokoisia ja -muotoisia heijastavia kohteita, laserpulssin vuorovaikutus latvuston kanssa on monimutkainen ilmiö (Hyypä ym. 2009). Laserpulssin osuessa esimerkiksi puun oksaan osa siitä heijastuu takaisin ja havaitaan mahdollisesti kaikuna, ja osa jatkaa kulkua vaimentuneena alempiin latvuskerroksiin. Jos heijastava kohde täyttää suuren osan laserin jalanjäljestä, havaitaan vain yksi kaiku, koska matkaansa jatkaneen pulssin energia ei enää ole tarpeeksi suuri, jotta se voisi tuottaa havaittavia, signaali-kohinasuhteen ylittäviä kaikuja. Usein kuitenkin kaikuja syntyy varsinkin korkeista puustoista useampia yhtä pulssi kohti.

Kaiut voidaan jaotella neljään luokkaan: *yksittäinen, ensimmäinen, välikaiku ja viimeinen*. Nämä eroavat toisistaan kaiun tuottaneen kohteen ominaisuuksien ja kohteeseen osuneen pulssin energian suhteen. Yksittäisten ja ensimmäisten kaikujen tapauksessa pulssi ei ole menettänyt energiaa ennen sen osumista kohteeseen. Sen sijaan väli- ja viimeisten kaikujen tapauksessa energiahäviöitä on tapahtunut ylemmissä latvuserroksissa, ja kaiun intensiteetti ei voi olla yhtä suuri kuin yksittäisillä ja ensimmäisillä kaiuilla. Yksittäiset kaiut ovat tulleet pääasiassa kohteista, jotka täyttävät suuren osan laserin jalanjäljestä, kun taas ensimmäiset ja välikaiut ovat tulleet hajanaisemmista kohteista, joiden läpi osa pulssin energiasta on päässyt. Edellä mainituista kaikujen ominaisuuksista seuraa se, että valitsemalla tiettyntyyppisiä kaikuja tarkastelun kohteeksi voidaan osittain vaikuttaa siihen, minkälaisista kohteista näytteitä saadaan. Toisaalta erityyppisten kaikujen tuottamaa informaatiota on vaikea yhdistää, koska kohteet ovat valikoituneet eri tavalla eri kaikutyypeillä.

Alikasvoksesta saatavaa lasersignaalia ajatellen tärkeä huomioon otettava tekijä ovat laserpulssein energiahäviöt ennen pulssin osumista kohteeseen. Alikasvoksesta tulleissa kaiuissa on välikaikuja ja viimeisiä kaikuja suurempi osa kuin ylemmistä latvuserroksista tulleissa kaiuissa. Nämä kaiut sisältävät enemmän kohinaa kuin yksittäiset tai ensimmäiset kaiut, koska kohteeseen osuvan pulssin teho vaihtelee energiahäviöiden mukaan. Yleisesti laserkeilaussovelluksissa yksittäisten ja ensimmäisten kaikujen tapauksessa ajatellaan energiahäviöiden olevan pieniä. Alikasvokseen osuneissa pulsseissa energiahäviöt näidenkin kaikuluokkien osalta ovat todennäköisempiä kuin ylempiin latvuserroksiin osuneissa pulsseissa. On mahdollista, että matkalla alikasvoskerrokseen pulssi on osunut ylempien latvuserrosten puiden oksiin menettäen osan energiastaan, mutta tuottamatta kuitenkaan havaittavaa kaikua.

1.3.4 Muut lasersignaaliin vaikuttavat tekijät

Edellä esitettyjen tekijöiden valossa on selvää, että monet laserkeilaimen asetukset ja keilauslennon toteutukseen liittyvät tekijät voivat vaikuttaa sekä metsästä saatavaan yksittäisen laserpulssein sisältämään informaatioon että aluepohjaisesti laskettuihin laserpiirteisiin. Naeset (2004c) havaitsi, että lentokorkeuden kasvattaminen (suurempi jalanjälki) muutti laserpisteiden korkeusjakaumaa viimeisillä kaiuilla. Lentokorkeuden kasvaessa viimeiset kaiut tulivat keskimäärin hieman ylempää kuin matalalla lentokorkeudella. Tämä voi aiheutua siitä, että jalanjäljen kasvaessa jalanjäljen kokoisia latvusaukkoja on vähemmän. Energiahäviöt kasva-

vat ja pienempi osa pulsseista tunkeutuu maan pinnalle saakka. Goodwin ym. (2006) havaitsivat, että lentokorkeuden kasvattaminen lisäsi vain yhden kaiun tuottaneiden pulssien osuutta. Ilmiötä selitettiin sillä, että jalanjäljen kasvaessa tarvitaan yhä suurempi tai paremmin heijastava kohde, jotta saataisiin keilaimen käyttämän raja-arvon ylittävä kaiku. Tämä tarkoittaa sitä, että myös samalta lentokorkeudelta tehtyjen keilausten välillä voi olla eroja, jos ne on tehty eri keilaimilla, joilla pulssin jalanjäljet eroavat toisistaan.

1.4 Tutkimustulokset alikasvoksen mittauksesta kaikulaserialla

Alikasvosten ja pienpuustojen mittausta kaikulaserialla koskevia tutkimustuloksia on olemassa niukasti. Tutkimukset taimikoissa antavat viitteitä tarkkuudesta, joka voidaan saavuttaa optimitilanteessa, kun laserpulssien energiahäviöitä ylempiin latvuserroksiin ei tapahdu. Korpela ym. (2008) tutkivat taimikoiden kasvillisuuden mittausta tiheäpulssisella laseraineistolla (6–9 pulssia m⁻²). Puiden (keskipituus 1,4–3,6 m) pituudet tulivat aliarvioituiksi 20–40 %. Laserintensiteetissä oli eroja eri kasvilajien välillä, mutta kolme pääpuulajia (mänty, kuusi, koivu) eivät eronneet toisistaan. Naesset ja Bjerknes (2001) tutkivat aluepohjaisten laserpiirteiden selitysvoimaa runkoluvun ja keskipituuden ennustamisessa nuorissa metsiköissä (puuston keskipituus 2–6 m). Ennusteet puuston pituudelle olivat tarkkoja ($R^2 = 0,830$), kun taas ennusteet runkoluvulle olivat hieman epätarkempia ($R^2 = 0,421$). Puuston tiheys tai puulaji ei vaikuttanut pituusennusteiden tarkkuuteen.

Alikasvospuiden havaitsemisessa on hyödynnetty laserkaikujen korkeusjakaumaa. Maltamo ym. (2005) käyttivät korkeusjakaumaa ja siitä johdettuja piirteitä alikasvoksen havaitsemiseen sekä alikasvoksen runkoluvun ennustamiseen borealisessa luonnontilaisen kaltaisessa metsässä (pääpuulaji kuusi). Jos laserpisteiden korkeusjakauma koealalla oli kaksihuippuinen, koeala luokiteltiin kaksijaksoiseksi. Luokittelu onnistui 24:llä tutkimuskoealoista (yhteensä 28). Syyksi luokittelun epäonnistumiselle neljällä koealalla arveltiin tiheää vallitsevan latvuserroksen puustoa, joka pienentää alikasvoksesta saatavien laserpulssien määrää. Tutkimuksessa laadittiin lisäksi regressiomallit alikasvoksen runkoluvulle sekä keskipituudelle. Runkolukua pystyttiin ennustamaan laserpisteiden korkeusjakaumapiirteiden avulla ($R^2 = 0,870$), mutta alikasvoksen keskipituudelle paras selittäjä oli alikasvoksen maksimipituus, joka on maastossa mitattu eikä siten sovellu ennusteiden tekemiseen maastomittausten puuttuessa. Maastoaineistossa mukana olivat vain rinnankorkeusläpimitaltaan yli 5 cm puut. Samantyypp-

pistä tekniikkaa käytettiin australialaisessa tutkimuksessa (Jaskierniak ym. 2011), jossa sovitettiin teoreettinen jakaumafunktio laserkaikujen korkeusjakaumaan ja käytettiin jakauman parametreja eri latvuserrosten erottamiseen. Jakaumasta johdettujen piirteiden avulla pystyttiin ennustamaan alikasvoksen pohjapinta-alaa regressiomalleilla ($R^2 = 0,50-0,91$). Tässäkään tutkimuksessa pienimpiä puita ei otettu mukaan. Minimiläpimitta maastomittauksissa oli 10 cm. Pulssitiheys oli 4 pulssia m^{-2} . Riaño ym. (2003) käyttivät klusterianalyysia alikasvoskerroksen erottamiseen ylemmästä latvuserroksesta. Tutkimuksessa simuloitiin aaltomuoto 10×10 m ruudulle käyttäen ruudulta saatujen laserkaikujen korkeusjakaumaa. Simuloidulle aaltomuodolle tehtiin korjaus, joka ottaa huomioon ylemmän latvuserroksen pidättävän vaikutuksen. Alikasvoskerroksen peittävyydelle tehdyt ennusteet kasvoivat korjauksen seurauksena. Tuloksia ei validoitu maastoreferenssiaineistolla.

Hill ja Broughton (2009) käyttivät alikasvoksen havaitsemiseen kahta laserkeilausaineistoa ($0,5-1$ pulssia m^{-2}), joista toinen oli hankittu lehdettömään aikaan keväällä ja toinen kesällä. Tutkimuskohteena oli lauhkean vyöhykkeen lehtimetsä Englannissa. Kesällä hankitusta aineistosta laadittiin vallitsevan puuston pintamalli, josta edelleen laskettiin vallitsevan puuston latvusrajaa kuvaava rasterimalli käyttäen maastossa mitattuja keskimääräisiä puulajikohtaisia latvusrajoja. Alikasvospuuston pintamalli laadittiin lehdettömään aikaan tehdystä laserkeilausaineistosta viimeisiä kaikuja käyttäen. Tietyllä paikalla katsottiin olevan alikasvosta, jos alikasvospuuston pintamalli oli vallitsevan puuston latvusrajan alapuolella mutta korkeammalla kuin 1 m. Tutkimuksessa päästiin alikasvoksen luokittelussa (alikasvos/ei alikasvosta) 77 % oikeinluokitusprosenttiin. Lähes yhtä hyvään tarkkuuteen (72 %) päästiin kuitenkin, vaikka vallitsevan latvuserroksen pintamalli laadittiin lehdettömään aikaan saadusta keilausaineistosta. Inventointiaineiston hankinnan kustannukset olivat kuitenkin selvästi pienemmät, koska tarvittiin vain yksi keilauslento.

Alikasvoksen puiden mittaamiseen pyrkivien tutkimusten lisäksi joitakin tutkimuksia on tehty muun kenttäkerroksen lajiston (mm. varvut, pensaat) tunnistamiseksi. Martinuzzi ym. (2009) käyttivät harvapulssista ($1,95$ m pulssiväli) laseraineistoa havaitsemaan alikasvoskerroksen pensaslajistoa lauhkean vyöhykkeen havumetsässä. Pensaiden havaitseminen onnistui 83 % oikeinluokitusprosentilla. Selittävinä muuttujina käytettiin 20×20 m koealoilta irrotettuja laserpisteiden korkeusjakaumapiirteitä ja maaston topografiaa kuvaavia tunnuksia, ja luokittelussa Random Forest -luokitusalgoritmia.

Ongelmana pelkän laserkaikujen korkeusjakauman käytössä on, että alikasvoskerroksen ja vallitsevan latvuserroksen välillä ei aina ole selkeää rajaa. Morsdorf ym. (2010) käyttivät sekä laserkaikujen korkeutta maanpinnasta että kaikujen intensiteettiä luokittelemaan metsän eri kerroksia Välimeren alueella metsässä, jonka ylimmän latvuserroksen muodosti aleppomänty (*Pinus halepensis*). Tämän alla kasvoi rautatammi (*Quercus ilex*), ja lisäksi voitiin erottaa erillinen pensaskerros. Jokaiselle latvuserrokselle tehtiin luokittelu (havaittiin/ei havaittu) 5×5 m ruuduittain. Luokitteluun käytettiin vain yhden kaiun tuottaneita laserpulseja, ja se tehtiin klusterianalyysillä. Vallitseva latvuserros (mänty) havaittiin tarkasti (oikeinluokitusprosentti 67–97 %). Männyn alla kasvavan tammen oikeinluokitusprosentti oli 56–91 %. Luonnontilaisella koelalla pensaskerroksen oikeinluokitusprosentti oli 48 %. Muilta koelaloilla pensaskerros oli suurimmaksi osaksi poistettu, mikä selittää näillä havaitun hyvän oikeinluokitusprosentin (86–100 %).

Korpela (2008) käytti vallitsevan latvuserroksen alta saatujen laserkaikujen intensiteettiä kenttäkerroksen jäkälän kartoittamisessa karussa mäntymetsässä. Tutkimuksessa käytettiin vain ensimmäisiä kaikuja, jolloin minimoitiin energiahäviöiden vaikutus intensiteettiin. Luokituksessa (jäkälä/muu kasvillisuus) päästiin vain kohtalaiseen tarkkuuteen (oikeinluokitusprosentti 65–75 %), vaikka laboratorio-olosuhteissa suomalaisilla jäkälillä on todettu olevan erittäin voimakas takaisinheijastus laserin aallonpituudella (1064 nm).

1.5 Alikasvoksen lasertulkinnassa huomioon otettavia tekijöitä

Voidaan kysyä, onko termi alikasvos jossakin määrin keinotekoinen, koska selkeää rajaa eri latvuserrosten välille ei voida useinkaan vetää, etenkin luonnontilaisissa, eri-ikäisissä metsissä. Tässä työssä puusto jaetaan ”alikasvokseen” ja ”ylempään/vallitsevaan latvuserrokseen”. Jako on tarkoituksenmukainen tyypillisen Suomalaisen tasaikäisen talousmetsän rakennetta ja korjuuta haittaavan alikasvoksen tunnistamista ajatellen. Tämän työn eri osissa käytetään kahta alikasvoksen määritelmää. Ensimmäisen määritelmän mukaan alikasvokseen kuuluvat puut, joiden pituus on alle puolet metsikön puuston valtapituudesta. Toisessa määritelmässä lasketaan keskimääräinen latvuksen alaraja (HC) puille, joiden pituus on yli 50 % valtapituudesta. Alikasvokseen katsotaan kuuluvaksi puut, joiden pituus on pienempi kuin HC.

Alikasvoksen mittaamiseen laserkeilauksella liittyy joitakin hankaloittavia tekijöitä verrattuna vallitsevan puuston mittaukseen. Näitä ovat 1) alikasvoksen ylimpien osien sekoittuminen valtapuuston kanssa, 2) valtapuuston peittävä vaikutus, jolloin näytteitä ei saada tasaisesti koko alikasvoksesta sekä 3) pulssien energiahäviöt ylempiin latvuserroksiin. On selvää, että alikasvospuiden latvat joissakin tapauksissa sekoittuvat ylempään latvuserroksen alimpien oksien kanssa, jolloin ongelmaksi muodostuu, miten näihin kahteen kerrokseen tulleet laserosumat voidaan erottaa toisistaan. Ideaalitapauksessa metsä on selkeästi kaksijaksoinen, ja latvuserrokset sekoittuvat vain vähän keskenään. Ylempään latvuserroksen puut ovat este, joka laserpulssin on ohitettava tunkeutuakseen alikasvoskerrokseen. Ylempään latvuserroksen puiden latvusten kohdalta ei saada näytteitä yhtä tiheästi kuin ylempään latvuserroksen aukkopaikoista. Monissa laserpisteiden korkeusjakaumaa alikasvoksen tunnistamiseen käytäneissä tutkimuksissa on raportoitu heikkenevästä tarkkuudesta ylempien latvuserrosten puuston tiheyden kasvaessa. Eräs tähän liittyvä ongelma on näytteen edustavuus. Mikäli alikasvospuusto on ominaisuuksiltaan poikkeavaa isojen puiden alla, laserilla saatu näyte alikasvoksesta ei ole edustava. Kolmas alikasvoksen mittausta hankaloittava tekijä ovat laserpulssin energiahäviöt ylempiin latvuserroksiin. Energiahäviöiden seurauksena alikasvoksesta saatu lasersignaali sisältää kohinaa, joka voi vaikeuttaa signaalin tulkintaa.

1.6 Tutkimuksen tavoitteet

Laserkeilauksen ottaminen operatiivisen metsäsuunnittelun käyttöön mahdollistaa alikasvos-tiedon tuottamisen muun inventointitiedon ohessa, jos pystytään kehittämään menetelmä alikasvoksen tulkitsemiseksi laseraineistosta. Laserkeilauksen hyödyntämistä metsäinventoinnissa koskevat tutkimukset ovat toistaiseksi painottuneet taloudellisesti arvokkaan valtapuuston mittaamiseen. Sen sijaan ratkaisuja alikasvoksen mittaukseen ja kartoitukseen on esitetty niukasti. Laserkaikujen korkeusjakaumapiirteitä pienen jalanjäljen lasereilla sekä laserpulssin energijakaumaa latvuserrosten välillä suuren jalanjäljen lasereilla on hyödynnetty jonkin verran metsän vertikaalisen rakenteen mittaamisessa. Näissä tutkimuksissa alikasvoksen määrittely vaihtelee, ja useinkaan mukaan ei ole luettu kaikkein pienimpiä puita. Suomalaisissa metsissä korjuuta haittaava alikasvos on kuitenkin usein juuri pienikokoista ($h = \sim 1\text{--}4$ m). Toisaalta on saatettu tutkia vain alikasvoksen pensaslajistoa, ja jätetty puun taimet tarkastelun ulkopuolelle (Martinuzzi ym. 2009). Näiden tekijöiden takia tutkimustulosten yleistäminen

suomalaisiin metsiin on hankalaa. Laserkaikujen intensiteettitietoa ei ole hyödynnetty juuri lainkaan.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tuottaa perustietoa alikasvoksen mittauksen ja kartoituksen mahdollisuuksista kaikulaserialla. Tutkimuksessa hyödynnetään tarkasti mitattuja maastokoealoja sekä laserkeilausaineistoja usealta vuodelta. Maastokoealat edustavat tyypillisiä suomalaisia tasaikäisiä talousmänniköitä, joissa alikasvoksen määrä vaihtelee. Tutkimuskysymykset ovat:

- 1) Minkälainen on alikasvoksesta saatu lasersignaali yksittäisen pulssin tasolla ja mitkä tekijät signaaliin vaikuttavat?
- 2) Mikä on käytännön sovelluksissa hyödynnettävien aluepohjaisten laserpiirteiden selitysvaiva alikasvospuuston ominaisuuksien ennustamisessa?

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen liittyen tutkitaan laserkaiun intensiteetin käyttömahdollisuuksia alikasvoksen puulajin tulokinnassa. Erityisesti halutaan selvittää, miten energiahäviöt ylempiin latvuserroksiin vaikuttavat alikasvoksesta saadun kaiun intensiteettiin, ja onko energiahäviöitä mahdollista käyttää hyväksi intensiteetin normalisoinnissa, jolloin alikasvoksesta saatujen laserkaikujen intensiteetit olisivat yhteismitallisia keskenään. Lisäksi tutkitaan tekijöitä, jotka vaikuttavat siihen, saadaanko alikasvospuusta kaiu puun saadessa laserosuman. Toisessa tutkimuskysymyksessä on tarkoitus selvittää yksinkertaisin korrelaatiotarkasteleluin, minkälaiset ovat mahdollisuudet alikasvoksen ennustamiseen aluepohjaisten laserpiirteiden avulla. Valmiiseen menetelmään ei tässä vaiheessa vielä pyritä. Laserkeilausaineistot käsittävät keilauksia kahdella eri sensorilla, mikä mahdollistaa sensorien välisten vertailujen tekemisen sekä aluepohjaisissa että pulssitason tarkasteluissa.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Maastoaineisto

2.1.1 Tutkimusalue ja koealat

Tutkimusalue sijaitsee Helsingin yliopiston Hyytiälän metsäaseman lähiympäristössä (61°50'N, 24°20'E). Maastoaineisto käsittää kaksi koealaa (koeala A ja koeala B, Kuva 1), joiden pinta-alat ovat 0,36 ha ja 0,30 ha. Koealat edustavat suomalaisia tasaikäisiä, metsätaloustehtävissä olevia männiköitä, joissa on vaihteleva määrä alikasvospuustoa.

Koeala A sijaitsee moreenimaalla (metsätyyppi VT–MT) 179–188 m merenpinnan yläpuolella. Maaston pinnanmuodot ovat vaihtelevat. Ylemmän latvuskerroksen puuston on 50-vuotiasta, lähes puhdasta männikköä. Yksittäisiä koivuja kasvaa sekapuuna. Alikasvosken muodostavat pääosin hieskoivu ja kuusi. Kasvupaikan rehevydessä on selvä tasoero koealan länsi- ja itäreunan välillä. Länsiosa on selkeästi itäosaa rehevämpää ja sisältää tiheimmän alikasvospuuston. Kenttäkerrosta vallitsee 20–50 cm korkea mustikanvarvukko (*Vaccinium myrtillus* L.), jonka tiheys ja korkeus vaihtelevat kasvupaikan rehevyyden mukaan. Pohjakerroksen tärkeimmät lajit ovat seinäsammal (*Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.) ja kerrossammal (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp.). Koeala B sijaitsee tasaisella hiekkakankaalla (VT, 140,7–142,0 m m.p.y.). Ylemmän latvuskerroksen puusto on 100-vuotiasta männikköä (kuusia 10 %). Alikasvos koostuu suureksi osaksi kuusesta, mutta seassa on jonkin verran lehtipuita, erityisesti koivua ja leppää. Koealalla on paikoittain hyvin runsaasti tiheitä, alle 1 m pituisten kuusten muodostamia kasvustoja. Kenttäkerroksessa kasvaa paikoin puolukkaa (*Vaccinium vitis-idaea* L.), ja pohjakerroksen muodostavat seinäsammal ja kynsisammalet (*Dicranum* spp.).



Kuva 1. Valokuvat maastokoealoista. Koealan A (vasen) kuva edustaa koealan karumpaa puolta. Koealan B (oikea) kuvassa etualalla harvan alikasvoksen alue ja taka-alalla tiheämpää alikasvosta.

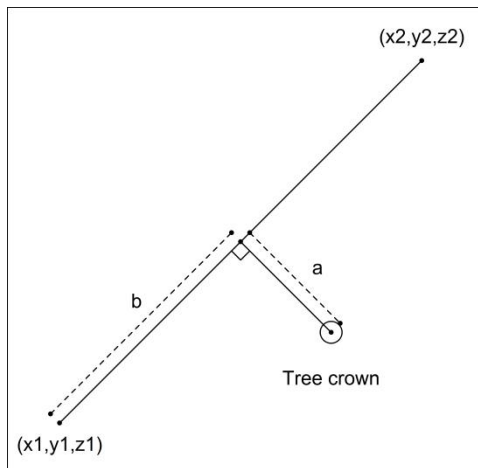
2.1.2 Puiden paikannus

Koealojen puuston mittauksessa oli tärkeää, että puut saatiin paikannettua laseraineiston koordinaattijärjestelmään (KKJ2) mahdollisimman tarkasti, jotta luotettavia päätelmiä laser-signaalin aiheuttaneesta kohteesta voitiin tehdä. Puiden paikannus tehtiin kahdessa vaiheessa. Ilmakuville näkyvät isot puut ("ilmakuvapuut") paikannettiin monoplotting-menetelmällä (Korpela ym. 2007, Korpela ym. 2010b) käyttäen korkean resoluution (0,1–0,2 m) ilmakuvia vuosilta 2006–2008. Siinä mittaaja osoittaa puun latvan ilmakuvulta, ja syntyneen kuvasäteen ympäriltä 0,7 m säteeltä etsitään korkein laserkaiku (suurin Z-koordinaatti). Puun XY-koordinaatit löytyvät laserkaiusta kohtisuorasti kuvasäteeseen vedetyn suoran ja kuvasäteen leikkauspisteestä. Menetelmän tarkkuus on 0,1–0,4 m ja riippuu puiden latvusten muodosta (Korpela ym. 2007). Ilmakuvapuiden paikannus tehtiin kesällä 2008 koealalla A ja kesällä 2009 koealalla B. Ilmakuvapuut paikannettiin koealan rajojen sisäpuolelta sekä ulkoa 5 m puskurivyöhykkeeltä.

Ilmakuvalle näkymättömien puiden paikannus on tehtävä maastotyönä, mikä on aikaa vievää ja työlästä. GPS-mittauksilla ei päästä ison puuston alla tässä tutkimuksessa vaadittuun tarkkuuteen. Toinen vaihtoehto on käyttää takymetria, jolla tehdään etäisyys- ja kulmamittauksia tunnettuihin kiintopisteisiin, ja saavutettu XY-paikannuksen tarkkuus on muutaman senttimetrin luokkaa. Takymetrin käyttö on kuitenkin hyvin hidasta, ja maaston näkemäesteet, kuten alikasvos, hankaloittavat työtä. Korpela ym. (2007) esittivät menetelmän, jossa käytetään ilmakuvilta paikannettuja isoja puita kiintopisteinä, ja mitataan suuntia sekä etäisyyksiä pai-

kannettavalta puulta kiintopistepuihin. Paikannettavan puun koordinaatit ratkaistaan maanmittauksessa käytetyllä tasoituslaskennalla pienimmän neliösumman menetelmällä (PNS), jossa minimoidaan suunta- ja etäisyyshavaintojen sekä kiintopisteiden paikannuksen jäännösvirheidⁿ neliöiden summaa.

Ilmakuvalle näkymättömien puiden (”omissiopuut”) paikannus tehtiin kesällä 2009. Koealojen kulmat merkittiin maastossa käyttäen laskettuja kompassisuuntia ilmakuvapuihin ja paikannettiin käyttäen tasoituslaskentaa. Kaikki omissiopuut, joiden pituus oli yli 0,3 m, paikannettiin. Paikannuksessa käytettiin uutta menetelmää, joka on muunnos Korpelan ym. (2007) esittämästä menetelmästä. Menetelmässä kartoitus eteni 8×30 m kaistoissa. Kaistan keskelle pitkittäin viritettiin vaijeri kahden puun väliin (”vaijerimenetelmä”). Vaijerin päiden XY-koordinaatit ratkaistiin tasoituslaskennalla tekemällä kahdeksan suunta- ja kahdeksan etäisyyshavaintoa ilmakuvapuihin, ja Z-koordinaatti saatiin ratkaistua laseraineistosta tehdyltä maanpinnan korkeusmallilta, kun tunnettiin vaijerin pään korkeus maanpinnan tasosta. Kaikki ilmakuvalle näkymättömät puut neljän metrin etäisyydellä vaijerin molemmin puolin paikannettiin mittaamalla puun kohtisuora etäisyys vaijerilta sekä tämän kohtisuoran ja vaijerin leikkauspisteen etäisyys vaijerin alkupisteestä (Kuva 2). Tähän käytettiin tarkoitusta varten rakennettua suorakulmatyökälua (Kuva 2). Vaijerimenetelmän etuna Korpelan ym. (2007) esittämään menetelmään verrattuna on, että suunta- ja etäisyyshavaintoja tarvittiin ainoastaan vaijerin alku- ja loppupisteiden paikannukseen. Kahden hengen mittausryhmä paikansi ja mittasi keskimäärin 260 puuta päivässä. Ennen mittauksen aloitusta tehtyjen simulointien perusteella todettiin, että menetelmällä päästään n. 0,15 m keskimääräiseen puiden paikannustarkkuuteen (X ja Y koordinaattien keskihajonta), kun tehdään kahdeksan suuntahavaintoa (keskihajonta 1°) ja kahdeksan etäisyyshavaintoa (keskihajonta 0,05 m) vaijerin päiden paikannuksessa.



Kuva 2. Puiden paikannus vaijerin ja suorakulman avulla (vasen). Vaijerin alku- (x_1, y_1, z_1) ja loppupisteet (x_2, y_2, z_2) paikannettiin, ja etäisyydet a ja b mitattiin käyttäen tarkoitusta varten rakennettua suorakulmaa (oi-kea).

Vaijerimenetelmän tarkkuutta arvioitiin maastomittausten yhteydessä kahdella tavalla. Menetelmällä paikannettiin ilmakuvapuita, ja menetelmän tuottamia koordinaatteja verrattiin ilmakuvalta mitattuihin koordinaatteihin. Lisäksi maastossa mitattiin vaijerimenetelmällä paikannettujen pienten puiden välisiä etäisyyksiä mittanauhalla, ja verrattiin näitä vaijerimenetelmällä paikannettujen koordinaattien perusteella saatuihin laskennallisiin etäisyyksiin. Maastotöiden jälkeen tehtiin vaijerin alkupisteille paikannustarkkuuden parantaminen mittaamalla kiintopistepuita uudelleen, lisäämällä tasoituslaskentaan etäisyshavaintoja ilmakuvapuihin, joiden etäisyys vaijerin alkupisteestä tunnettiin suorakulmalla tehtyjen mittausten perusteella, sekä poistamalla virheellisiä havaintoja. Tarkistusmittausten perusteella vaijerimenetelmän tarkkuus (X ja Y koordinaattien keskihajonta) kaistan sisällä oli $<0,05$ m, ja kaistojen välillä n. $0,10$ m. Yksityiskohtainen kuvaus vaijerimenetelmän tarkkuuden arvioinnista ja tarkkuuden parantamisesta maastotöiden jälkeen on esitetty liitteessä 1.

2.1.3 Puustosta tehdyt mittaukset

Puiden mittaus tehtiin paikannuksen yhteydessä. Pituus (h) mitattiin kaikille puille. Tähän käytettiin elektronista hypsometriä isoille puille ($h > 5$ m), ja vaaituslattiaa tai teleskooppimittaa pienille puille. Rinnankorkeusläpimitta ($d_{1.3}$) mitattiin kaikille puille, jotka kuuluivat mitaajan arvion mukaan ylempään latvuserrokseen, sekä osalle suurimpia alikasvospuita. Elävän latvuksen alaraja (h_c) sekä viiden vuoden sädekasvu (vuodet 2004–2008) mitattiin suu-

rimmalle osalle ylemmän latvuserroksen puita. Ylemmän latvuserroksen puille määritettiin visuaalisesti latvuksen kunto ja alikasvospuille luokka elävä/kuollut.

Puiden latvuksen maksimiläpimitan mallinnukseen käytettiin kahta koepuuotosta. Ensimmäinen otos (koepuut 1) on mitattu 2002–2003 ja koostuu 738 männystä, kuusesta ja koivusta ($h > 10$ m) Hyytiälän metsäaseman ympäristössä. Toinen otos (koepuut 2) koostuu alikasvospuista valituista koepuista ($h < 12$ m) koealoilla A ja B. Siihen kuuluu 210 puuta, jotka edustavat kaikkia koealoilla kasvavia puulajeja.

Latvusleveyden ja elävän latvuksen alarajan ennustamista varten puut jaettiin suhteellisen pituuden ($h_{rel} = h/H_{dom}$) perusteella ylemmän latvuserroksen puihin ja alikasvospuihin. Maksimilatusleveys (d_{crm}) ennustettiin kaikille puille puulajikohtaisilla regressiomalleilla. Regressiomallit laadittiin erikseen ylemmän latvuserroksen puille (Yhtälö 1) käyttäen koepuita 1 ja alikasvospuille (Yhtälö 2) käyttäen koepuita 2.

$$\ln(d_{crm}) = b_0 + b_1 \cdot \ln(d_{1,3}) + b_2 \cdot \ln(h) \quad (1)$$

$$\ln(d_{crm}) = b_0 + b_1 \cdot \ln(h) \quad (2)$$

Elävän latvuksen alarajaa ei ollut mitattu suurimmalle osalle alikasvospuita, noin ¼:lle ylemmän latvuserroksen puita koealalla A, eikä muutamalle yksittäiselle ylemmän latvuserroksen puulle koealalla B. Näille ennustettiin latvusraja regressiomalleilla. Mallit laadittiin ylemmän latvuserroksen puille (Yhtälö 3) koealoilta tehtyjen latvusrajamittausten perusteella ja alikasvospuille (Yhtälö 4) käyttäen koepuita 2.

$$h_c = b_0 + b_1 \cdot d_{1,3} + b_2 \cdot h \quad (3)$$

$$\ln(h_c) = b_0 + b_1 \cdot \ln(h) \quad (4)$$

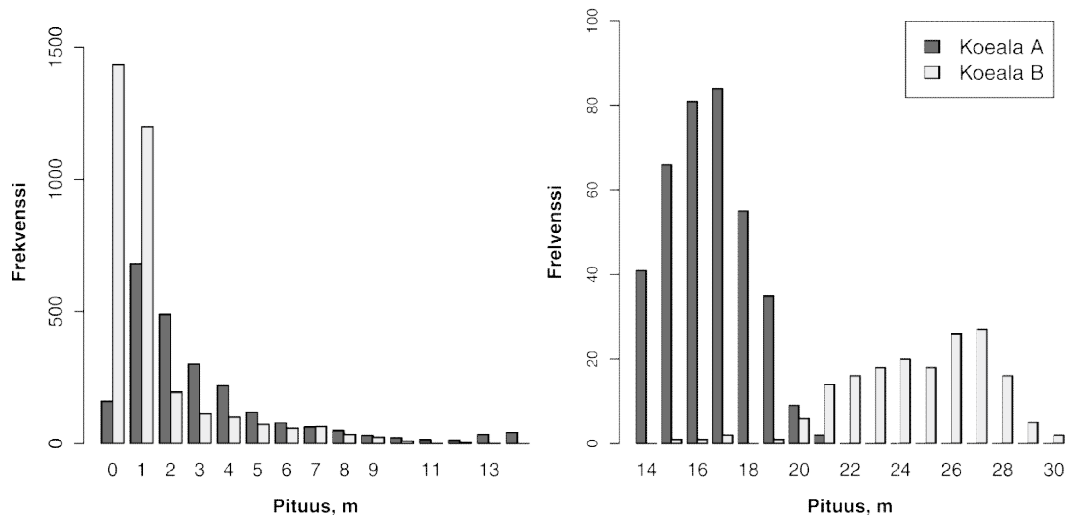
Kaikki regressiomallit, joissa selitettävä muuttuja oli logaritimuunnettu, tehtiin harhan korjaus lisäämällä mallin tuottamaan estimaattiin (μ) puolet mallin jäännösvirheen varianssista (σ) ennen eksponenttimuunnosta $y = e^{\mu + \sigma^2 / 2}$. Käytetyt laserkeilausaineistot oli hankittu 0–3 vuotta ennen mittauksia. Puiden pituuskasvua keilausten ja maastomittauksen välillä ei huomioitu, vaan kaikkien keilausaineistojen analysointiin käytettiin samoja puiden pituuksia.

2.1.4 Puuston kuvaus

Koealojen puustotunnukset on esitetty oheisessa taulukossa (Taulukko 1). Koealojen puusto on selkeästi kaksijaksoinen (Kuva 3). Koealalla B pienten, alle 0,5 m pituisten puiden osuus on suuri, kun taas koealalla A ei hyvin pieniä puita juuri ole.

Taulukko 1. Puustotunnukset koealoilla. Vallitsevan latvuserroksen puustotunnukset on laskettu eläville puille. Kuolleita puita vallitsevassa latvuserroksessa oli vain muutamia.

	Koeala A	Koeala B
Koko	60×60 m	30×100 m
Kasvupaikkatyyppi	VT-MT	VT
Valtapiisuus, H_{dom} , m	17,9	26,7
Ylempi latvuserros ($h_{rel} > 0,5$)		
Ikä, a	52	110
Runkoluku, S, runkoa ha^{-1}	972	393
Pohjapinta-ala, PPA, $m^2 ha^{-1}$	22,6	27,4
PPA:lla painotettu keskiläpimitta, D, cm	18,6	31,6
PPA:lla painotettu keskipituus, H, m	16,5	25,4
Kokonaisrunkotilavuus, $m^3 ha^{-1}$	182	318
Runkotilavuus, mänty, $m^3 ha^{-1}$	180	278
Runkotilavuus, kuusi, $m^3 ha^{-1}$	0,1	40
Runkotilavuus, koivu, $m^3 ha^{-1}$	1,2	0,4
Runkotilavuus, muu lehtipuu, $m^3 ha^{-1}$	0,3	0,0
Alikasvos ($h_{rel} < 0,5$)		
Runkoluku (elävät), runkoa ha^{-1}	5681	10903
Runkoluku (kuolleet), runkoa ha^{-1}	369	157



Kuva 3. Puiden pituusjakauma tutkimuskoealoilla. Erilliset asteikot alle 14 m ja yli 14 m puille.

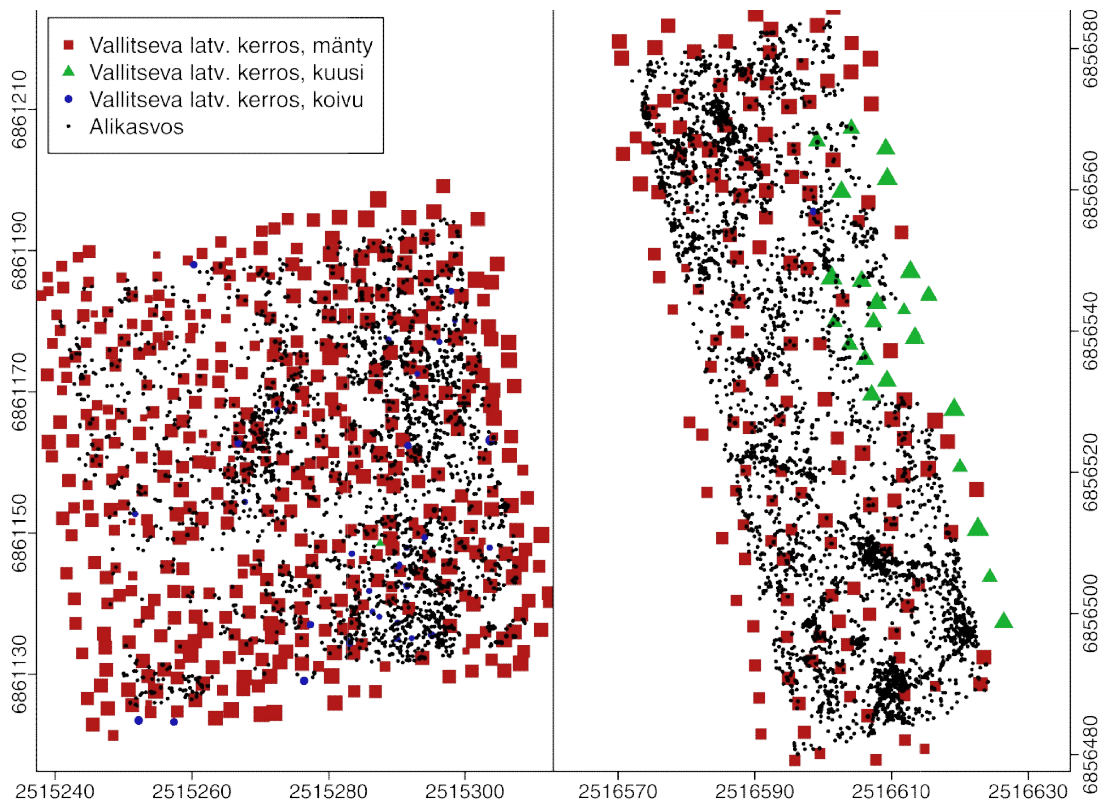
Alikasvoksen puusto koealalla A koostuu pääasiassa kuusesta ja koivusta, minkä lisäksi jonkin verran on pihlajaa ja pajuja (Taulukko 2). Koealalla B alikasvospuut ovat lähes yksinomaan kuusia. Tärkeimpien alikasvoksen puulajien (kuusi ja koivu) kokojakauma ei ole aivan tasainen. Kuuset ovat jonkin verran koivuja lyhyempiä, erityisesti koealalla B, jossa pienten kuusten muodostamat tiheiköt vääristävät kokojakaamaa. Harvinaisimpia puulajeja lukuun ottamatta näytteitä on kuitenkin kaikista kokoluokista.

Taulukko 2. Alikasvospuiden lkm sekä puiden pituuden keskiarvo, keskihajonta ja vaihteluväli koealoilla.

	Koeala A				Koeala B			
	N	ka	sd	min–max	N	ka	sd	min–max
Mänty	35	5,2	2,7	0,7–8,7	334	0,8	0,4	0,3–2,7
Kuusi	518	2,1	1,6	0,3–8,6	2603	1,3	1,9	0,3–12,8
Koivu	960	3,2	2,0	0,3–8,9	106	3,3	2,4	0,4–12,3
Haapa	136	1,7	1,5	0,3–8,3	99	1,2	0,9	0,3–6,4
Leppä	-	-	-	-	47	4,0	2,5	0,4–9,2
Raita	40	3,5	2,5	0,3–8,9	8	1,5	0,7	0,6–2,6
Pihlaja	202	1,9	1,5	0,4–8,5	56	1,8	1,3	0,4–6,1
Paju	249	1,6	1,1	0,3–5,6	1	0,5	-	0,5–0,5
Kataja	38	1,1	0,4	0,3–2,1	64	0,9	0,4	0,3–1,9

Kuvassa 4 on esitetty puuston spatiaalinen jakauma tutkimuskoealoilla. Kuvasta käy ilmi koealan A selkeä kasvupaikkagradietti, joka heijastuu alikasvoksen määrään ja vallitsevan puuston kokoon. Rehevin osa on koealan koilliskulmassa ja karuin osa luoteiskulmassa. Myös koealalla B on pientä vaihtelua vallitsevan puuston pituudessa koealan pohjoisosan puuston

ollessa pisintä. Koealan itäreunalla puusto muuttuu jonkin verran kuusivaltaiseksi. Koealan eteläosassa olevat alikasvoksen tihentymät muodostuvat pienistä, alle metrin pituisista kuusista. Alikasvoksen tilajakaumaa selvitettiin arpomalla koealoille satunnaisesti pisteitä (7000 kpl). Alikasvospuiden tiheys (kpl m^{-2}) ja keskipituus pisteen ympärillä eri säteisillä ($r = 0,5; 1,0; 1,5$ tai $2,0$) ympyräkoealoilla laskettiin, ja tutkittiin lineaarisen regression avulla, riippuvatko nämä ympyräkoealan etäisyydestä lähimpään ylemmän latvuskerroksen puuhun. Alikasvoksen tiheys kasvoi etäisyyden kasvaessa kaikilla käytetyillä koealan säteillä, mutta vaikutus ei ollut voimakkuudeltaan kovin suuri, ja selitysasteet olivat hyvin alhaisia ($R^2 < 0,01$). Koealalla A alikasvospuiden pituus pieni, kun etäisyys lähimpään ylemmän latvuskerroksen puuhun kasvoi, koealalla B vaikutusta pituuteen ei ollut. Myös pituuden osalta selitysasteet olivat alhaisia. Testien perusteella voidaan todeta, että alikasvospuusto vallitsevien puiden alla ei ole merkittävästi erilainen verrattuna vallitsevan puuston aukkopaikoissa kasvaan alikasvokseen. Alikasvospuuston ominaisuudet eivät siten vaikuta tulkintoihin lasersignaalin ominaisuuksista vallitsevien puiden alla vs. aukkopaikoissa.



Kuva 4. Puustokartat koealoilta (vasen: koeala A, oikea: koeala B). Vallitsevan latvuskerroksen puita kuvaavien symbolien koko kuvaa puun pituutta. Vallitsevan latvuskerroksen puut on kartoitettu myös 5 m puskurista koealan ulkopuolelta.

2.2 Laserkeilausaineistot

2.2.1 Yleiskuvaus

Tutkimuksessa käytettiin laserkeilausaineistoja vuosilta 2006–2008. Aineistot on hankittu kolmella eri lennolla, ja ne jaettiin neljään keilausaineistoon lentokorkeuden mukaan. Vuosina 2006, 2007 ja 2008 tehtiin jokaisena keilaus n. 1 km korkeudesta, minkä lisäksi 2008 tehtiin keilaus myös 2 km korkeudesta (Taulukko 3). Vuoden 2006 keilauksessa käytetty sensori oli Optech ALTM3100 (Optech Inc., Vaughan, Ontario, Kanada) ja vuosien 2007 ja 2008 keilauksissa Leica ALS50-II (Leica Geosystems, Heerbrugg, Sveitsi). Lisäksi aluepohjaisten menetelmien yhteydessä käytettiin keilausaineistoja vuosilta 2004 (Optech ALTM2033) ja 2010 (Leica ALS60) visualisoimaan alikasvoksen täydellisen poiston vaikutusta laserkaikujen korkeusjakaumaan.

Taulukko 3. Sensoreiden asetukset keilauksissa.

	ALTM_06_1km	ALS_07_1km	ALS_08_1km	ALS_08_2km
Pvm	25.6.2006	4.7.2007	23.8.2008	23.8.2008
Sensori	ALTM3100	ALS50-II	ALS50-II	ALS50-II
Lentokorkeus, m m.p.y.	840	780	960	2040
Pulssitaajuus, kHz	100	116	92	109
Skannaustaajuus, Hz	70	52	35	34
Skannauskulma	±14°	±15°	±32.5°	±32.5°
Keilanleveys (1/e), mrad	0,3	0,15	0,15	0,15
Automaattinen vastaanottimen voimakkuuden säätö (AGC)	ei	on	on	on

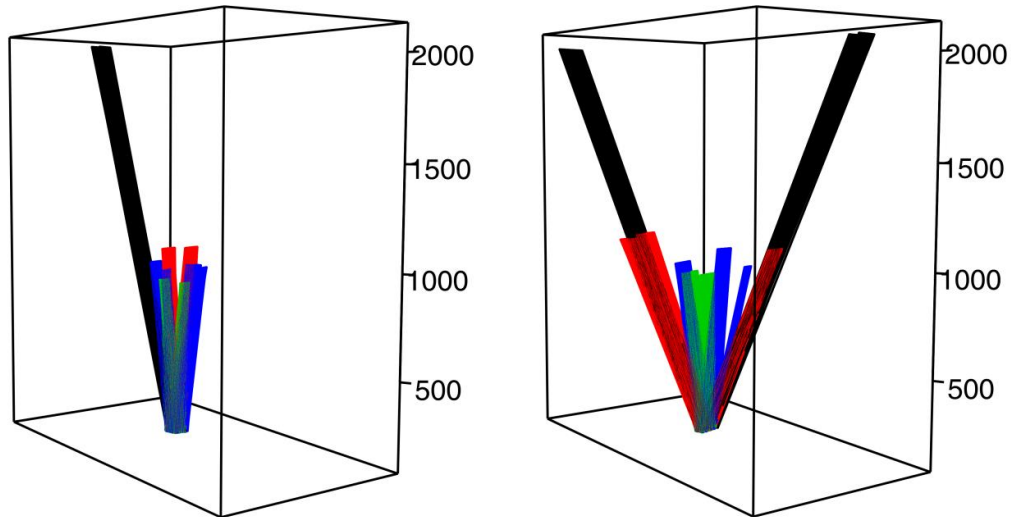
Sensorit eroavat toisistaan keilanleveyden suhteen. Keilanleveys on ilmoitettu milliradiaaneina ja se kertoo alan, jonka sisään jää 1/e pulssin energiasta. Keilanleveyden ollessa 0,3 mrad laserin jalanjäljen halkaisija on 0,3 m lennettäessä kilometrin korkeudella. ALS50-keilaimessa on automaattinen vastaanottimen voimakkuuden säätö (engl. *automatic gain control*, AGC). Laite säätää vastaanottimen voimakkuutta sen mukaan, kuinka voimakkaita kohteesta saadut lasersignaalit ovat. Tällä tavoin laitteen tallentamat intensiteetti-arvot pysyvät koko ajan laitteen 8 bitin tallennuskapasiteetin rajoissa eli välillä 0-255. Kaikki laseraineistot toimitettiin valmiiksi esikäsiteltyinä. Jokaiselle laserpulssille oli tallennettu mm. kaikujen lukumäärä, kaikujen sijainnit (XYZ) ja intensiteetti-arvot. Lisäksi oli tieto sensorin sijainnista pulssin vastaanottohetkenä, mikä mahdollisti pulssia kuvaavan vektorin muodostamisen eli

voitiin tarkasti kuvata pulssin kulkureitti puiden latvustossa. Mahdollinen vastaanottimen AGC-arvo oli myös tiedossa intensiteettien kalibrointia varten.

Keilausaineistoista erotettiin pulssit joiden viimeinen kaiku oli koealalla tai 20 m puskuri-vyöhykkeellä koealan ympärillä. Keilausten koealakohtaiset tunnuksat on esitetty taulukossa 4. Lentolinjojen määrä koealoilla vaihtelee. Lentolinjat olivat samansuuntaisia kaikissa keilauksissa. Koealalla A on ALTM_06_1km keilauksessa yksi poikittainen lentolinja. Skannauskulmat (pulssin kulma pystysuoraan nähden) ovat muissa keilauksissa alle 15 astetta, mutta vuoden 2008 keilauksissa koealalla B ne ovat tätä suuremmat (Kuva 5). Keilaukset 1 km:stä ovat pulssitiheydeltään käytännön sovelluksissa käytettäviä tiheämpiä. Pulssitiheys vaihtelee jonkin verran sen mukaan, miten koeala sijaitsee lentolinjoihin nähden.

Taulukko 4. Lentolinjojen määrä, pulssitiheys, skannauskulmat lentolinjoittain sekä minimi- ja maksimietiäisyys kohteeseen koealoittain.

	ALTM_06_1km	ALS_07_1km	ALS_08_1km	ALS_08_2km
Koeala A				
Lentolinjoja	4	2	2	2
Pulssitiheys, pulssia m ⁻²	9,7	6,3	2,1	0,9
Skannauskulmat, astetta	3,9; 8,1; 9,3; 12,1	8,1; 8,7	5,9; 2,9	13,0; 11,9
Skannausetäisyys, m	776–838	724–765	878–908	1881–1924
Koeala B				
Lentolinjoja	3	2	3	3
Pulssitiheys, pulssia m ⁻²	5,7	6,1	4,9	2,3
Skannauskulmat, astetta	13,6; 8,2; 5,6	10,6; 5,9	25,8; 25,1; 30,0	24,6; 23,9; 24,7
Skannausetäisyys, m	827–921	765–805	1003–1102	2059–2130



Kuva 5. Laserpulssien geometria koealoilla A (vasen) ja B (oikea). Sininen = ALTM_06_1km, punainen = ALS_07_1km, punainen = ALS_08_1km, musta = ALS_08_2km.

Laseraineistojen geometristen tarkkuuden XY-tasossa on aiemmissa tutkimuksissa todettu olevan parempi kuin 0,25 m (Korpela ym. 2008). Tarkkuutta Z-suunnassa arvioitiin käyttämällä GPS:llä (Network-GNSS) paikannettuja tasaisia pintoja (hiekkaja- ja asfalttitiet, ruohikko), joille laskettiin laserpisteiden Z-koordinaattien erotus GPS:llä mitattuihin nähden. Keskimääräinen ero Z-koordinaateissa kahden keilauksen välillä oli maksimissaan 0,06 m. Z-suuntaisia eroja ei yritetty korjata.

2.2.2 Laserintensiteetin etäisyys ja AGC -korjaus

Laserkeilaimen tallentamat raakaintensiteetit (I_{raw}) normalisoitiin kohteen ja sensorin välisen etäisyyden (R) ja mahdollisen sensorin AGC-arvon (AGC) suhteen käyttämällä yhtälöitä 5 (2006 keilaukset) ja 6 (2007 ja 2008 keilaukset) (Korpela ym. 2010a, Korpela ym. 2010b).

$$I_{corr} = \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^a \cdot I_{raw} \quad (5)$$

$$I_{corr} = \left(\frac{R}{R_{ref}} \right)^a \cdot I_{raw} + b \cdot I_{raw} \cdot (c - AGC) \quad (6)$$

R_{ref} on referenssietäisyys, johon jokaisen kaiun etäisyys suhteutetaan. Parametrit a , b ja c on ratkaistu jokaiselle keilaukselle erikseen minimoimalla homogeenisista kohteista saatujen laserintensiteettien hajontaa kohteen sisällä (Korpela ym. 2010a, Korpela ym. 2010b). Parametreissa b ja c oli eroja eri keilausten välillä. Korpela ym. (2010) osoittivat, että parametri a on erilainen eri puulajeille. Käytetyt arvot ovat aikaisemmissa tutkimuksissa samoilla aineistoilla käytettyjä arvoja, joiden on todettu olevan hyvä kompromissi eri puulajien välillä. Molemmille koealoille käytettiin samaa R_{ref} arvoa, mikä mahdollisti koealojen välisen intensiteettien vertailun.

2.2.3 Maanpinnan korkeusmalli

Koealoille laadittiin maanpinnan korkeusmallit (engl. *digital elevation model*, DEM) käyttäen TerraScan -ohjelmistoa (Terrasolid Oy, Jyväskylä). Ohjelman algoritmi erottelee maaosumat kasvillisuusosumista. Maaosumista laadittiin rasterimuotoinen maanpinnan korkeusmalli (0,5 m solukoko). Mallit laadittiin erikseen jokaiselle keilausaineistolle sekä kaikille aineistoille yhdistettynä. Malleja verrattiin keskenään, ja huomattiin, että yhdistetystä aineistosta laaditun mallin pinta on keskimäärin muutamia senttimetrejä alempana kuin erillisistä aineistoista laadittujen mallien. Koska käytössä ei ollut maastoreferenssimittauksia maanpinnan korkeudelle, jouduttiin turvautumaan mallin valinnassa mallin visuaaliseen tarkasteluun sekä mallien väliin vertailuihin. Yhdistetystä laseraineistosta laaditun mallin oletettiin olevan tarkin, koska tiheästä aineistosta ohjelman algoritmi löytää todennäköisesti enemmän todellisia maaosumia. Mallin laadinnassa käytettiin ohjelman oletusparametreja. Samalla ohjelmistolla laadittujen maanpintamallien keskimääräisen tarkkuuden (RMSE) on havaittu olevan 0,27 m varttuneen puuston alla (Korpela ja Välimäki 2007). Tuossa tutkimuksessa käytettiin aineistoa, jossa pulssitiheys oli 0,6–1,4 pulssia m^{-2} . Tämä on selvästi vähemmän kuin nyt käytetty yhdistetty pulssiaineisto (yli 15 pulssia m^{-2}).

2.3 Lasersignaali yksittäisen pulssin tasolla

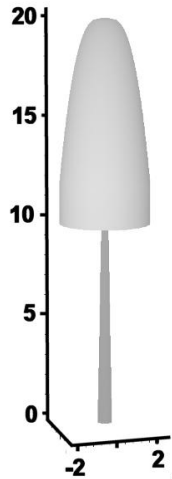
2.3.1 Puuston ja laserpulssien geometrinen mallinnus

Työn tässä vaiheessa tavoitteena oli mallintaa puiden latvusten geometria niin tarkasti kuin mahdollista, jotta voitaisiin yhdistää jokainen pulssi oikeaan kohteeseen maastossa. Mallinnuksessa käytettiin maastossa mitattuja puiden pituuksia ja latvusrajoja sekä mallinnettuja latvusrajoja (alikasvospuille ja osalle ylemmän latvuserroksen puita) ja maksimilatusleveyyksiä. Latvusten mallintamisessa käytettiin yksinkertaisia geometrisia kappaleita (Kuva 6), joiden avulla kuvattiin latvuksen ulkoinen muoto. Tällaiset mallit ovat yleisesti käytettyjä kaukokartoitustutkimuksissa (Rautiainen ym. 2008). Rautiainen ym. (2008) havaitsivat, että latvustilavuuden ennustamisen kannalta ei ollut suurta merkitystä sillä, oliko latvusmalli ellipsoidi vai sylinteri, jonka päällä jokin latvaa kohti kapeneva kappale (esim. kartio).

Latvukset oletettiin ympyräsymmetrisiksi, ja latvuksen mallinnus tehtiin kahdessa osassa. Latvusleveys tietyllä korkeudella latvasta 60 % suhteelliselle korkeudelle saatiin yhtälöstä 7, missä x on suhteellinen etäisyys (0–1) välillä latvasta 60 % suhteelliselle korkeudelle, ja b on latvuksen maksimisäde. Jos latvus jatkui 60 % korkeuden alapuolelle, tämä osa mallinnettiin sylinterinä, jonka säde on $b + a$ (Kuva 6). Jos latvus oli lyhyempi kuin 40 % puun pituudesta, latvuksen maksimisäde saavutettiin latvuksen alarajalla, ja x kertoi suhteellisen etäisyyden latvasta latvuksen alarajalle.

$$r(x) = a + b \cdot x^c \quad (7)$$

Rungot mallinnettiin katkaistuina kartioina, joiden pohjan halkaisija rinnankorkeusläpimitan tasalla on rinnankorkeusläpimitan suuruinen. Rungon oletettiin päättyvän latvusrajan tasalle eli latvuksen sisään jäävää osaa rungosta ei mallinnettu.



Kuva 6. Kuva geometrisesti mallinnetusta puusta. Latvus koostuu kahdesta osasta: sylinteristä ja sen päällä olevasta latvaa kohti kapenevasta kappaleesta. Runko on katkaistu kartio.

Parametri a oli kaikille puille $0,075$ m. Parametri b saatiin regressioyhtälöillä mallinnetusta latvusleveyden maksimista jakamalla maksimilatusleveys kahdella. Latvuksen muotoa kuvaavan parametrin c arvot olivat puulajikohtaisia (mänty = $0,376$, kuusi = $0,382$ ja lehtipuut = $0,246$). Ne saatiin puulajikohtaisina keskiarvoina aikaisemmasta tutkimuksesta, jossa sovitettiin samanlainen latvusmalli laserpistejoukkoon jokaiselle puulle erikseen. Kaiken kokoisille puille käytettiin samoja parametrin c arvoja.

Laserpulssin määrittä vektori, jonka alkupiste (XYZ) on sensorin sijainnissa ja loppupiste (XYZ) viimeisen pulssista saadun kaiun kohdalla. Pulssia kuvattiin kartiona, jonka halkaisija (d) tietyllä etäisyydellä saadaan keilanleveyden (b) ja etäisyyden avulla (R) kaavalla $d = b \cdot R$.

2.3.2 Laskentarutiini lasersignaalin yhdistämiseksi kohteeseen

Laserpulssin yhdistämiseksi kohteeseen, johon se oli osunut, kehitettiin laskentarutiini Java-ohjelmointikielellä. Tavoitteena oli 1) selvittää jokaiselle laserpulssille, mitä kohteita se oli leikannut sekä 2) yhdistää jokainen saatu laserkaiku kohteeseen, joka sen oli aiheuttanut.

Laskentarutiinissa käytiin läpi lista, joka sisälsi kaikki tutkittavat laserpulssit. Jokaisen pulssin kohdalla käytiin läpi kaikki mallinnetut kappaleet (puun latvus tai runko) ja tarkistettiin oliko pulssi leikannut kappaletta. Leikkauksen tarkistaminen tapahtui seuraamalla pulssia kuvaavaa vektoria kappaleen ylimmän Z-koordinaatin (puun latvan) korkeudelta alaspäin tasaisin Z-välein (Z_{diff}). Jokaisella korkeudella tarkistettiin, leikkasiko pulssi kappaleen. Leikkaus katsottiin tapahtuneeksi, jos pulssia kuvaavan kartion säde leikkasi tarkasteltavan kappaleen säteen. Leikkauksen pinta-ala (% pulssin jalanjäljestä) voitiin myös laskea, samoin kuin pulssin leikkausmatka ja leikkaustilavuus kappaleen kanssa. Z_{diff} määritettiin puun koon mukaan siten, että leikkaus tuli tarkistettua vähintään 20 eri korkeudella. Laserpulssi yhdistettiin (assosioitiin) jokaiseen kappaleeseen, jota se oli leikannut, ja jokaiselle leikatulle kappaleelle tarkistettiin, oliko se tuottanut kaikua leikkausmatkan varrelta. Yksi pulssi voitiin yhdistää useampaan kuin yhteen kappaleeseen, koska puiden latvukset saattoivat olla limittäin. Limittäisyyttä esiintyi erityisesti alikasvospuilla.

Kun kaikki mallinnetut kappaleet oli käyty läpi yhdelle pulssille, pulssista saattoi jäädä kaikuja, joita ei pystytty yhdistämään yhteenkään kappaleeseen. Nämä kaiut olivat joko maasta saatuja kaikuja tai puista saatuja kaikuja, jotka jäivät mallinnetun latvuksen/rungon ulkopuolelle geometrisen mallinnuksen epätarkkuuden takia. Nämä kaiut luokitettiin maaosumiksi, jos kaiun korkeus maanpinnan korkeusmallista oli alle 0,5 m. Kaikki yli 0,5 m korkeudelta saadut luokittelemattomat kaiut yhdistettiin latvusobjektiin, jonka pinta oli lähimpänä kaikua. Etäisyys latvuksen pintaan ei saanut olla kuitenkaan enemmän kuin 20 % maksimilatusleveudesta. Jos nämä ehdot eivät täyttyneet yhdenkään kappaleen kohdalla, kaiku jätettiin luokittamatta.

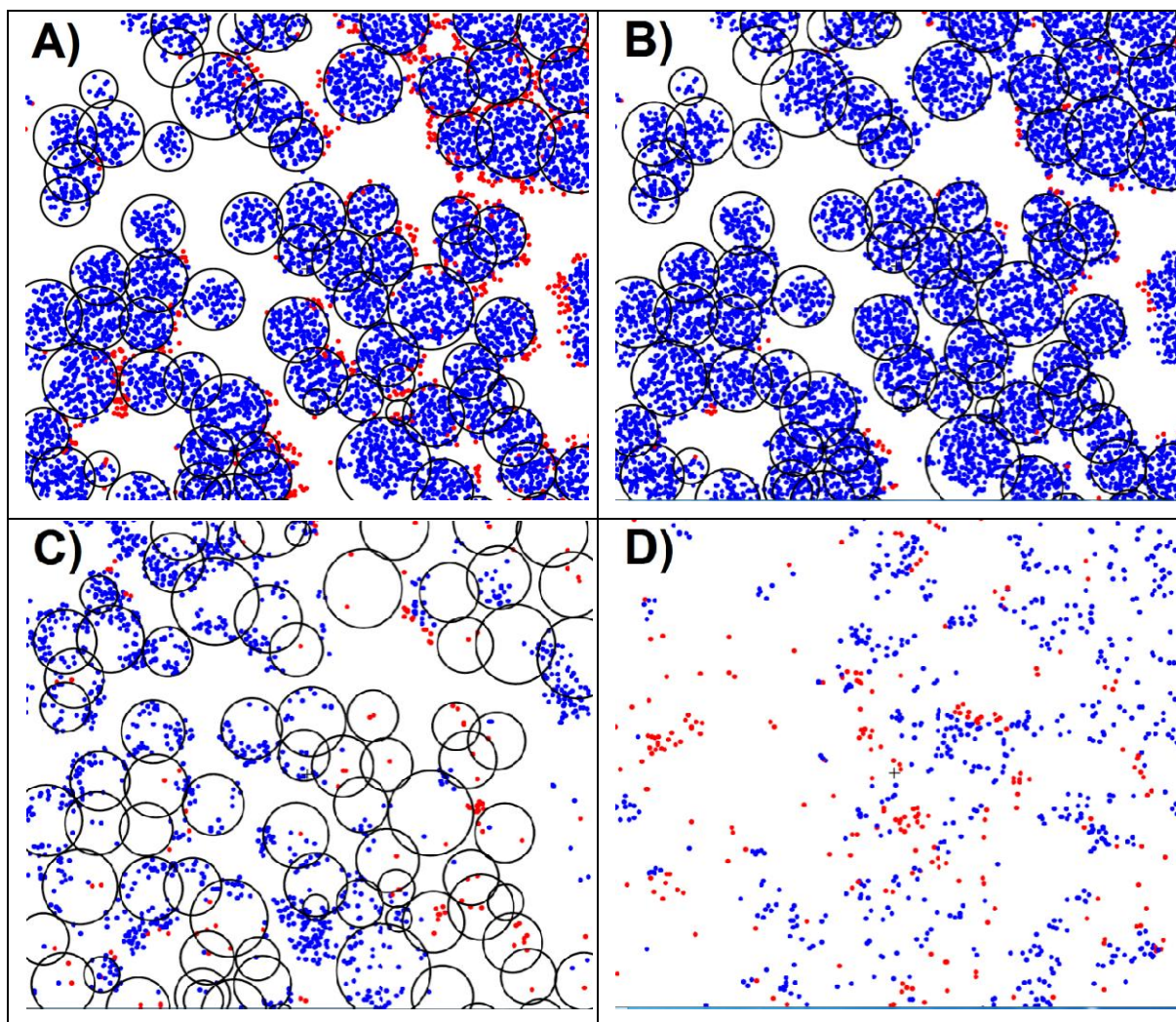
Laskentarutiinin tuloksena oli:

- 1) Lista pulsseista, jotka olivat matemaattisesti leikanneet jonkin mallinnetuista kappaleista sekä jokaiselle pulssille tieto siitä, mihin kappaleeseen pulssi oli osunut, ja oliko saatu kaikua.
- 2) Lista luokitelluista kaiuista (maa, puu, luokittamaton) sekä tiedot kappaleesta (latvus/runko), johon kaiku oli luokitettu.

2.3.3 Geometrisen mallinnuksen tarkkuus

Java-laskentaruutiinin onnistumista arvioitiin kahdella tavalla. Ensin tarkasteltiin luokittamatta jääneiden kaikujen ja useampaan kuin yhteen puuhun assosioitujen kaikujen osuutta ja sijoitumista koealoilla. Nämä antavat tietoa latvusmallinnuksen tarkkuudesta. Tämän jälkeen liikutettiin mallinnettuja puita XY-tasossa ja tarkasteltiin siirron vaikutusta saatujen tulosten tarkkuuteen. Tällä tavoin saatiin selville puiden ja laserkaikujen XY-koordinaattien välisiä systemaattisia eroja, jotka voitiin myöhemmissä analyyseissa ottaa huomioon.

Kuvassa 7 on havainnollistettu luokittamatta jääneiden kaikujen avulla latvusmallinnuksen tarkkuutta. Kun luokitetaan puuosumiksi vain ne kaiut, joissa laserin jalanjälki on matemaattisesti leikannut puun latvuksen, jää latvuksen ulkoreunoille jonkin verran luokittamattomia kaikuja, erityisesti vallitsevassa latvuserroksessa. Kun sovelletaan rajaa, jonka mukaan luokittamaton kaiku luokitetaan puuhun, jos sen etäisyys latvusmallin pinnasta on alle 20 % latvusleveydestä, saadaan lähes kaikki kaiut vallitsevassa latvuserroksessa assosioitua puihin. Tämän jälkeen jäljelle jää vielä kahden tyyppisiä virheitä. Ensimmäinen, isojen puiden latvusrajan alapuolella jonkin verran kaikuja jää luokittamatta latvusrajan määrittämisen epätarkkuuden takia. Toiseksi, lähellä maanpintaa (0,5–1,5 m korkeudella) jonkin verran luokitusvirheitä aiheutuu maastomallin epätarkkuudesta. Jälkimmäistä virhetyyppiä havaittiin koealalla A, jossa pintakasvillisuus on rehevämpää ja topografia vaihtelevampi kuin koealalla B.

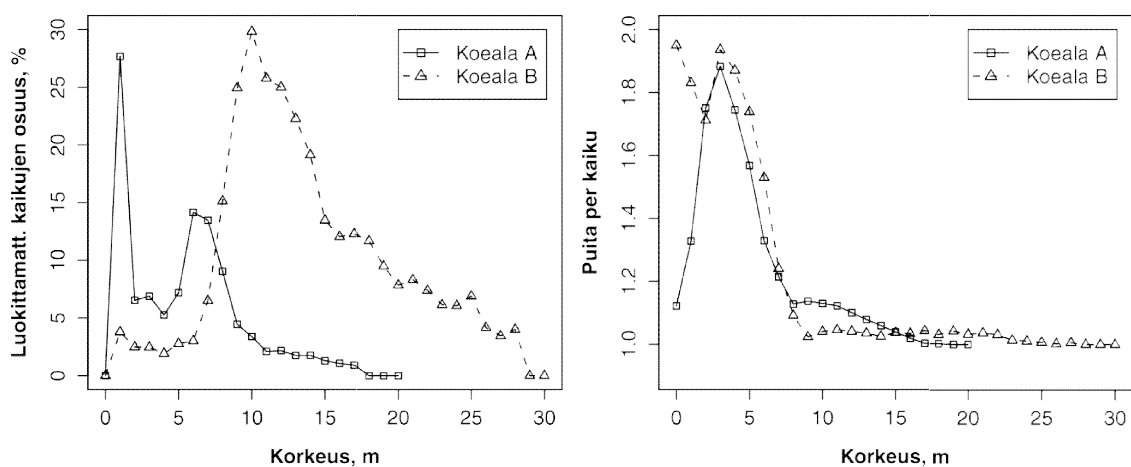


Kuva 7. Kaikujen luokittelun onnistuminen osalla koelaa A. Sininen piste on puuhun luokitettu kaiku, punainen luokittamatta jäänyt. Musta ympyrä kuvaa ylemmän latvuskerroksen puun latvuksen maksimisädettä. A) Kaiut yli 9 m korkeudelta. Vain ne kaiut, jotka ovat matemaattisesti leikanneet latvuksen, on assosioitu puihin. Kuvissa B–D latvusmallin ulkopuoliset kaiut on assosioitu puihin, jos etäisyys latvusmallin pintaan alle $0,2 \times d_{\text{crm}}$. B) Kaiut yli 9 m korkeudelta, luokittamattomia kaikuja jää enää muutamia. C) Kaiut väliltä 5–9 m, luokittamatta jääneet kaiut sijaitsevat enimmäkseen isojen puiden latvusten alla. D) Kaiut väliltä 0,5–1,5 m, luokittamatta jääneitä on jonkin verran. Todennäköisin syy ovat mättäät ja varvukko, jotka ei näy maanpinnan korkeusmallilla.

Luokittamatta jääneiden kaikujen osuutta sekä niiden puiden keksimääräistä lukumäärää, joihin yksi kaiku on assosioitu, tarkasteltiin 1 m korkeusluokittain (Kuva 8). Molemmilla koealoilla luokittamatta jääneiden kaikujen osuus on suuri 0–3 m ylemmän latvuskerroksen keskimääräisen latvusrajan alapuolella. Vaikka osuus on suuri, tämä ei tarkoita kovin suurta lukumäärää, koska kaikuja lähellä puiden latvusten alarajaa on suhteellisen vähän. Luokittamattomien kaikujen suuri osuus aiheutuu luultavasti latvusrajan määrittämisen epätarkkuudesta. Latvusrajan määrittäminen maastossa ei ole täysin yksiselitteinen, ja lisäksi latvusraja mitattiin elävän latvuksen alarajalle. Elävä latvus katsottiin alkavaksi ensimmäisestä elävästä oksakiehkurasta, jonka yläpuolella ei enää ole kahta peräkäistä kuollutta oksakiehkuraa. On siis

mahdollista, että maastomitatun latvusrajan alapuolella on vielä oksia, jotka ovat tuottaneet kairuja. Lisäksi koealalla A jäi 1 m korkeusluokassa 28 % kairuista luokittamatta. Täällä raja maaosumiksi tulkittaville kairuille (0,5 m) oli hieman liian matala. Kaikkia korkeusluokkia yhdessä tarkasteltaessa kairuja jäi luokittamatta 3–8 % koealasta ja keilauksesta riippuen.

Alikasvoksessa yksi kairu luokitettiin keskimäärin selvästi useampaan kuin yhteen puuhun (Kuva 8). Sen sijaan ylempässä latvuserroksessa latvusten limittäisyyttä ei juuri esiintynyt. Erot koealojen välillä pienimmillä (0–1 m) puilla aiheutuvat koealan B suuresta pienten puiden tiheydestä.

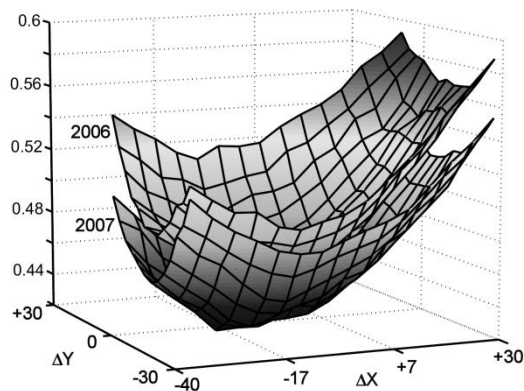


Kuva 8. Luokittamattomien kairujen osuus kaikista kairuista sekä puiden lukumäärä, joihin yksi kairu keskimäärin luokitettiin. Arvot on esitetty 1 m pituusluokittain.

XY-tason suuntaisten systemaattisten erojen selvittämiseksi laseraineistojen ja maastossa paikannettujen puiden välillä suoritettiin laskenta, jossa Java-laskentaruutiinia toistettiin siirtämällä puiden sijainteja 0,05×0,05 m solukoon hilassa 0,70×0,60 m alalla alkuperäisten sijaintien ympärillä. Jokaiselle puiden sijainnille suoritettiin Java-laskentaruutiini siten, että vain latvuksen leikanneet kairut luokitettiin puihin. Tällä tavoin saadusta aineistosta laskettiin luokittamattomien kairujen (latvuksen ulkopuoliset kairut) osuus korkeusvälillä 1 m:stä alikasvoksen ylärajalle (*lu_osuus*). Lisäksi laskettiin jokaiselle puulle korkeimman kairun vaakasuora etäisyys puun rungosta (*et_runko*). Koska puut ovat ylöspäin kapenevia, tulisi tämän etäisyyden minimoitua silloin, kun puiden sijainnit XY-tasossa ovat oikein laseraineistoon nähden.

Sekä *lu_osuus* että *et_runko* -muuttujissa havaittiin selkeä minimikohta tietyillä puiden sijainneilla. Tuloksista voitiin piirtää pinta, jossa x ja y-akselit ovat puiden siirtoja X ja Y-

suunnassa, ja z-akselilla on tarkasteltava muuttuja (Kuva 9). Pintaan sovitettiin toisen asteen polynomifunktio lineaarisella regressiolla, ja tämän polynomifunktion minimiarvo etsittiin 0,01 m tarkkuudella kaikille keilauksille ja kummallekin koealalle erikseen. Puiden X- ja Y-siirto minimikohdassa otettiin talteen (Taulukko 5). Minimikohta poikkesi keskimäärin 0,14 m origosta, mikä kertoo, että puita siirtämällä aineiston geometrinen tarkkuus parani. Toisaalta minimiarvot eri muuttujilla saavutettiin hieman eri paikassa. Muuttujien väliset erot (keskimäärin 0,9 m) olivat kuitenkin hieman pienempiä kuin siirto origosta. Koealalla B molempien muuttujien indikoimat XY-siirrot olivat samansuuntaiset kuin Korpela (2008) havaitsi koealan B lähellä aikaisemmassa tutkimuksessa. Muuttujan *et_runko* tuottaman pinnan minimi oli keskimäärin hieman terävämpi, joten tämän muuttujan arveltiin olevan hieman tarkempi indikaattori kuin *lu_osuus*. Muuttujan *et_runko* indikoimat keilauskohtaiset korjaukset puiden XY-koordinaatteihin tehtiin puille kaikissa analyyseissa tästä eteenpäin.



Kuva 9. Alikasvospuusta saadun ylimmän laserkaiun keskietäisyys rungosta siirrettäessä puita 0,05×0,05 m ruudukossa ALTM_06_1km ja ALS_07_1km keilauksissa.

Taulukko 5. Puiden X- ja Y-suuntaiset siirrot, joilla indikaattorimuuttujien et_runko ja lu_osuus minimiarvot saavutettiin.

Koeala	Keilaus	et_runko		lu_osuus	
		ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
A	ALTM_06_1km	+8	-1	+11	-4
A	ALS_07_1km	+8	+13	+9	+8
A	ALS_08_1km	+19	+6	+11	+2
A	ALS_08_2km	+6	+11	-1	+2
B	ALTM_06_1km	-17	-4	-17	-15
B	ALS_07_1km	-14	+4	-19	-2
B	ALS_08_1km	-8	+4	-22	-2
B	ALS_08_2km	-13	-12	-4	-8

2.3.4 Laserkaiun intensiteetin vertailu kohteiden välillä

Intensiteettitarkasteluja varten alikasvoskerroksesta ($h < 0,5 \times H_{\text{dom}}$) saadut laserkaiut jaettiin kaiun tuottaneen kohteen mukaan seuraaviin luokkiin: maa, alikasvospuut (puulajit eroteltuna) sekä ylemmän latvuskerroksen puiden rungot. Jos kaiku oli luokitettu useampaan kuin yhteen puuhun, valittiin puista se, jonka runkoon kaiun suhteellinen vaakasuora etäisyys (etäisyys jaettuna latvusleveydellä) oli pienin. Analyysit toistettiin myös kaiuilla, jotka oli luokitettu vain yhteen puuhun, mutta tämä ei vaikuttanut tuloksiin. Kaiut jaettiin neljään luokkaan: *yksittäinen*, *yksittäinen/ensimmäinen*, *toinen* ja *kolmas*. *Yksittäinen/ensimmäinen* -luokka eroaa yksittäisestä siten, että siinä ovat mukana yksittäisten kaikujen lisäksi ensimmäiset kaiut useamman kuin yhden kaiun tuottaneista pulsseista. Ensimmäisiä kaikuja alikasvoskerroksesta oli vähän, joten luokat *yksittäinen* ja *yksittäinen/ensimmäinen* eroavat vain hieman toisistaan. Vaikka käytetyt sensorit voivat tuottaa neljä kaikua per pulssi, neljänsien kaikujen lukumäärät aineistossa olivat alle 10 kpl yhtä koealaa ja keilausta kohti. Laserintensiteettien eroja kohteiden välillä vertailtiin keskiarvojen sekä yksinkertaisten jakaumatunnusten (minimi, maksimi, keskihajonta, ala- ja yläkvartiilit) avulla. Vain ne kohteet, jotka olivat tuottaneet vähintään 30 kaikua kaikuluokkaa kohti, otettiin mukaan tarkasteluun. Alikasvospuihin assosioiduista saaduista kaiuista otettiin mukaan vain ne, joiden korkeus maanpinnasta oli yli 0,5 m.

Laserintensiteeteille tehtiin etäisyys/AGC -korjaukset sekä pulssin energiahäviöihin perustuvat korjaukset (selostus seuraavassa luvussa). Korjausten onnistumisen mittana käytettiin koh-

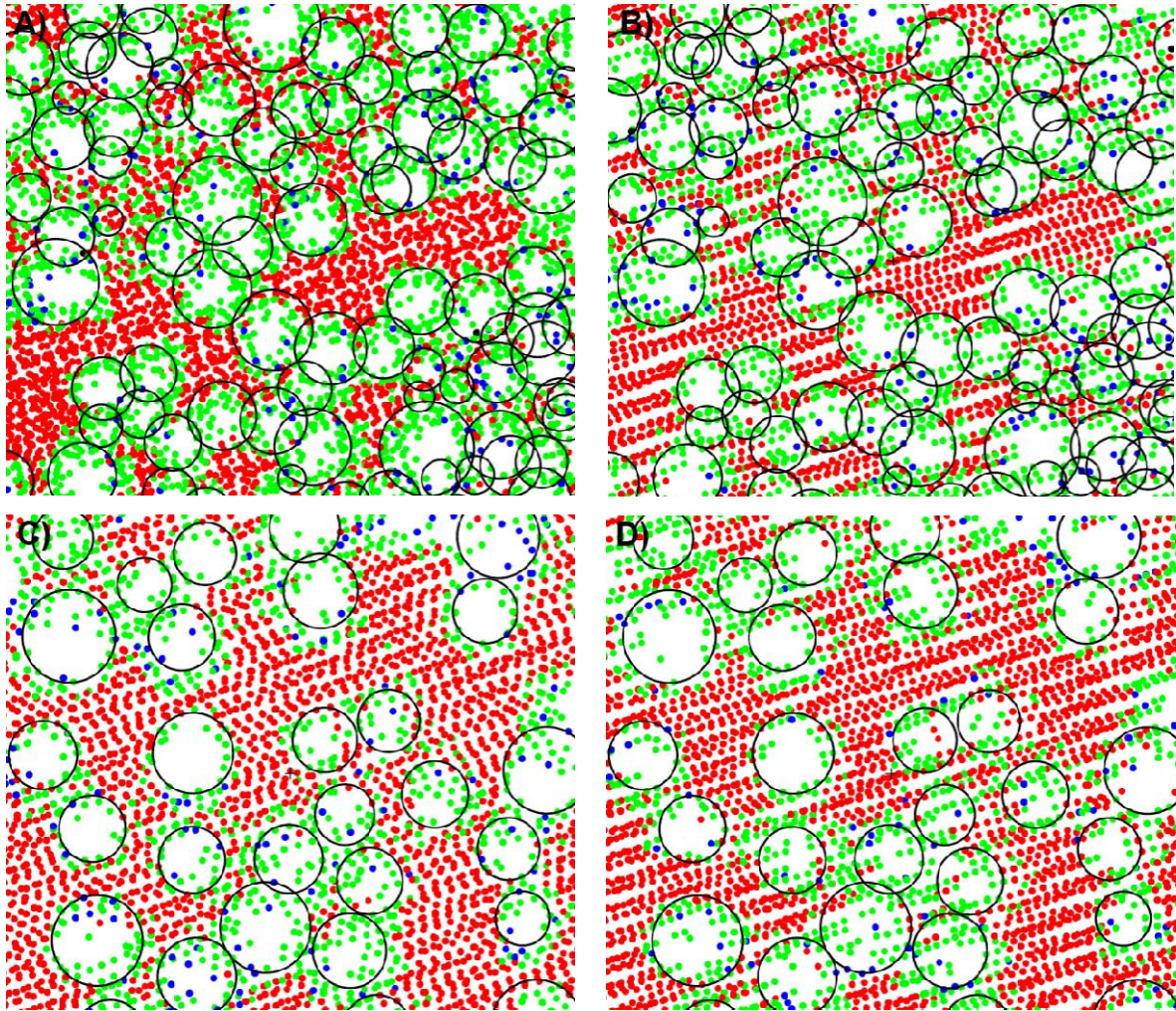
teista saatujen kaikujen intensiteetin yhdistettyä variaatiokerrointa (CV_{pooled}), joka laskettiin yhtälöllä 8.

$$CV_{pooled} = \sum_{i=1}^N n_i CV_i \quad (8)$$

missä N on kohteiden lukumäärä, n_i on kohteen i tuottamien laserkaikujen osuus kaikista kaiuista ja CV_i on intensiteettien variaatiokerroin kohteessa i . CV_{pooled} mittaa kohteiden sisäistä intensiteetin hajontaa. Lisäksi korjausten onnistumista arvioitiin suorittamalla ohjattu luokitus maan ja yleisimmän puulajin välillä ennen ja jälkeen korjauksen käyttäen lineaarista diskriminanttianalyysia (LDA). Luokitus tehtiin vain maalle ja yleisimmälle puulajille, koska puulajien väliset erot intensiteettien keskiarvoissa olivat hyvin pieniä. Luokitustarkkuuden paranemista korjausten jälkeen arvioitiin oikeinluokitusprosentin ja kappa-arvon (Cohen's kappa) avulla.

2.3.5 Energiahäviöt ylempiin latvuserroksiin

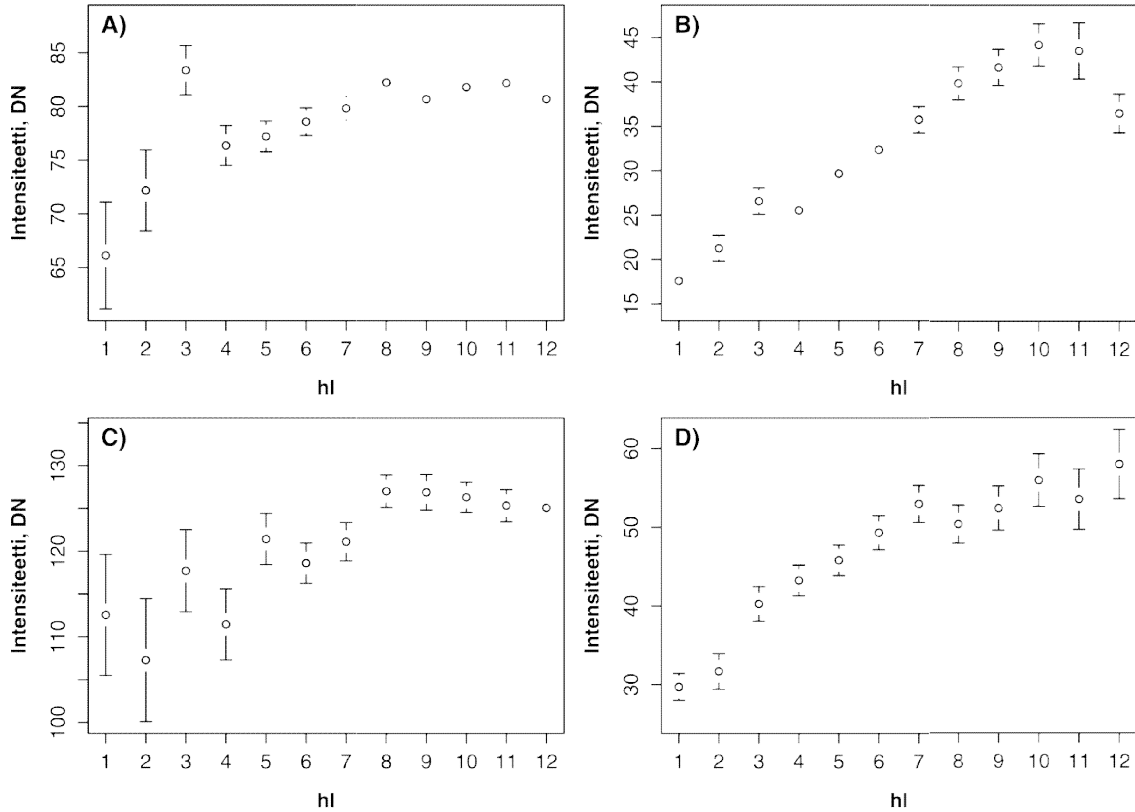
Pulssien tunkeutumista alikasvoskerrokseen havainnollistettiin tekniikalla, jossa kaikki tietyn korkeuden H läpäisseet pulssit projisoitiin takaisin tasolle H (Korpela ym. 2010b). Jokaista laserpulssia seurattiin viimeisen kaiun korkeudelta ylöspäin ja etsittiin XY-piste, jossa pulssi on leikannut tason H . Aukkopaikat syntyneellä pistekartalla (Kuva 10) ovat kohtia, joissa tason H läpi ei ole tunkeutunut yhtään pulssia. Ne sijaitsevat ylempään latvuserroksen puiden kohdalla. Niissä energiahäviöt ovat niin suuria, että pulssit sammuvat kokonaan. Aukot ovat suurempia koealalla B laakealatuksisten vanhojen mäntyjen tapauksessa kuin koealalla A nuoremmassa männikössä. Kaksi tai useampia kaikuja tuottaneet pulssit sijaitsevat suurimmaksi osaksi ylempään latvuserroksen puiden latvusten ympärillä. Näissä ensimmäinen kaiu on todennäköisesti tullut ylempään latvuserroksen puusta, ja pulssi on jatkanut kulkua vaimentuneena alikasvoskerrokseen. Joitakin yksittäisiä pulsseja menee suurten puiden latvusten läpi tuottamatta kaikua.



Kuva 10. Pulssien tunkeutuminen alikasvoskerrokseen. Ylemmän latvuserroksen keskimääräisen latvusrajan läpäisseet pulssit on projisoitu takaisin pisteeseen (X,Y), jossa pulssi on leikannut tämän tason. Mustat ympyrät kuvaavat ylemmän latvuserroksen puiden latvuksen sädettä. Pulssit on jaoteltu sen mukaan, kuinka monta kaikua niistä on saatu. Punainen = 1 kaiku, vihreä = 2 kaikua, sininen = 3 kaikua, musta = 4 kaikua. A) koeala A, ALTM_06_1km; B) koeala A, ALS_07_1km; C) koeala B, ALTM_06_1km; D) koeala B, ALS_07_1km.

Energiahäviöiden suuruuden tutkimiseksi ylemmän latvuserroksen puiden latvusmalleista tehtiin 11 eri versiota skaalaamalla maksimilatusleveyttä kertoimilla 0,5–1,5. Jokaiselle pulssille määritettiin häviöluokka (*hl*) seuraavasti: Jos pulssi oli leikannut jonkin kaikkein pienimmistä ($0,5\times$) latvuksista, se sai häviöluokan 1, jos pulssi oli leikannut jonkin seuraavaksi pienimmän ($0,6\times$) latvuksen se sai häviöluokan 2 jne. Lopuksi, pulssi joka ei ollut leikannut yhtäkään latvuksista, joiden leveys oli suurennettu 1,5-kertaiseksi, sai häviöluokan 12. Häviöluokka kuvaa, kuinka läheltä ylemmän latvuserroksen puun latvuksen keskipistettä pulssi on kulkenut. Alikasvoksesta saatujen kaikujen intensiteettien keskiarvossa on selkeä säännönmukaisuus häviöluokan funktiona (Kuva 11). Mitä lähempää ylemmän latvuserroksen puun runkoa pulssi on tunkeutunut, sitä pienempi on alikasvoskerroksesta saadun kaiun intensiteetti. Tämä havaittiin kaikilla kaikuluokilla, mutta yksittäisillä ja ensimmäisillä kaiuil-

la vaikutus oli selvästi pienempi kuin toisilla tai kolmansilla. Tulokset osoittavat, että alikasvoskerrokseen yltävissä pulsseissa on tapahtunut energiahäviöitä, joista suurin osa havaitaan yleimmästä latvuskerroksesta saatuina kaikuina.



Kuva 11. Alikasvoskerroksesta saatujen laserkaikujen keskimääräinen intensiteetti häviöluokan funktiona koealalla B. Virhepalkit kuvaavat keskiarvon keskivirhettä. A) ALTM_06_1km, yksittäiset kaiut, B) ALTM_06_1km, 2. kaiut, C) ALS_07_1km, yksittäiset kaiut, D) ALS_07_1km, 2. kaiut.

2.3.6 Intensiteettien korjaus pulssin energiahäviöillä

Alikasvoskerroksesta havaitun laserintensiteetin korjaamiseksi energiahäviöillä laadittiin mallit, joilla korjattiin alikasvoskerroksesta (maa/alikasvospuut) saatujen 2. ja 3. kaikujen intensiteettejä. Yksittäisten ja ensimmäisten kaikujen intensiteettejä ei yritetty korjata. Tähän syynä olivat, että energiahäviöt olivat näissä kaikuluokissa pieniä, ja lisäksi niiden pulssien määrä, joilla energiahäviöitä oli tapahtunut, oli alhainen. Malleja häviöiden korjaamiseksi kokeiltiin vain ALTM_06_1km ja ALS_07_1km aineistoille, joissa pulssitiheys oli suuri ja havaintoja siten riittävästi luotettavien päätelmien tekemiseksi.

Energiahäviöitä kuvaavina tunnuksina käytettiin 1) pulssista saatujen aiempien kaikujen intensiteettejä ja 2) pulssin leikkausgeometriaa ylemmän latvuserrosten puiden kanssa. Aiempien kaikujen intensiteettien käyttö ei ole täysin ongelmaton. Laserintensiteettiin vaikuttavat etäisyys kartoitettavaan kohteeseen, vastaanottimen asetukset, kohteen pinta-ala laserin jalanjälkeen suhteutettuna sekä kohteen reflektanssi ja kulma laserpulssiin nähden. Näistä etäisyys ja vastaanottimen asetukset on huomioitu intensiteetille tehdyssä etäisyys/AGC -korjauksessa. Skannauskulmat olivat ALTM_06_1km ja ALS_07_1km pieniä, joten valaisukulma ei merkittävästi vaihtele. Tutkimuskoealoilla ylempi latvuserros koostui suurimmaksi osaksi männystä. Ylemmän latvuserroksen puiden reflektanssin voidaan siten olettaa olevan vakio, jolloin ylemmästä latvuserroksesta saadun kaiun intensiteetti mittaa pulssin leikkauspinta-alaa kohteen kanssa, ja sitä voidaan käyttää energiahäviön mittana. Mitä suurempi on leikkauspinta-ala sitä suurempi osa energiasta heijastuu kohteesta takaisin jatkamatta kulkua alikasvokseen. Tarkasteltaessa alikasvoksesta saatuja 2. kaikuja, huomataan, että pulssin ensimmäinen kaiku on saatu yli 90 %:ssa tapauksista ylemmästä latvuserroksesta ja yli 83 %:ssa tapauksista männystä (Taulukko 6). Alikasvoksesta saaduilla 3. kaiuilla pulssin ensimmäinen kaiku on lähes aina ylemmästä latvuserroksesta ja männystä, mutta sen sijaan pulssin 2. kaiku saattaa olla myös alikasvoskerroksesta eikä aina välttämättä männystä. Oletus aikaisempia kaikuja tuottaneiden kohteiden vakioflektanssista ei siis täysin päde kolmen kaiun pulsseissa. Lisäksi jonkin verran epävarmuutta aiheutuu siitä, että pulssin energia ei ole vakio jalanjäljen alalla, jolloin havaittu intensiteetti riippuu leikkauspinta-alan lisäksi myös siitä, sijaitseeko kohde jalanjäljen keskellä vai reunalla.

Taulukko 6. Pulssista saatujen aiempien kaikujen jakautuminen latvustossa.

Keilaus	Koeala	1. kaiku			2. kaiku		
		Kaikujen lkm	Vallitsevasta latvuserroksesta, %	Männystä, %	Kaikujen lkm	Vallitsevasta latvuserroksesta, %	Männystä, %
Pulssit, joissa 2. kaiku alikasvoksesta/maasta							
ALTM_06_1km	A	9570	96,1	95,1	-	-	-
ALTM_06_1km	B	2304	93,0	83,8	-	-	-
ALS_07_1km	A	5719	96,1	94,7	-	-	-
ALS_07_1km	B	2308	92,9	86,6	-	-	-
ALS_08_1km	A	1969	96,5	95,4	-	-	-
ALS_08_1km	B	2284	93,4	88,5	-	-	-
ALS_08_2km	A	861	95,5	93,3	-	-	-
ALS_08_2km	B	1214	92,7	85,9	-	-	-
Pulssit, joissa 3. kaiku alikasvoksesta/maasta							
ALTM_06_1km	A	528	100,0	99,2	423	81,1	74,7
ALTM_06_1km	B	292	99,7	84,9	284	89,8	70,8
ALS_07_1km	A	364	100,0	98,6	268	54,9	48,1
ALS_07_1km	B	227	100,0	90,7	214	79,0	63,6
ALS_08_1km	A	71	100,0	97,2	66	47,0	40,9
ALS_08_1km	B	187	99,5	94,7	162	67,3	51,9
ALS_08_2km	A	59	100,0	96,6	45	48,9	44,4
ALS_08_2km	B	133	97,0	80,5	135	68,1	44,4

Malleja häviöiden korjaamiseksi laadittiin 5 erilaista. Näistä mallit 1–2 perustuvat pelkästään aikaisempien kaikujen intensiteettiin ja malleissa 3–5 on mukana pulssin leikkausgeometriaa ylemmän latvuserroksen kanssa huomioiva termi. Mallit ovat muotoa

$$I_{corr_h} = m_1 \cdot m_2 \cdot I_{corr} \quad (9)$$

missä I_{corr_h} on häviöillä kompensoitu intensiteetti, I_{corr} on etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti, m_1 on aikaisempien kaikujen intensiteetteihin perustuva kerroin, ja m_2 on pulssin leikkausgeometriaan ylemmän latvuserroksen kanssa perustuva kerroin.

Kertoimien m_1 ja m_2 laskentakaavat käytetyissä malleissa on esitetty taulukossa 7. Malleissa 1 ja 2 geometriatermi m_2 on 1. Mallissa 1 aiempien kaikujen intensiteetin vaikutus on lineaari-

nen, mallissa 2 epälineaarinen. I_{prev} on pulssista saatujen aiempien kaikujen intensiteettien summa. Korjattaessa 2. kaikuja I_{prev} on 1. kaiun etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti. Korjattaessa 3. kaikuja I_{prev} on laskettu summaamalla 1. kaiun etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti ja 2. kaiun energiahäviöillä kompensoitu intensiteetti (käytetty mallia 2). Korjaukset 2. kaikujen intensiteeteille tehtiin kaikilla malleilla, mutta 3. kaikujen intensiteettien korjaukseen kokeiltiin vain malleja 1–2.

Taulukko 7. Intensiteettien korjauksessa energiahäviöillä käytettyjen mallien kertoimet. I_{prev} = intensiteettien summa aikaisemmista kaikuista.

Malli	m1	m2
1	$1 + b_0 \cdot I_{prev}$	1
2	$1 + b_0 \cdot I_{prev}^{b_1}$	
3	$1 + b_0 \cdot I_{prev}^{b_1}$	$1 + c_0 \cdot T_{beer}^{c_1}$
4	$1 + b_0 \cdot I_{prev}^{b_1}$	$1 + c_0 \cdot (1 - hl)$
5	$1 + b_0 \cdot I_{prev}^{b_1}$	$1 + c_0 \cdot dh$

Malleissa 3–5 kokeiltiin kolmea erilaista geometriaa kuvaavaa muuttujaa. Ensimmäinen (malli 3) on Lambert-Beerin lakiin (Gower ym. 1999) perustuva muuttuja. Lambert-Beerin laki kuvaa säteilyn sammumista homogeenisessä väliaineessa. Laki pätee vain homogeenisille latvustoille, joissa lehtien tilajakauma on satunnainen. Tässä työssä sovellettiin lain perusperiaatetta, jonka mukaan latvuston läpi päässyt säteily sammuu eksponentiaalisesti. Tätä voidaan havainnollistaa jakamalla latvusto tasapaksuihin kerroksiin. Latvustoon tuleva säteily osuu ensin ylimpään kerrokseen, jonka läpi pääsee tietty osa säteilystä. Toiseksi ylimpään kerrokseen tulee enää ylimmän kerroksen läpi päässyt säteily, ja sen läpi pääsee jälleen tietty osuus kerrokseen tulevasta säteilystä. Laskenta laserpulssille suoritettiin ottamalla tarkasteluun yksi laserpulssi kerrallaan. Kerroksen i läpi päässeen energian osuus kerrokseen tulevasta laserpulssin energiasta eli kerroksen läpäisevyys on k_i . Koko latvuston läpi päässeen energian osuus (E_t) pulssin energiasta latvuston yläpuolella saadaan yhtälöstä 10.

$$E_t = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_n \quad (10)$$

missä n on kerrosten lukumäärä. Energiahäviön ja läpipäässeeseen energian summa on 1, jolloin energiahäviö (T_{beer}) lasketaan seuraavasti:

$$T_{beer} = 1 - E_t \quad (11)$$

Laserpulssin reittiä ylemmän latvuserroksen läpi seurattiin 0,20 m kerroksittain. Jokaisessa kerroksessa tarkistettiin, onko pulssi jonkin latvusobjektin sisällä. Jos pulssi oli latvusobjektin ulkopuolella, kerroksen läpäisevyys oli 1. Latvuksen sisällä läpäisevyyden oletettiin riippuvan neulastiheydestä. Neulastiheyttä mallinnettiin funktioilla, jotka perustuivat maastossa tehtyihin havaintoihin neulasten tiheysjakaumasta. Neulastiheyden oletettiin olevan matala lähellä puun runkoa, kasvavan ulospäin mentäessä ja laskevan jälleen kohti latvuksen reunaa. Samantapaisia funktioita on käyttänyt mm. Larsen (1997). Neulastiheyden oletettiin pienenevän latvasta alaspäin mentäessä. Samoin pienen neulastiheyden vyöhykkeen lähellä runkoa oletettiin levenevän latvasta kohti latvuksen alarajaa (Baldwin ja Peterson 1997). Neulastiheysfunktioiden parametreille annettiin arvoja siten, että häviöt (T_{beer}) pysyivät välillä 0–0,7.

Muut käytetyt leikkausgeometriaa kuvaavat muuttujat olivat häviöluokka (hl) sekä pulssin suhteellinen etäisyys lähimpään ylemmän latvuserroksen puun runkoon (dh). Tämä laskettiin jakamalla pienin vaakaetäisyys ylemmän latvuserroksen puun runkoon puun pituudella. Muuttujat hl ja dh kuvaavat, kuinka läheltä ylemmän latvuserroksen puun runkoa pulssi on kulkenut, kun taas T_{beer} ottaa huomioon tarkemmin pulssin energiaa sammuttavan lehvästömässän jakaumaa pulssin kulkureitillä.

Mallien 1–5 parametrien ratkaisemista varten tehtiin tietokoneohjelma, joka etsii parhaat parametrit minimoimalla intensiteettien yhdistettyä variaatiokerrointa (CV_{pooled}). Ohjelma etsii ensin satunnaisesti arvotuista parametriyhdistelmistä parhaan, minkä jälkeen etsintää tihennetään parhaiden parametrien läheisyydessä. Laskenta toistettiin useita kertoja, ja parhaiden parametrien arvot olivat aina samat. Alkuarvot eivät siis vaikuttaneet tuloksiin. Mallissa 3 käytetylle neulastiheysfunktiolle kokeiltiin 768 eri parametriyhdistelmää ja näistä valittiin paras. Kaikilla kokeilluilla parametriyhdistelmillä saatiin kuitenkin kohtalaisen yhteneviä tuloksia, joten neulastiheysfunktion parametreilla ei ollut merkittävää vaikutusta lopullisiin tuloksiin.

2.3.7 Kaiun muodostumisen todennäköisyys

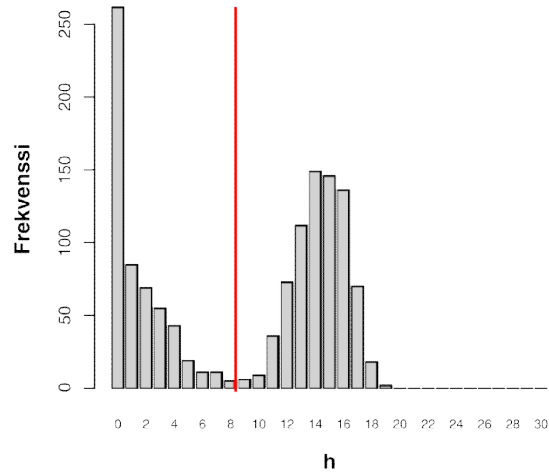
Todennäköisyyttä saada kaiku pulsseista, jotka olivat leikanneet puiden mallinnettuja latvuk-
sia, tutkittiin logistisella regressiolla. Logistinen regressio mallintaa tapahtuman i logit-
muunnettua todennäköisyyttä lineaarisella regressiolla (Yhtälö 12).

$$\log \text{it}(p_i) = \ln\left(\frac{p_i}{1 - p_i}\right) = b_0 + b_1 \cdot x \quad (12)$$

Selittävinä muuttujina x käytettiin sekä jatkuvia (mm. puun pituus) että diskreettejä muuttujia
(mm. puulaji). Muuttujien vaikutusta tutkittiin yksi muuttuja kerrallaan. Tuloksissa (Liite 2)
on esitetty kerroin b_1 ja p -arvo kullekin testatulle muuttujalle. Lisäksi esitetään ristitulosuhde
eli *odds ratio* (OR) ja 95 % luottamusväli tälle. Ristitulosuhde kertoo, kuinka paljon tapahtu-
man todennäköisyys muuttuu suhteessa alkuperäiseen todennäköisyyteen, kun selittävän
muuttujan arvo kasvaa yhden yksikön. Jos OR on alle 1, selittävän muuttujan kasvattaminen
vähentää tapahtuman todennäköisyyttä, jos OR on yli 1, selittävän muuttujan kasvattaminen
lisää todennäköisyyttä.

2.4 Aluepohjaiset laserpiirteet

Aluepohjaisten laserpiirteiden laskentaa varten koealat jaettiin 10×10 m ruutuihin (66 kpl).
Alikasvoksen ylärajaksi määriteltiin PPA:lla painotettu keskimääräinen latvuksen alaraja
(HC) puista, joiden pituus on yli 50 % valtapituudesta. Tämä vastasi hyvin alinta frekvenssiä
laserkaikujen korkeusjakaumassa useimmilla ruuduilla (Kuva 12).



Kuva 12. Laserkaikujen korkeusjakauma yhdellä koeruuduista. Punainen pystyviiva osoittaa ylemmän latvuserroksen PPA:lla painotetun keskimääräisen latvusrajan.

Jokaiselle koeruudulle laskettiin peruspuustotunnukset, joita olivat ylemmälle latvuserrokselle pohjapinta-ala (PPA), runkotilavuus (V), runkoluku (S) sekä PPA:lla painotettu keskilämpimitta (D) ja keskipituus (H), sekä alikasvokselle runkoluku, keskipituus ja lehtipuiden osuus runkoluvusta (BL_prop). Alikasvoksen tunnukset laskettiin erikseen kaikille alikasvospuille, puille joiden $h > 0,5$ m sekä puille, joiden $h > 1,0$.

Kaiut HC:n alapuolelta erotettiin muusta aineistosta, ja näistä laskettiin yleisesti käytettyjä korkeusjakaumapiirteitä (Naasset 2002, Naasset 2004a). Lisäksi laskettiin intensiteetti- ja lehtipuu- osuutta, joita on käytetty aiemmin Korpelan ym. (2009) tutkimuksessa. Intensiteetti- ja lehtipuu- osuudet laskettiin erikseen yksittäisille/ensimmäisille kaiuille, 2. kaiuille sekä häviökorjatuille 2. kaiuille. Käytetyt laserpiirteet on esitetty taulukossa 8. Piirteiden laskentaa varten jaettiin kaiut maa- ja puuosumiin. Maa- ja puuosumien erottamiseksi kokeiltiin rajoja välillä 0,1–0,5 m.

Taulukko 8. Käytetyt aluepohjaiset laserpiirteet ja niiden kuvaus. Piirteet on laskettu kaiuista, joiden korkeus maanpinnasta on pienempi kuin alikasvoksen yläraja (HC).

Korkeusjakaumapiirteet	
<i>prg</i>	Maaosumien osuus, %
<i>hmean</i>	Keskimääräinen korkeus, puuosumat, m
<i>hcv</i>	Variaatiokerroin, puuosumat, m
<i>hd1–10</i>	Korkeusjakauman desiilit, puuosumat, m
<i>hq1–10</i>	Korkeusjakauman desiilit, puuosumat, %
<i>p0–9</i>	Tietyn suhteellisen korkeuden (0–90 %) yläpuolelta saatujen kaikujen osuus kaikujen kokonaismäärästä (<i>proportional canopy densities</i>), %.
<i>pm05, pm10, pm15, pm20</i>	Tietyn korkeuden (0,5; 1,0; 1,5 tai 2,0 m) yläpuolelta saatujen kaikujen osuus kaikujen kokonaismäärästä, %
Intensiteetti-<i>piirteet, erikseen yksittäisille/ensimmäisille kaiuille (etäisyys/AGC -korjattu), 2. kaiuille (etäisyys/AGC -korjattu) ja 2. kaiuille (häviökorjattu)</i>	
<i>imean</i>	Intensiteetin keskiarvo, puuosumat
<i>icv</i>	Intensiteetin variaatiokerroin, puuosumat
<i>id1–10</i>	Intensiteettijakauman desiilit, puuosumat
<i>iqrt1–4</i>	Intensiteetin keskiarvo korkeusjakauman kvartiileissa, puuosumat

Aluepohjaisten laserpiirteiden selitysvoimaa alikasvoksen puustotunnusten ennustamisessa testattiin yksi muuttuja kerrallaan lineaarisella regressiolla. Regressiomalleista kokeiltiin kah- ta versiota. Ensimmäisessä selittävä muuttuja on otettu malliin sellaisenaan, ja toisessa versi- ossa muuttujaan tehtiin logaritminmuunnos. Analyysit tehtiin erikseen molemmille koaloille (36 ruutua koalalla A ja 30 ruutua koalalla B), koska koalojen puustot poikkesivat raken- teeltaan ja ominaisuuksiltaan toisistaan.

3 Tulokset

3.1 Alikasvospuista saadun näytteen edustavuus

Alikasvospuista saatiin suuren pulssitiheyden keilauksissa (ALTM_06_1km ja ALS_07_1km keilaukset) hyvin näytteitä. Laserpulsseja osui yli 88 % puista. Pienemmällä pulssitiheyksillä (ALS_08_1km ja ALS_08_2km) osuman saaneiden puiden osuus pieneni ollen 57,3–66,4 %. Niissä puissa, jotka saivat laserosuman, osumien lukumäärä puuta kohti oli 2,2–14,2, ja kaikuja saatiin keskimäärin noin 50 %:sta pulsseja, mikä johti 1,1–6,7 kaikuun puuta kohti. Yksi kaiku on kuitenkin voitu yhdistää useampaan kuin yhteen puuhun, joten todellinen kaikumäärä puuta kohti on jonkin verran alhaisempi. Osumien tai kaikujen lukumäärä vaihtelee huomattavasti puun koon mukaan.

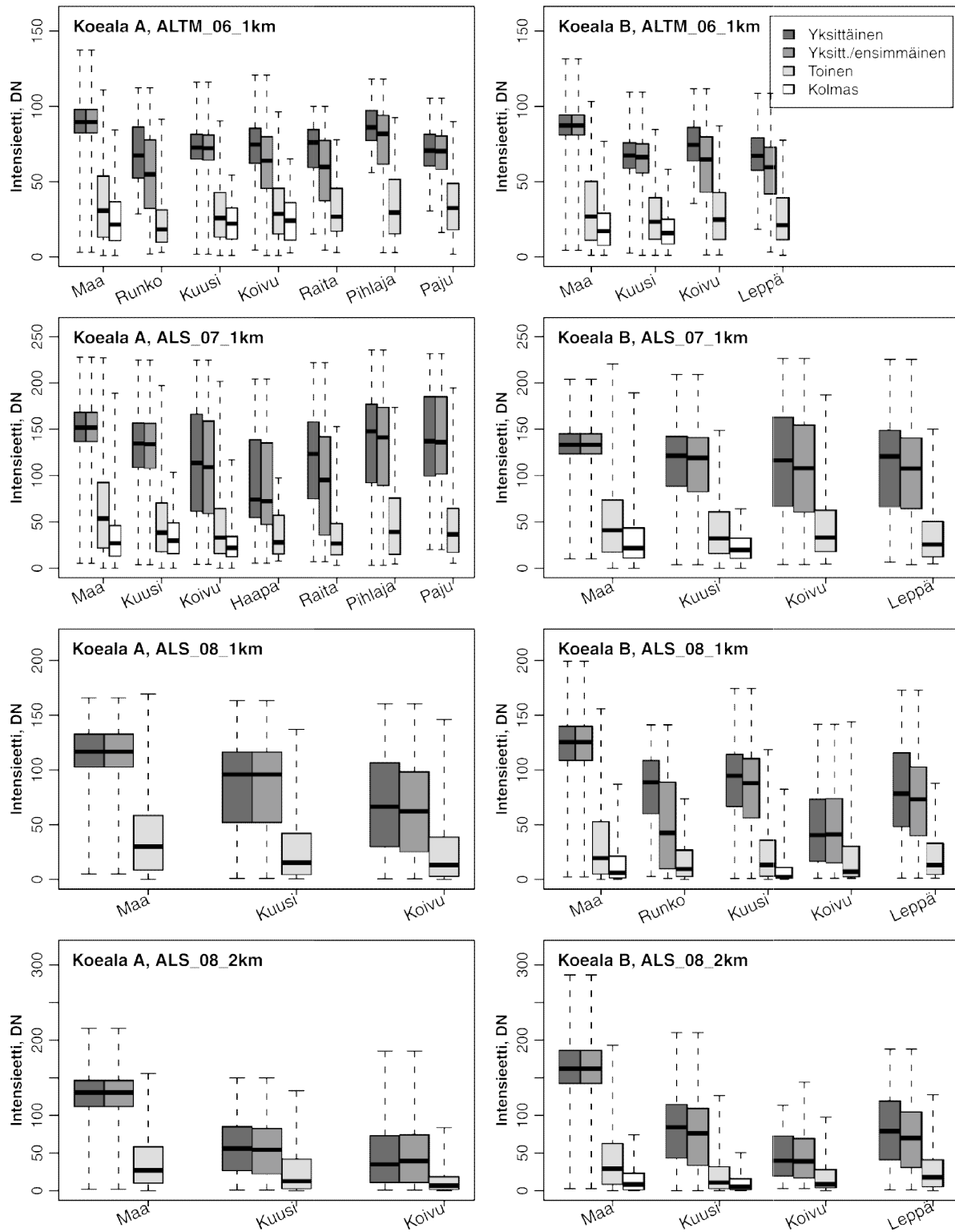
Taulukko 9. Osuman saaneiden puiden osuus sekä osumien ja kaikujen lukumäärä keskimäärin puuta kohti alikasvospuilla ($h_{rel} < 0,5$ m).

	Pulssitiheys, pulssia m ⁻²	Puita, kpl	Osuman saaneita, kpl	Osuman saaneita, %	Osumia/ puu	Kaikuja/ puu
Koala A						
ALTM_06_1km	9,7	1885	1822	96,7	14,2	6,7
ALS_07_1km	6,3	1885	1716	91,0	8,5	4,6
ALS_08_1km	2,1	1885	1378	73,1	3,4	2,0
ALS_08_2km	0,9	1885	1081	57,3	2,2	1,1
Koala B						
ALTM_06_1km	5,7	1839	1703	92,6	9,0	5,2
ALS_07_1km	6,1	1839	1630	88,6	8,6	5,3
ALS_08_1km	4,9	1839	1421	77,3	7,9	4,9
ALS_08_2km	2,3	1839	1221	66,4	5,2	3,1

3.2 Laserkaiun intensiteetti alikasvoksessa

3.2.1 Intensiteetti puulajin tulkinnassa

Laserkaiujen etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti alikasvoksessa ei eronnut suurimmassa osassa keilauksia ja koealoja merkittävästi eri puulajien välillä (Kuva 13). Erot olivat pieniä jo yksittäisillä ja yksittäisillä/ensimmäisillä kaiuilla, ja 2. ja 3. kaiuilla ne edelleen pienenevät seurauksena pulssin energiahäviöistä aiheutuvasta kohinasta. Erot olivat myös erisuuntaisia eri keilauksissa. Esimerkiksi yksittäisillä kaiuilla koivu tuotti kuusta suurempia intensiteettejä ALTM_06_1km, yhtä suuria ALS_07_1km ja pienempiä ALS_08_1km ja ALS_08_2km aineistossa. Yhden keilausaineiston sisällä puulajien väliset erot olivat samansuuntaisia molemmilla tutkimuskoealoilla, mutta intensiteettien erot samalla puulajilla koealojen välillä olivat yhtä suuria tai suurempia kuin puulajien väliset intensiteettierot. Maa tuotti korkeampia ja isojen puiden rungot hieman alempia intensiteettejä kuin alikasvospuut. Pihlaja tuotti hieman korkeampia intensiteettejä kuin muut alikasvospuut. Puulajin sisäinen hajonta oli lehtipuilla selvästi suurempaa kuin kuusella. Maaosumilla hajonta oli kaikkein pienin.



Kuva 13. Laserkaikujen etäisyys/AGC -korjatun intensiteetin keskiarvo eri kohteissa. Vain kohteet, joista saatiin vähintään 30 kaikua, on huomioitu. Laatikot edustavat jakauman 1. ja 3. kvartiileja ja viivat ääriarvoja.

3.2.2 Etäisyys/AGC -korjauksen vaikutus

Intensiteetin variaatiokerroin (CV_{pooled}) oli pienin alikasvoksesta saaduilla yksittäisillä ja yksittäisillä/ensimmäisillä kaiuilla (Taulukko 10). Variaatiokerroin oli 2. kaiuilla noin 2–3-kertainen yksittäisiin/ensimmäisiin kaiuihin verrattuna, ja 3. kaiulla se edelleen kasvoi. ALS50 -keilaimella hajonnat olivat korkeampia kuin ALTM3100 -keilaimella. Myös lentokorkeus vaikutti hajontoihin, sillä 2 km lentokorkeudella hajonnat olivat korkeampia kuin 1 km korkeudella. ALS50 -keilaimella 1 km korkeudesta tehdyistä keilauksista (ALS_07_1km ja ALS_08_1km) variaatiokertoimet olivat suurempia ALS_08_1km aineistossa, erityisesti koealalla B. Etäisyys/AGC -korjaus pienensi alikasvoksesta/maasta saatujen kaikujen yhdistettyä variaatiokerrointa kaikilla muilla paitsi koealalla A ALS_08_1km ja ALS_08_2km keilauksissa (Taulukko 10). Myös luokitustarkkuus maan ja yleisimmän puulajin välillä sekä kappa-arvo paranivat yksittäisillä/ensimmäisillä kaiuilla, mutta toisilla ja kolmansilla kaiuilla vaikutus vaihteli keilauksesta ja koealasta toiseen (Taulukko 11, Taulukko 12).

Taulukko 10. Etäisyys/AGC -korjauksen vaikutus alikasvospuista/maasta saatujen kaikujen intensiteettien yhdistettyyn variaatiokertoimeen (CV_{pooled}).

Keilaus	Koeala	Yksittäinen		Yksittäinen/ ensimmäinen		Toinen		Kolmas	
		I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}
ALTM_06_1km	A	0,170	0,166	0,225	0,222	0,681	0,679	0,694	0,693
ALTM_06_1km	B	0,191	0,169	0,238	0,221	0,720	0,714	0,758	0,750
ALS_07_1km	A	0,285	0,276	0,312	0,304	0,776	0,769	0,844	0,844
ALS_07_1km	B	0,302	0,283	0,327	0,310	0,759	0,744	0,833	0,831
ALS_08_1km	A	0,315	0,331	0,345	0,360	0,928	0,935	1,255	1,308
ALS_08_1km	B	0,395	0,370	0,456	0,432	1,074	1,057	1,461	1,431
ALS_08_2km	A	0,449	0,452	0,490	0,492	0,984	0,986	1,340	1,328
ALS_08_2km	B	0,479	0,479	0,540	0,540	1,050	1,049	1,185	1,180

Taulukko 11. Etäisyys/AGC -korjauksen vaikutus oikeinluokitusprosenttiin luokitettaessa maa vs. yleisin puulaji.

Keilaus	Koeala	Yksittäinen		Yksittäinen/ ensimmäinen		Toinen		Kolmas	
		I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}
ALTM_06_1km	A	71,8	74,6	82,5	83,9	48,8	49,2	44,1	44,1
ALTM_06_1km	B	75,8	81,6	76,8	82,0	51,9	52,1	49,7	48,6
ALS_07_1km	A	71,9	74,6	73,1	75,7	55,5	54,9	49,2	49,2
ALS_07_1km	B	57,0	62,5	58,4	64,0	52,6	52,8	48,3	51,7
ALS_08_1km	A	85,3	83,1	85,6	83,2	54,2	54,2	47,4	47,4
ALS_08_1km	B	66,8	69,5	68,7	71,4	56,7	56,9	58,8	58,8
ALS_08_2km	A	90,4	90,4	89,6	89,4	60,9	60,6	52,9	51,5
ALS_08_2km	B	82,8	83,0	84,5	84,5	62,7	62,6	53,2	53,8

Taulukko 12. Etäisyys/AGC -korjauksen vaikutus kappa-arvoon luokitettaessa maa vs. yleisin puulaji.

Keilaus	Koeala	Yksittäinen		Yksittäinen/ ensimmäinen		Toinen		Kolmas	
		I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}	I _{raaka}	I _{corr}
2006_1km Plot A	A	0,31	0,36	0,56	0,59	0,03	0,03	-0,03	-0,02
2006_1km Plot B	B	0,52	0,63	0,54	0,64	0,06	0,07	0,04	0,02
2007_1km Plot A	A	0,32	0,36	0,39	0,44	0,15	0,13	0,07	0,09
2007_1km Plot B	B	0,15	0,26	0,18	0,3	0,07	0,08	0,03	0,08
2008_1km Plot A	A	0,6	0,56	0,65	0,6	0,13	0,13	0,1	0,1
2008_1km Plot B	B	0,33	0,39	0,36	0,42	0,1	0,11	0,18	0,18
2008_2km Plot A	A	0,76	0,76	0,78	0,77	0,26	0,25	0,17	0,16
2008_2km Plot B	B	0,65	0,65	0,67	0,67	0,24	0,23	0,08	0,09

3.2.3 Energiahäviöiden korjauksen vaikutus intensiteettiin

Alikasvoskerroksesta (maa/alikasvospuut) havaittuja intensiteettejä kompensoitiin pulssin energiahäviöillä ALTM_06_1km ja ALS_07_1km keilauksissa. Häviöiden kompensointi vähensi selvästi kohteen sisäistä intensiteetin hajontaa (Taulukko 13). Hyvään tulokseen päästiin jo malleilla, joissa käytettiin pelkästään aikaisempien kaikujen intensiteettejä (mallit 1 ja 2). Lineaarisen (malli 1) ja epälineaarisen (malli 2) version välillä ei ollut suurta eroa. Pulssin leikkausgeometrian huomioiminen (mallit 3–5) paransi tuloksia jonkin verran, mutta parannus ei ollut suuri. Lambert-Beerin lakiin perustuva malli (3) ei ollut juurikaan parempi kuin mallit, joissa oletettiin häviöiden olevan riippuvaisia siitä, kuinka syvältä (läheltä runkoa) ylemmän latvuskerroksen puun latvuksessa pulssi oli kulkenut. Kolmansille kaiuille kokeiltiin pel-

kästään aikaisempien kaikujen intensiteettiin perustuvia malleja. Nämä mallit toimivat myös 3. kaiuille.

Taulukko 13. Energiahäviöiden kompensoinnin vaikutus alikasvospuista/maasta saatujen kaikujen intensiteettien yhdistettyyn variaatiokertoimeen (CV_{pooled}). I_{corr} on etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti. Numero ilmoittaa käytetyn häviöiden korjausmallin.

Keilaus	Koeala	2. kaiku					3. kaiku			
		I_{corr}	1	2	3	4	5	I_{corr}	1	2
ALTM_06_1km	A	0,679	0,495	0,487	0,458	0,457	0,469	0,693	0,468	0,456
ALTM_06_1km	B	0,714	0,524	0,513	0,490	0,484	0,494	0,750	0,499	0,487
ALS_07_1km	A	0,769	0,609	0,607	0,580	0,586	0,592	0,844	0,740	0,733
ALS_07_1km	B	0,744	0,576	0,576	0,558	0,556	0,562	0,831	0,712	0,702

Häviöiden kompensoinnissa käytettyjen mallien parametrit saivat samanlaisia arvoja yhden keilauksen sisällä aikaisempien kaikujen intensiteetin (kerroin m_1) osalta (Taulukko 14). Geometriatermin (m_2) kertoimet puolestaan eivät vaihdelleet samalla koealalla keilausten välillä. Ne kuvaavat enemmän koealan puuston rakennetta. Puulajikohtaiset variaatiokertoimen minimiit saavutettiin parametreilla, jotka olivat lähellä yhdistettyä variaatiokerrointa minimoimalla saatuja parametreja, mikä kertoo, että mallit ovat fysikaalisesti perusteltuja. Aikaisemman kaiun potenssitermi (parametri b_1) oli selvästi suurempi ALTM_06_1km keilauksessa kuin ALS_07_1km keilauksessa. Aikaisemman kaiun intensiteetti ei siis ollut täysin lineaarinen energiahäviöiden mitta ALTM3100 -keilaimella.

Taulukko 14. Energiahäviöiden kompensoinnissa käytettyjen mallien parametrit.

	b_0	b_1	c_0	c_1	b_0	b_1	c_0	c_1
	ALTM_06_1km, koeala A				ALTM_06_1km, koeala B			
2. kaiut, malli 1	0,0826	-	-	-	0,0748	-	-	-
2. kaiut, malli 2	0,0102	1,4778	-	-	0,0047	1,6386	-	-
2. kaiut, malli 3	0,0057	1,6175	1,3448	0,3747	0,0030	1,7646	0,6287	0,1907
2. kaiut, malli 4	0,0054	1,6390	9,7729	-	0,0022	1,8425	13,8512	-
2. kaiut, malli 5	0,0060	1,6207	0,3912	-	0,0028	1,7803	0,3061	-
3. kaiut, malli 1	0,0609	-	-	-	0,0988	-	-	-
3. kaiut, malli 2	0,0092	1,3985	-	-	0,0359	1,2205	-	-
	ALS_07_1km, koeala A				ALS_07_1km, koeala B			
2. kaiut, malli 1	0,0428	-	-	-	0,0420	-	-	-
2. kaiut, malli 2	0,0143	1,2068	-	-	0,0220	1,1193	-	-
2. kaiut, malli 3	0,0068	1,3570	2,1218	0,5773	0,0129	1,2358	0,5487	0,2325
2. kaiut, malli 4	0,0071	1,3562	11,8400	-	0,0124	1,2477	16,9175	-
2. kaiut, malli 5	0,0072	1,3592	0,3524	-	0,0123	1,2452	0,2677	-
3. kaiut, malli 1	0,0155	-	-	-	0,0220	-	-	-
3. kaiut, malli 2	0,0061	1,1958	-	-	0,0014	1,5055	-	-

Energiahäviöillä kompensoituille intensiteeteille tehtiin luokitus diskriminanttiallyysillä. Luokittelu tehtiin maan ja yleisimmän puulajin välillä. Luokitustarkkuus (oikeinluokitusprosentti) ja kappa-arvo paranivat selvästi kompensoinnin jälkeen kummallakin keilauksella ja koealalla (Taulukko 15), mutta luokituksessa ei kuitenkaan päästy yhtä hyvään tarkkuuteen kuin käytettäessä yksittäisiä/ensimmäisiä kaikuja (Taulukko 11, Taulukko 12).

Taulukko 15. Luokitustarkkuus ja kappa-arvo ennen energiahäviöiden korjausta ja korjauksen jälkeen tehtäessä luokitus maan ja yleisimmän puulajin välillä 2. ja 3. kaikujen intensiteetin perusteella.

Koeala	Indikaattori	2. kaiku					3. kaiku			
		I_{corr}	1	2	3	4	5	I_{corr}	1	2
ALTM_06_1km										
A	Luokitustarkkuus, %	49,2	55,7	56,8	57,3	57,5	56,6	44,1	52,6	54,1
	Kappa	0,03	0,07	0,08	0,10	0,10	0,09	-0,02	0,03	0,06
B	Luokitustarkkuus, %	52,1	58,9	60,2	61,1	61,5	60,9	48,6	57,6	57,3
	Kappa	0,07	0,17	0,19	0,21	0,22	0,21	0,02	0,14	0,14
ALS_07_1km										
A	Luokitustarkkuus, %	54,9	60,6	60,8	62,0	61,7	61,3	49,2	52,8	53,1
	Kappa	0,13	0,20	0,20	0,22	0,22	0,21	0,09	0,12	0,12
B	Luokitustarkkuus, %	52,8	57,9	58,0	58,2	58,3	57,9	51,7	53,2	53,9
	Kappa	0,08	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,08	0,10	0,11

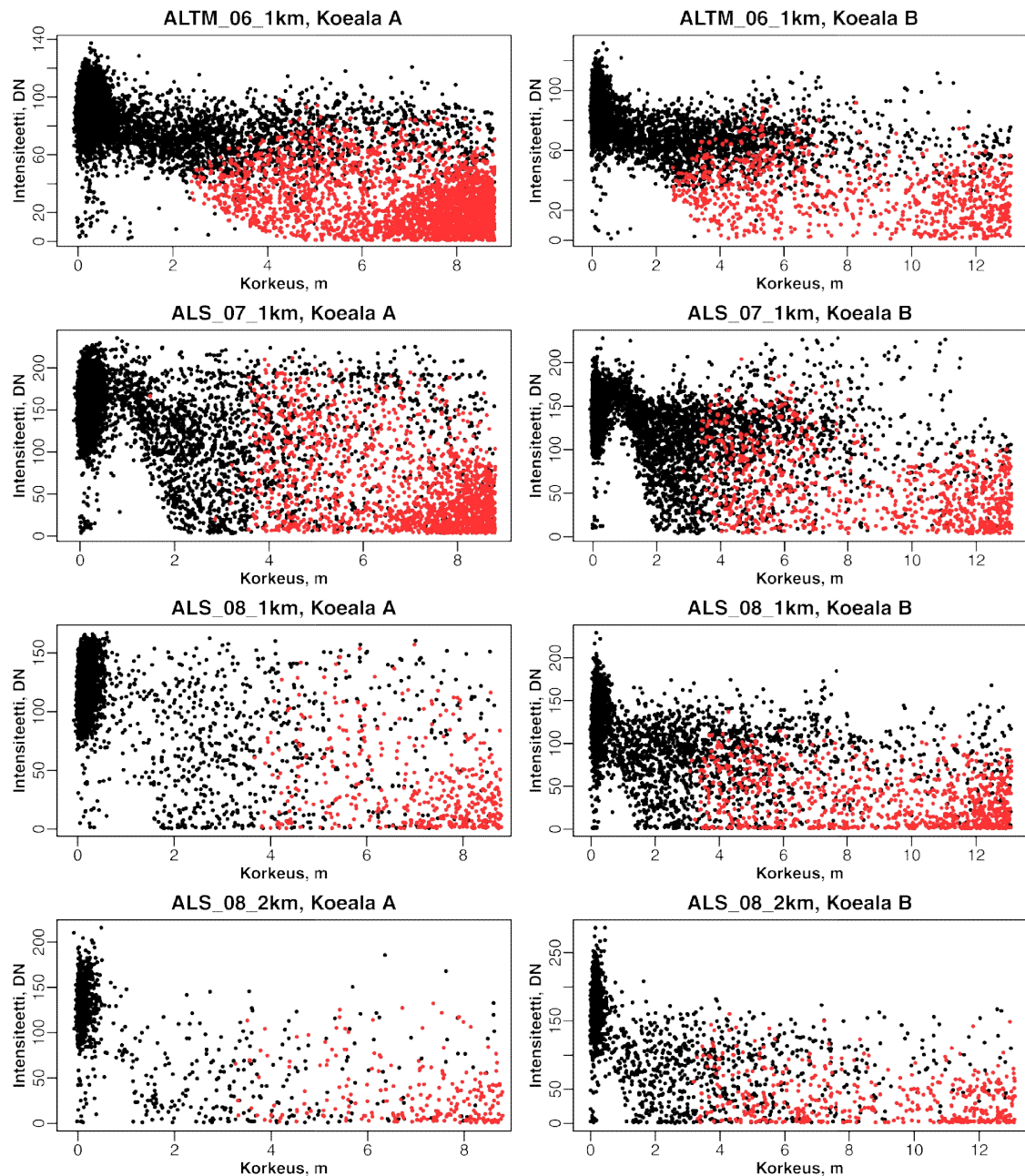
3.2.4 Muut intensiteettiin vaikuttavat tekijät

Muiden tekijöiden kuin energiahäviöiden ja puulajin vaikutusta intensiteettiin alikasvopuista saaduilla kaiuilla tutkittiin sovittamalla aineistoon yhden selittävän muuttujan regressiomallit. Mallit laadittiin erikseen yksittäisille, yksittäisille/ensimmäisille ja energiahäviöillä korjatuille 2. kaiuille. Selitysasteet 2. kaiuille olivat yleisesti heikkoja (maksimissaan 0,03). Sen sijaan yksittäisillä ja yksittäisillä/ensimmäisillä kaiuilla joitakin vaikutuksia löytyi. Kaiun intensiteetti pieneni kaiun korkeuden funktiona yksittäisillä/ensimmäisillä kaiuilla ($R^2 = 0,001-0,123$), mikä selittyy sillä, että ensimmäisten kaikujen osuus kasvaa ylöspäin mentäessä. Ensimmäisillä kaiuilla intensiteetti on keskimäärin pienempi kuin yksittäisillä kaiuilla. Alikasvospuuston tiheys kaiun ympärillä (0,5; 1,0 tai 2,0 m säteisellä koealalla) vaikutti intensiteettiin ($R^2 = 0,000-0,096$) suurimmalla osalla koealoista ja keilauksista. Kaiun vaakasuora etäisyys puun rungosta suhteutettuna puun latvusleveyteen vaikutti intensiteettiin joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta ($R^2 = 0,002-0,112$). Kun kaiun etäisyys rungosta kasvoi, intensiteetti pieneni. Tämä on loogista, koska latvuksen reunoilla heijastavaa lehvästömassaa on vähemmän kuin keskiosissa. Pulssin leikkaustilavuus ($R^2 = 0,000-0,097$) ja leikkausmatka ($R^2 = 0,000-0,087$) alikasvospuun latvuksen kanssa vaikuttivat intensiteettiin joissakin keilauksissa ja osalla koealoista. Leikkaustilavuuden/-matkan kasvaessa intensiteetti pieneni. Muita testattuja muuttujia olivat skannauskulma, sensorin etäisyys kohteeseen sekä kaiun suhteellinen pystyetäisyys puun latvasta. Näiden vaikutukset intensiteettiin olivat pieniä ($R^2 < 0,03$).

Maan läheisyyden vaikutusta intensiteettiin selvitettiin tarkemmin tutkimalla alikasvoskerroksesta saatuja yksittäisiä ja ensimmäisiä kaikuja, joilla häviöt ylempiin latvuserroksiin ovat pieniä eivätkä siten sekoita tarkastelua. Yksittäisillä kaiuilla maan läheisyydestä (< 2 m) ei saatu lainkaan alhaisia intensiteettejä, ja intensiteetti maan läheltä oli keskimäärin korkeampi kuin puustosta (Kuva 14). ALS_07_1km aineistossa maan intensiteetti oli matalampi kuin intensiteetti kaiuissa 0,5–1,5 m korkeudella. Korkeuksilta 1,5–2 m ylöspäin intensiteetti pysyi vakaana. Käytetyt sensorit eroavat kaikujen intensiteetin perusteella toisistaan. ALTM3100 ei tuota yksittäisillä kaiuilla lainkaan alhaisia intensiteettejä, kun taas ALS50:llä alhaisia intensiteettejä saadaan 2 m korkeudelta ylöspäin.

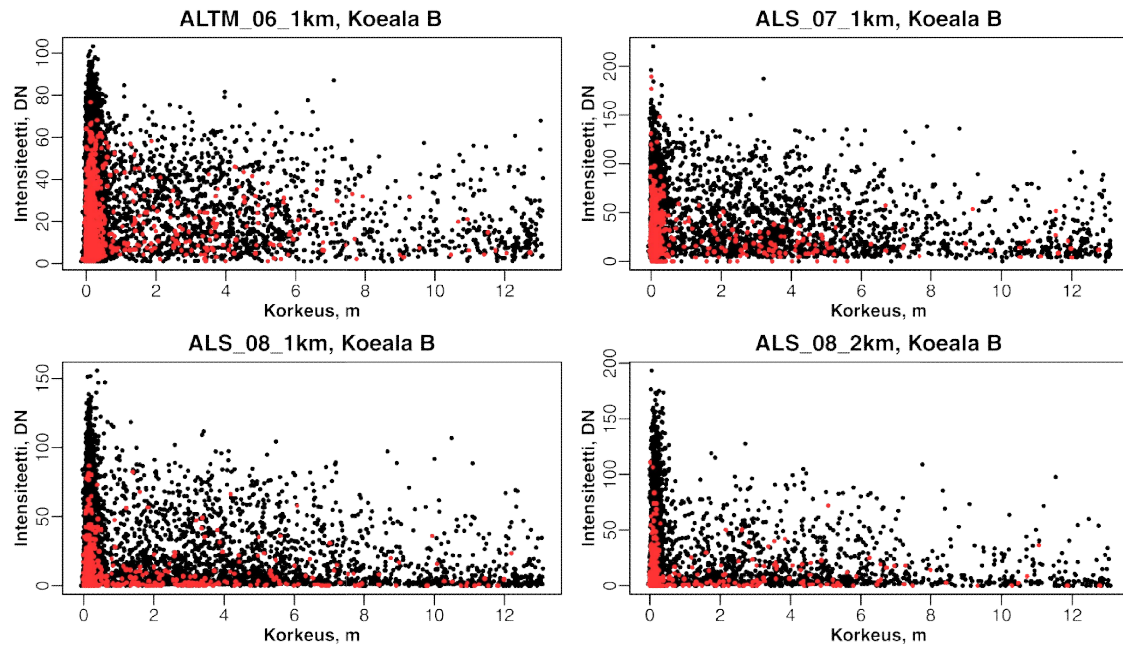
Sensorit eroavat myös ensimmäisten kaikujen osalta. ALTM3100 tuottaa ensimmäisiä kaikuja 2 m korkeudelta ylöspäin, kun taas ALS50 vasta n. 3,5 m korkeudelta. Ensimmäisillä kaiuilla ALTM3100 ei tuota alhaisia intensiteettejä alle 4 m korkeudelta, ALS50 sen sijaan tuottaa

kaikilta korkeuksilta, joilta ensimmäisiä kaikuja on saatu. Ensimmäisten kaikujen osuus suhteessa yksittäisiin kasvaa korkeuden kasvaessa. Verrattaessa ALS_08_1km ja ALS_08_2km aineistoja huomataan, että lentokorkeuden kasvattaminen lisää eroa maa- ja puukaikujen intensiteettien välillä (Kuva 14).



Kuva 14. Etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti korkeuden funktiona tutkimuskoealoilla eri keilauksissa. Musta = yksittäinen kaiku, punainen = ensimmäinen monista kaiuista.

Toisilla ja kolmansilla kaiuilla intensiteetti oli yksittäisten/ensimmäisten tapaan korkein maanpinnan läheisyydessä, mutta näillä havaittiin myös matalia intensiteettejä lähellä maata (Kuva 15). Keskimääräinen intensiteetti näissä kaikuluokissa laskee korkeuden kasvaessa koko alikasvoskerroksessa.



Kuva 15. Etäisyys/AGC -korjattu intensiteetti korkeuden funktiona tutkimuskoealoilla eri keilauksissa. Musta = 2. kaiku, punainen = 3. kaiku.

3.3 Kaiun muodostumisen todennäköisyys

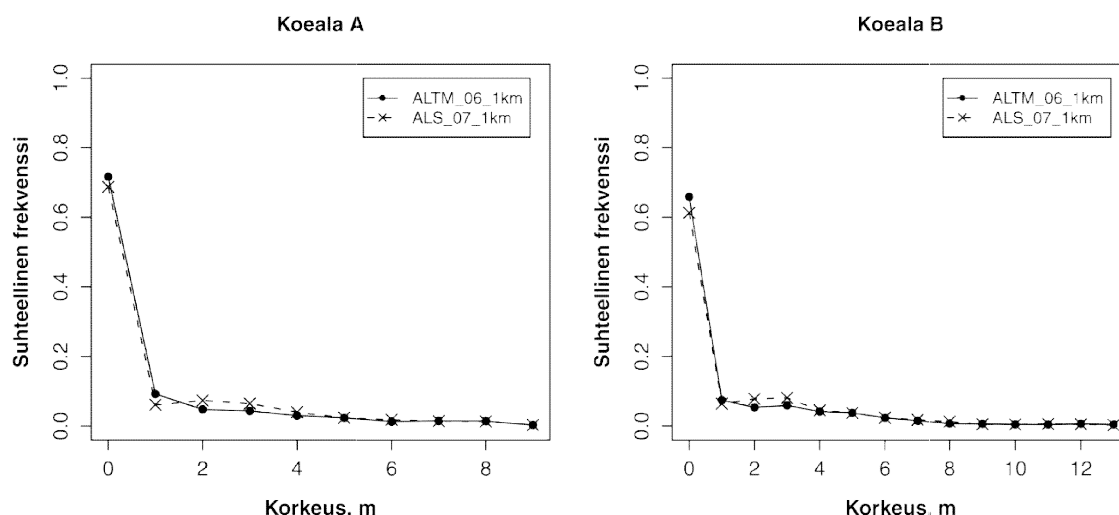
Kaiun muodostumisen todennäköisyyttä ja siihen vaikuttavia tekijöitä alikasvospuilla selvitetiin tarkastelemalla pulsseja, jotka olivat leikanneet mallinnetun latvusobjektin. Vain ne puulajit, joihin oli osunut vähintään 30 pulssia, otettiin mukaan tarkasteluun. Neljä kaikua tuottaneet pulssit jätettiin pois niiden vähäisen lukumäärän takia.

Pulsseilla, joista oli saatu aiempi kaiku ennen leikkausta, kaiun tuottaneiden pulssien osuus (kaiun todennäköisyys) oli pienempi kuin pulsseilla, joilla aikaisempia kaikuja ei ollut (Taulukko 16). Kuusi tuotti kaiun keskimäärin hieman useammin kuin lehtipuut. Lisäksi kuusella kaiun todennäköisyys ei laskenut yhtä voimakkaasti kuin lehtipuilla, jos pulssista oli saatu aikaisempia kaikuja. Kaiun todennäköisyys oli suurempi ALS50 kuin ALTM3100 aineistossa. Vaikka tuloksissa ei esitetä hajontalukuja, keskiarvot ovat keilausten välisissä ver-

tailuissa luotettavia, koska havaintojen lukumäärä on suuri (useita tuhansia pulsseja keilausta kohti). Eron kaiun todennäköisyydessä havaittiin vaikuttavan laserkaikujen korkeusjakamaan alikasvoskerroksessa. ALTM3100:lla suhteelliset korkeusjakauman frekvenssit 2–4 m korkeudelta olivat alempia kuin ALS50:lla osoittaen, että ALTM3100:lla suurempi osa pulseista tunkeutui alikasvospuiden latvusten läpi maahan (Kuva 16). Erot olivat kuitenkin pieniä. Niitä ei testattu tilastollisesti.

Taulukko 16. Kaiun tuottaneiden pulssien osuus (%) pulsseilla, jotka ovat leikanneet alikasvospuun latvuksen. Todennäköisyydet on laskettu erikseen pulsseille, joista ei ole saatu aikaisempia kaikuja ennen leikkausta (ei energiahäviöitä) ja pulsseille, joilla aikaisempia kaikuja on.

		Aikaisempi kaiku	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa	Leppä	Raita	Pihlaja	Paju	Kaikki
Koela A											
ALTM_06_1km	ei		71	57	18	-	57	24	39	56	
	on		70	33	15	-	34	24	24	41	
ALS_07_1km	ei		69	65	29	-	65	38	46	63	
	on		63	44	22	-	51	30	29	46	
ALS_08_1km	ei		78	71	-	-	-	39	52	69	
	on		67	46	-	-	-	42	32	50	
ALS_08_2km	ei		67	66	-	-	-	-	-	63	
	on		60	41	-	-	-	-	-	44	
Koela B											
ALTM_06_1km	ei	15	61	61	-	63	-	-	-	-	58
	on	16	60	40	-	41	-	-	-	-	54
ALS_07_1km	ei		67	68	-	70	-	-	-	-	64
	on		59	46	-	49	-	-	-	-	54
ALS_08_1km	ei	26	68	51	-	74	-	-	-	-	65
	on	18	62	44	-	59	-	-	-	-	58
ALS_08_2km	ei		67	48	-	-	-	-	-	-	64
	on		62	41	-	-	-	-	-	-	57



Kuva 16. Laserkaikujen korkeusjakauman suhteelliset frekvenssit ALTM_06_1km ja ALS_07_1km keilausissa alikasvoskerroksessa ($h_{rel} < 0,5$).

Pulssin ja leikatun puun ominaisuuksia verrattiin kaiun tuottaneiden ja kaikua tuottamattomien pulssien välillä (Taulukko 17). Tämän tarkastelun perusteella ainakin aikaisemman kaiun intensiteetti (pulsseilla, joilla havaittiin yksi aikaisempi kaiku ennen leikkausta puun latvuksen kanssa), pulssin minimietäisyys puun runkoon sekä puun pituus näyttäisivät vaikuttavan kaiun todennäköisyyteen.

Taulukko 17. Eri tekijöiden vaikutus kaiun muodostumisen todennäköisyyteen. Tulokset on laskettu jakamalla kaikki alikasvospuun latvuksen leikkaaneet pulssit kaiun tuottaneisiin ja kaikua tuottamattomiin ja vertaamalla tarkasteltavan muuttujan keskiarvoa näiden ryhmien välillä.

Kaiku alikasvospuusta	Aikaisemman kaiun intensiteetti (pulssit, joilla yksi aikaisempi kaiku)		Pulssin minimietäisyys puun runkoon (kaikki pulssit), m		Puun pituus (kaikki pulssit), m	
	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei
Koeala A						
ALTM_06_1km	27,8	30,4	0,59	0,74	4,58	4,17
ALS_07_1km	47,6	58,9	0,56	0,70	4,95	4,14
ALS_08_1km	34,0	40,0	0,62	0,74	4,97	4,12
ALS_08_2km	22,7	31,4	0,59	0,74	4,95	4,05
Koeala B						
ALTM_06_1km	29,7	31,9	0,66	0,88	5,23	4,57
ALS_07_1km	45,4	53,2	0,65	0,82	5,68	4,46
ALS_08_1km	32,5	36,0	0,55	0,80	5,64	5,43
ALS_08_2km	32,0	37,1	0,56	0,86	5,40	5,14

Kaiun muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseksi tarkemmin tutkittiin eri tekijöiden vaikutusta kaiun todennäköisyyteen logistisella regressiolla (Liite 2). Lähes kaikki tes-

tatut selittävät muuttujat olivat tilastollisesti merkitseviä, ja lisäksi vaikutukset olivat samansuuntaisia kaikilla koelajoilla ja kaikissa keilauksissa. Puulajin vaikutuksen testauksessa käytettiin kaiun todennäköisyyttä kuusella vertailutasona, johon muita puulajeja verrattiin. Lähes kaikki puulajit erosivat tilastollisesti merkitsevästi kuusesta, mutta erojen suuruus vaihteli. Koivu tuotti kaiun selvästi pienemmällä todennäköisyydellä kuin kuusi (OR = 0,31–0,84). Sen sijaan leppä tuotti kaiun lähes yhtä suurella todennäköisyydellä kuin kuusi (OR = 0,80–1,10). Mänty (OR = 0,06–0,29) ja haapa (OR = 0,07–0,18) tuottivat kaiun hyvin pienellä todennäköisyydellä, mutta tämä selittyy mäntyjen ja haapojen pienellä koolla, koska puun pituus vaikutti kaiun todennäköisyyteen (Taulukko 17). Pihlajalla kaiun todennäköisyys oli myös pienempi kuin kuusella (OR = 0,13–0,36), mutta pihlajat olivat niin ikään pienikokoisia. Myös pajulla kaiun todennäköisyys oli pieni. Katajalla todennäköisyydet sen sijaan olivat lähellä kuusta, mutta tulokset katajan osalta eivät olleet kaikissa keilauksissa tilastollisesti merkitseviä.

Tulokset pulssin ja puun latvuksen leikkausgeometrian vaikutuksesta ovat johdonmukaisia ja vahvistavat aiempia havaintoja geometrisen mallinnuksen tarkkuudesta. Pulssin puun pituuteen suhteutetun etäisyyden kasvaminen leikatun puun rungosta pienensi kaiun todennäköisyyttä, leikkaustilavuus ja leikkausmatka latvuksen sisässä puolestaan kasvattivat sitä. Jos pulssi leikkasi puuta koko pinta-alaltaan eli puun latvus täytti koko jalanjäljen, kaiun todennäköisyys oli suurempi kuin vajaassa leikkauksessa. Ylimmän leikkauskohdan suhteellinen etäisyys latvasta vaikutti myös. Mitä alemmas puun latvukseen pulssi oli osunut, sitä pienempi oli kaiun todennäköisyys. Tämä saattaa selittyä sillä, että lehvästö harvenee latvuksen alarajaa kohti. Toisaalta ylin leikkauskohta ja pulssin etäisyys rungosta ovat voimakkaasti korreloituneet. Jos ylin leikkaus on alhaalla latvuksessa, pulssin etäisyys rungosta ei voi olla pieni. Ylimmän leikkauskohdan korkeus maanpinnasta kasvatti myös kaiun todennäköisyyttä, mutta tämä taas korreloi voimakkaasti puun pituuden kanssa.

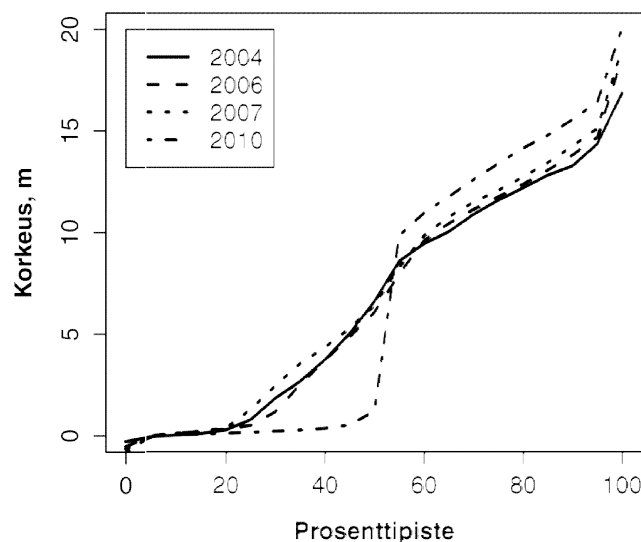
Myös keilausgeometriaan ja pulssin häviöihin liittyvät muuttujat selittivät kaiun todennäköisyyttä. Kun etäisyys sensorilta ylimpään leikkauskohtaan kasvoi, kaiun todennäköisyys pieneni (OR = 0,85–1,00). Niissäkin tapauksissa, joissa OR oli 1,00, regressiomallin kerroin b_1 oli negatiivinen. Havaittu säännönmukaisuus on yhdenmukainen sen havainnon kanssa, että 2 km korkeudelta lennettäessä kaiun todennäköisyys on pienempi kuin 1 km korkeudelta. Skannauskulma oli ainoa muuttuja, joka ei tilastollisesti merkitsevästi selittänyt kaiun todennäköisyyttä. Häviöiden vaikutusta testattaessa käytettiin vertailutasona pulseja, joissa ei ollut ai-

kaisempia kaikuja. Pulseilla, joilla oli yksi aikaisempi kaiku, kaiun todennäköisyys oli pienempi vertailutasoon verrattuna. Koealalla A vaikutus oli suurempi (OR = 0,51–0,55) kuin koealalla B (OR = 0,69–0,85). Ero voi selittyä lehtipuiden suuremmalla osuudella koealalla A. Vastaavat arvot pulseille, joista oli saatu kaksi aikaisempaa kaikua, olivat 0,14–0,34 koealalla A ja 0,51–0,79 koealalla B. Koealalla A aikaisempien kaikujen vaikutus oli suurempi ALS50 kuin ALTM3100 aineistossa, mutta koealalla B eroja sensoreiden välillä ei ollut. ALS_08_1km ja ALS_08_2km aineistoissa aikaisempien kaikujen vaikutus oli yhtä suuri, minkä perusteella voidaan tulkita, että lentokorkeus ei muuttanut häviöiden vaikutusta.

3.4 Aluepohjaiset laserpiirteet

3.4.1 Alikasvoksen täydellisen poiston vaikutus laserkaikujen korkeusjakaumaan

Mahdollisuuksia alikasvoksen aluepohjaiseen tulkintaan männiköissä selvitettiin ensin yksinkertaisella kokeella, jossa verrattiin laserkaikujen korkeusjakaumaa eri keilauksissa 20×20 m alueella, jolta alikasvos oli poistettu kokonaan kesällä 2009 ensiharvennusta varten tehdyssä ennakkoraivauksessa. Selkeä ero korkeusjakaumissa havaittiin ennen vuotta 2009 ja sen jälkeen tehtyjen keilausten välillä (Kuva 17).



Kuva 17. Alikasvoksen poiston vaikutus laserkaikujen korkeusjakaumaan. Alikasvos poistettiin kesällä 2009.

3.4.2 Runkoluvun ennustaminen

Selitetessä alikasvoksen runkolukua aluepohjaisilla laserpiirteillä huomattiin, että koealalla A runkoluvulle löytyi hyviä selittäjiä laserpiirteistä, mutta koealalla B mikään tutkituista piirteistä ei hyvin selittänyt runkolukua. Tähän todennäköinen syy on, että koealalla B oli paljon pieniä, ($h < 1$ m) kuusia. Jätettäessä $h < 0,5$ m puut pois tilanne parani hieman, mutta selitysasteet olivat edelleen matalia. Kun jätettiin $h < 1$ m puut pois, päästiin hyviin selitysasteisiin, joten runkoluvun, keskipituuden ja lehtipuuosuuden ennustaminen päätettiin tehdä yli 1 m puille.

Laserpiirteiden laskennassa kokeiltiin erilaisia rajoja maa- ja kasvillisuusosumien erottamiseksi. Rajan muuttaminen välillä 0,1–0,5 m vaikutti laserpiirteiden selitysvoimaan. Esimerkiksi 0,5 m rajaa käytettäessä maaosumien osuus selitti alikasvoksen tiheyttä hyvin, mutta rajan laskettaessa raja 0,1 m:iin selitysaste oli huomattavasti alhaisempi. Sen sijaan korkeusjakauman alimpien desiilien sekä keskikorkeuden ja korkeuden variaatiokerroimen selitysvoima kasvoi. Nämä eivät kuitenkaan mitään maaosumien rajaa käytettäessä olleet yhtä hyviä alikasvoksen runkoluvun selittäjiä kuin maaosumien osuus. Tuloksen mukaan pienimpien alikasvospuiden mittaaminen ei käytännössä ole mahdollista, koska niistä saadut laserkaiut sekoittuvat maaosumien kanssa. Lopullisiin analyyseihin valittiin maaosumien rajaksi 0,4 m.

Alikasvoksen runkolukua selitti parhaiten maaosumien osuus ($R^2 = 0,56–0,87$) sekä kaikujen osuus 0,5 m ($R^2 = 0,58–0,87$), 1 m ($R^2 = 0,55–0,89$), 1,5 m ($R^2 = 0,53–0,90$) tai 2 m ($R^2 = 0,50–0,71$) korkeuden yläpuolella. Jälkimmäiset neljä ovat hyviä muuttujia, koska niissä vertailukorkeus on aina vakio. Esimerkiksi korkeusjakauman desiilien arvot riippuvat latvuston tiheyden lisäksi myös alikasvoksen ylärajan korkeudesta. Myös suhteelliset latvustiheydet (*proportional canopy densities*) alimmilla korkeuksilla (p1–p3) olivat hyviä selittäjiä, mutta niissä selitysaste vaihteli enemmän. Koealalla B selitysasteet olivat pienempiä kuin koealalla A ja heikkenivät nopeasti korkeammalta mitatuilla latvustiheyksillä (p3–p9). Myös maaosumien osuuden selitysvoima oli pienempi koealalla B kuin koealalla A. Kaikujen korkeuden variaatiokerroin selitti alikasvoksen tiheyttä koealalla A mutta ei koealalla B, samoin korkeusjakauman alimmat desiilit. Intensiteetin keskiarvo ja intensiteetin keskihajonta selittivät yksittäisillä/ensimmäisillä kaiuilla alikasvoksen runkolukua kohtalaisesti ($R^2 < 0,50$) suuren pulssitiheyden aineistoissa (ALTM_06_1km ja ALS_07_1km), mutta eivät pienemmillä pulssitiheyksillä. Tiheyden kasvaessa intensiteetti kasvoi ja variaatiokerroin pieneni, mitkä

ovat loogisia tuloksia aiempiin pulssitason tarkasteluihin verrattuna. Myös intensiteettija-kauman alimpien desiilien arvot ja intensiteetin keskiarvot korkeusjakauman kahdessa ylimmässä neljänneksessä selittivät alikasvoksen tiheyttä. Tiheästä alikasvoksesta saadaan siis vähemmän matalia intensiteettejä kuin harvasta, ja intensiteetit alikasvoskerroksen yläosista ovat tiheässä alikasvoksessa korkeampia. Tulokset 2. kaikujen intensiteettien (häviökorjatut tai korjaamattomat) osalta olivat samankaltaisia 1. kaikuihin verrattuna. Selkeää, systemaattista selityksasteen paranemista häviöiden kompensoinnin seurauksena ei havaittu.

3.4.3 Keskipituuden ennustaminen

Alikasvospuiden keskipituutta selittivät parhaiten logaritmuunnokset korkeusjakauman alimmista desiileistä, suhteellisista latvustiheyksistä alimmilla korkeuksilla ja tietyn korkeuden yläpuolelta saatujen kaikujen osuudesta. Lisäksi maaosumien osuus logaritmuuntamattomana selitti keskipituutta hyvin. Selityksasteet kaikille edellä kuvatuille muuttujille olivat suurin piirtein yhtä suuria ja vaihtelivat välillä 0,27–0,68. Lentokorkeus ei merkittävästi vaikuttanut muuttujien selitysvoimaan, eivätkä selityksasteet olleet kovin alhaisia kummallakaan koealalla tai missään keilauksessa. Intensiteetti- ja lehtipuiden selitysvoima keskipituuden ennustamisessa oli heikko.

3.4.4 Lehtipuiden osuuden ennustaminen

Lehtipuiden osuudella on merkitystä metsänhoidon kannalta mm. uuden puusukupolven aikaansaamisessa. Tutkitut korkeusjakaumapiirteet selittivät jonkin verran lehtipuiden osuutta, mutta tulosten merkitys käytännön kannalta on pieni, koska puuston pituus oli voimakkaasti korreloitunut lehtipuuosuuden kanssa. Lehtipuut olivat kummallakin koealalla kuusia pidempiä. Intensiteetti- ja lehtipuuosuuden väliltä ei löytynyt yleisiä säännönmukaisuuksia.

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Laserkaiun intensiteetti alikasvoksessa

Alikasvospuiden paikannustarkkuuden varmistettiin tarkistusmittauksin olevan 0,10 m tai parempi. Puiden geometrinen mallinnus onnistui tehtyjen testien perusteella hyvin. Lasersignaalin yhdistämisen signaalin laukaiseeseen kohteeseen voidaan siten katsoa olevan tarpeeksi tarkkaa luotettavien päätelmien tekemiseksi. Tuloksia voi jonkin verran sekoittaa se, että alikasvospuiden latvukset voivat olla limittäisiä, ja laserkaikua ei aina voitu assosoida yksiselitteisesti vain yhteen puuhun. Siksi ei voida täysin sulkea pois mahdollisuutta, että signaalit puiden välillä ovat sekoittuneet. Maasto-olosuhteissa ei voida kuitenkaan helposti päästä enää tarkempaan lopputulokseen, vaan tarvittaisiin laboratoriomittauksia, joissa voitaisiin tutkia heijastavuutta yhdellä puulajilla kerrallaan, ja muiden häiritsevien tekijöiden vaikutus saataisiin minimoitua. Jonkin verran päätelmien yleistämistä rajoittaa myös se, että alikasvoksessa oli vain muutamia puulajeja runsaasti, joten osasta puulajeja havaintoja on vähän.

Havaitut erot laserintensiteetissä puulajien välillä olivat pieniä ja vaihtelivat keilauksesta toiseen. Intensiteetin käyttömahdollisuudet puulajitulkinnassa alikasvoksessa ovat siten rajoitettut. Samansuuntaisia tuloksia saivat Korpela ym. (2008), joiden tutkimuksen mukaan laserintensiteetti ei eronnut kolmen pääpuulajin (mänty, kuusi, koivu) välillä taimikoissa, joissa ylimääräistä kohinaa ei aiheudu laserpulssin energiahäviöistä ylempiin latvuskerroksiin. Pihlaja tuotti hieman korkeampia intensiteettejä kuin muut puulajit, mikä on yhdenmukainen tulos aikaisempien tutkimusten kanssa (Korpela ym. 2008, Korpela ym. 2010b). Korpela ym. (2010b) havaitsivat lepällä korkeampia intensiteettejä kuin koivulla tutkimuksessa, jossa selvitettiin intensiteettieroja vallitsevan latvuskerroksen puilla. Vastaavaa eroa ei systemaattisesti havaittu nyt tehdyssä tutkimuksessa. Koivun intensiteetti oli toisella koealoista (koeala B) vuoden 2008 keilauksissa vain noin puolet kuusen tai lepän intensiteetistä. Tämä voi aiheutua sattumasta, koska koivusta havaintoja oli näissä keilauksissa kaikissa kaikuluokissa alle 80 kpl. Koivujen alhainen intensiteetti voi aiheutua myös siitä, että koivut olivat koealalla B harvalatvuisia, koska kasvupaikka oli suhteellisen karu.

Laserintensiteettejä on hyödynnetty puulajin tunnistamisessa isoilla puilla (Holmgren ja Persson 2004, Korpela ym. 2010b). Näissä tutkimuksissa laserintensiteetti on ollut yksi selittävä

muuttuja muiden laserpiirteiden joukossa ja on käytetty intensiteettijakaumia latvuksen sisällä yksittäisten kaikujen intensiteettien sijaan. Alikasvospuilla jakaumapiirteitä ei voida käyttää, koska yksittäisiä alikasvospuuta on mahdotonta erottaa laseraineistosta ilman ennakkotietoa puiden sijainnista, ja lisäksi laserpulssien määrä yhtä alikasvospuuta kohti on pieni. Näin ollen puulajin tunnistaminen laserkeilauksella alikasvoksessa on erittäin vaikeaa. Morsdorf ym. (2010) käyttivät yksittäisten kaikujen intensiteettiä puulajikerrosten (tammi, mänty) erottamiseen. Tässä tutkimuksessa intensiteetti oli kuitenkin toinen selittävä tekijä kaiun korkeuden lisäksi ja puulajit erosivat lehtien geometrian perusteella selkeästi toisistaan. Korpela (2009) onnistui kartoittamaan jäkälää vallitsevan puuston alla kohtuullisella tarkkuudella intensiteettiin perustuen, mutta jäkälällä on laboratorio-olosuhteissa havaittu selkeästi muuta kasvillisuutta voimakkaampi reflektanssi. Lisäksi kyseisessä tutkimuksessa käytettiin yksittäisiä/ensimmäisiä kaikuja.

Intensiteetille tehty etäisyys/AGC -korjaus pienensi intensiteetin hajontaa kohteen sisällä. Tulokset vahvistavat aiempia isoilla puilla tehtyjä havaintoja (Korpela ym. 2010a). Puulajin lisäksi muitakin intensiteettiin vaikuttavia tekijöitä löytyi, mutta niiden selitysvaikutus ei ollut kovin korkea. Alikasvoksen mitattavuuden kannalta merkittävä havainto oli muuta kasvillisuutta korkeampi intensiteetti maasta n. 1,5 m korkeudelle saakka, mikä rajoittaa pienimmistä puista saadun intensiteetin käyttömahdollisuuksia. Syy ilmiölle voi olla laserpulssin geometriassa. Teoriassa kohteita, joiden välinen etäisyys on alle puolet pulssin pituudesta, ei voida erottaa toisistaan. Maan läheisyydessä puustosta saatu signaali voi siten sekoittua maasta saatuu signaaliin. Toinen mahdollinen selitys on pienen puuston suuri tiheys, sillä alikasvospuiden runkoluku kaiun ympärillä selitti intensiteettiä jonkin verran. Tämä on johdonmukainen havainto, koska kohteen pinta-ala suhteessa laserin jalanjälkeen vaikuttaa intensiteettiin (Wagner ym. 2006). Tiheäkasvuissa puustossa heijastavaa lehtipinta-alaa laserin jalanjäljen alalla on enemmän kuin harvassa. ALS_07_1km aineistossa maaosumien intensiteetti oli matalampi kuin 0,5–1,5 m korkeudelta saatujen kaikujen. Tälle todennäköisin selitys on maan kosteus, koska veden absorptio laserin aallonpituudella (1064 nm) on korkea. Sademäärä viimeisen kuukauden aikana ennen vuoden 2007 keilausta oli suuri (Korpela 2008).

Pulssin leikkausgeometriaa puun latvuksen kanssa kuvaavista muuttujista pulssin etäisyys puun keskipisteestä sekä leikkaustilavuus ja leikkausmatka puun latvuksessa selittivät intensiteettiä. Intensiteetin pieneneminen latvuksen reunoja kohti vahvistaa puiden geometrisen mallinnuksen olevan onnistunut, koska lehtimassa pienenee latvuksen reunaa kohti. Leikkaustila-

vuuden ja leikkausmatkan intensiteettiä pienentävä vaikutus ei ole aivan yksiselitteisesti tulkittavissa. Ilmeisesti leikkaustilavuuden kasvaessa energiahäviöt latvukseen kasvavat. Toisaalta voisi ajatella, että leikkaustilavuuden kasvaessa pitäisi saada voimakkaampi intensiteetti, koska heijastavaa lehtimassaa on enemmän.

Toisten ja kolmansien kaikujen intensiteetin korjaus pulssin energiahäviöillä pienensi intensiteetin hajontaa kohteen sisällä ja paransi luokitustarkkuutta maaosumien ja yleisimmän puulajin välillä. Intensiteetin kompensoinnissa käytetyt mallit sisältävät useita yksinkertaistavia oletuksia. Aiempia kaikuja tuottaneiden kohteiden reflektanssi oletettiin yhtä suureksi kaikilla koealoilla. Pulssin leikkausgeometrian huomioivassa mallissa isojen puiden neulasjakaumaa kuvaavat funktiot eivät perustuneet tarkkoihin mittauksiin, vaan visuaalisten havaintojen pohjalta tehtyihin oletuksiin puiden neulasjakaumasta. Lisäksi vallitsevan puuston alla sijaitsevat kohteet (alikasvospuulajit, maa), joita käytettiin referenssipintoina intensiteetin normalisoinnissa, eivät olleet täysin homogeenisia, vaan esimerkiksi yhden puulajin sisällä intensiteetissä on suurta vaihtelua. Tämä tutkimus on kuitenkin tiettävästi ensimmäinen, jossa pulssin intensiteettien korjausta energiahäviöihin perustuen on kokeiltu empiirisellä aineistolla. Tulokset osoittavat, että huomioimalla energiahäviöt intensiteetti-informaatiota voidaan tarkentaa. Tuloksen merkitys käytännön kannalta on kuitenkin pieni, koska erot intensiteettien keskiarvoissa puulajien välillä olivat hyvin pieniä.

Yksinkertaisin malli, jossa aikaisempien kaikujen intensiteetin oletettiin olevan lineaarinen energiahäviöiden mitta, toimi hyvin molemmilla testatuilla laserkeilausaineistoilla. Tulokset paranivat hieman epälineaarilla mallilla. Jonkin verran voitiin parantaa tuloksia ottamalla huomioon pulssin leikkausgeometria ylemmän latvuserroksen puiden kanssa. Aikaisempien kaikujen intensiteetti ei siis ole täydellinen energiahäviöiden mitta. Tähän syynä voivat olla kaikuina näkymättömät häviöt, eli pulssi on osunut ylemmän latvuserroksen puiden oksistoon, mutta osuma ei ole ollut tarpeeksi voimakas tuottaakseen kaikua. Ilmiö havaittiin tutkittaessa intensiteettejä ensimmäisistä/yksittäisistä kaiuista. Näilläkin intensiteetti pulsseilla, jotka olivat leikanneet isojen puiden latvuksia, oli pienempi kuin ylemmän latvuserroksen puuston aukkokohtista saatu intensiteetti. Toinen mahdollinen selittävä tekijä on, että intensiteetti ei mittaa palaavan kaiun energiaa vaan maksimiampplitudia. Kolmas tekijä on jokaisen kaiun jälkeen syntyvä sokea alue, joka aiheutuu siitä, että välittömästi kaiun rekisteröinnin jälkeen laite ei voi rekisteröidä seuraavaa kaikua.

4.2 Kaiun muodostumisen todennäköisyys

Tutkimuksessa selvitettiin, mitkä tekijät vaikuttavat siihen, että alikasvospuun latvukseen osuneesta laserpulssista havaitaan kaiku. Kaiun todennäköisyyden oli riippuvainen puulajista, puun koosta, pulssin leikkausgeometriasta puun latvuksen kanssa, lentokorkeudesta, käytettyä sensorista sekä pulssista saatujen aikaisempien kaikujen lukumäärästä. Puulajien välisissä vertailuissa tulosten tulkintaa voi vaikeuttaa se, että latvuksen muotoa kuvaavat mallit olivat erilaiset eri puulajeilla.

Havupuilla (kuusi, kataja) havaittiin korkeampi kaiun todennäköisyys kuin lehtipuilla. Selitystä tälle voidaan hakea puiden lehvästön rakenteesta. Havupuilla on lehtipuita tiheämpi oksisto, ja neulasmassa on jakautunut tasaisesti koko latvuksen alalle. Varjossa kasvaneiden lehtipuiden latvukset ovat usein laakeita ja sateenvarjomaisia. Toisaalta eroja voi aiheutua myös siitä, että mallinnetut havupuiden latvukset olivat lehtipuiden latvuksia pidempiä. Tällöin matka, jolta kaiku on voinut muodostua, on havupuilla pidempi kuin lehtipuilla. Lisäksi havupuiden paikannustarkkuus on hieman lehtipuita parempi, koska havupuiden runko on suora ja latvuksen keskipisteen paikka siten yksikäsitteinen. Havupuut alikasvoksessa olivat myös hieman pienempiä kuin lehtipuut, mikä saattaa vaikuttaa tuloksiin. Tällöin havupuiden voisi tosin olettaa tuottavan kaiun pienemmällä todennäköisyydellä kuin lehtipuiden, koska kaiun todennäköisyyden havaittiin pienenevän puun koon pienentyessä.

Erilaiset kaiun todennäköisyydet puulajien välillä voivat olla merkityksellisiä käytännön aluepohjaisten menetelmien kannalta, koska ne osoittavat, että kaikujen korkeusjakauma voi olla riippuvainen puulajista. Toisaalta (Naesset ja Bjerknæs 2001) havaitsivat, että aluepohjaisessa menetelmässä lehtipuiden osuus taimikoissa ei vaikuttanut puiden pituusennusteiden tarkkuuteen. Nyt tehdyssä tutkimuksessa aikaisempien kaikujen lukumäärä vaikutti kaiun todennäköisyyteen eri tavoin eri puulajeilla. Kuusella kaiun todennäköisyys pieneni vain hieman, jos aikaisempia kaikuja oli havaittu, kun taas lehtipuilla pieneminen oli selkeämpi. Kuusi siis tuottaa lehtipuita herkemmin kaikuja pulsseista, joiden energia on pieni. Puulajin vaikutus korkeusjakaumapiirteisiin alikasvoksessa voi siten olla erilainen kuin taimikoissa, koska alikasvokseen tulleista pulsseista suuri osa on tuottanut kaiun ylemmästä latvuserrosta.

Lentokorkeuden kasvattaminen pienensi kaiun todennäköisyyttä. Tämä havaittiin sekä verrattaessa 1 km ja 2 km korkeudesta lennettyjä keilauksia keskenään, että yhden keilauksen sisällä tutkittaessa skannausetäisyyden vaikutusta kaiun todennäköisyyteen. Tulos on selitettävissä sillä, että pulssin energiatiheys pinta-alayksikköä kohti pienenee lentokorkeuden kasvaessa, jolloin tarvitaan suurempi/voimakkaammin heijastava kohde kaiun laukaisemiseksi. Tulokset ovat yhdenmukaisia aikaisempien tutkimusten kanssa. Esimerkiksi Goodwin ym. (2006) havaitsivat, että yhden kaiun tuottaneiden pulssien osuus väheni lentokorkeuden kasvaessa. Hopkinsonin (2007) tutkimuksessa lentokorkeuden/keilanleveyden kasvattaminen pienensi puiden latvuksista saatujen kaikujen maksimikorkeutta. Toisaalta on havaittu, että lentokorkeuden kasvattaminen nostaa korkeusjakauman desiilejä (Naasset 2004c, Naasset 2009), mikä tarkoittaisi että pulssien tunkeutuminen latvustoon vähenee. Tämä ei kuitenkaan välttämättä aiheudu suuremmasta kaiun todennäköisyydestä, vaan pulssien sammumisesta puiden latvuksissa. Pulssin jalanjäljen kasvaessa heikkojen, kaikua tuottamattomien osumien osuus kasvaa, ja metsän pohjalle tunkeutuu mahdollisesti vähemmän laserpulsseja. Samassa tutkimuksessa havaittiin myös, että vaikka lentokorkeus vaikuttikin jonkin verran laserkaikujen korkeusjakaumiin, puustotunnusille tehdyt estimaatit eivät olleet herkkiä tälle vaihtelulle. Solberg ym. (2010) vertasivat eri asetuksin tehtyjä keilauksia (eri sensori, lentokorkeus tai pulssitaajuus), ja havaitsivat, että maaosumien osuus vaihteli keilausten välillä, mutta erot olivat yleensä alle 10 %. Erot olivat suurempia viimeisillä kuin ensimmäisillä kaiuilla. Johtopäätöksenä oli, että tarvitaan hyvin tarkkoja maastomittauksia, jotta korkeusjakaumapiirteiden kalibrointia keilausten välillä voitaisiin suorittaa. Myös Morsdorf ym. (2008) havaitsivat maaosumien osuuden kasvavan lentokorkeuden kasvaessa, mutta toisaalta viimeisten kaikujen osuus väheni, mikä on yhdenmukainen tulos Goodwin ym. (2006) tutkimuksen kanssa.

4.3 Sensoreiden väliset erot

Tutkitut sensorit (Optech ALTM3100 ja Leica ALS50-II) eroavat toisistaan pulssin jalanjäljen perusteella. ALTM3100 -sensorilla jalanjälki on selvästi suurempi kuin ALS50 -sensorilla. Lisäksi eroja voi olla mm. sensorin kaiun tulkintaan käyttämän algoritmin osalta. Joitakin selkeitä eroavaisuuksia tutkittujen sensorien välillä löytyi sekä kaiun intensiteetissä että pulssista saadun kaiun todennäköisyydessä. Intensiteetin osalta suurin ero oli heikkojen intensiteettien puuttuminen yksittäisen kaiun tuottaneissa pulsseissa ALTM3100:lla, minkä seurauksena intensiteettien hajonta tällä sensorilla oli selvästi pienempi kuin ALS50:llä. Ero voi ai-

heutua jalanjäljen koosta. ALS50:llä jalanjälki on pienempi, ja siten kohteiden (lehtien/neulasten) sijoittumisessa jalanjäljen alalla voi olla enemmän vaihtelua kuin ALTM3100:lla. On myös mahdollista, että automaattinen vastaanottimen voimakkuuden säätö (AGC) kasvattaa laitteen dynaamista tallennusaluetta sallien suuremman vaihtelun intensiteetissä (Korpela ym. 2010b). Laserkaiun intensiteetillä on monia hyvä ominaisuuksia passiivisiin sensoreihin verrattuna (mm. aina sama valaisu-katselukulma, hyvä geometrinen tarkkuus). Tulokset osoittavat kuitenkin, että intensiteettijakaumat samasta kohteesta eri sensoreilla vaihtelevat, mikä vaikeuttaa intensiteetin kalibrointia keilauskampanjoiden välillä ja keilausaineistojen yhdistämistä. ALTM3100 tuotti kaikuja alikasvospuista hieman pienemmällä todennäköisyydellä kuin ALS50, ja ero pystyttiin havaitsemaan myös kaikujen korkeusjakaumassa. Erot korkeusjakaumissa olivat kuitenkin pieniä, joten tämä ei ole yhtä suuri ongelma kuin poikkeavuudet intensiteetissä.

Erot sensoreiden välillä ovat merkityksellisiä laserkeilausinventoinnin kustannusten ja laserkeilausaineistoihin perustuvan muutostulkinnan kannalta (Naeset 2009). Mikäli eri sensoreilla hankitut laserkeilausaineistot ovat keskenään vertailukelpoisia, kustannussäästöjä metsäinventoinnissa voidaan saada yhdistämällä eri sensoreilla hankittuja aineistoja. Myös maastokoeala-aineistojen tarve vähenee, jos samoja maastokoealoja voidaan käyttää referenssinä usealle eri sensorilla hankitulle aineistolle. Luotettava muutostulkinta puolestaan edellyttää, että eri ajankohtina suoritettujen keilausten samalta alueelta ovat keskenään vertailukelpoisia. Edellä esitetyt argumentit pätevät sensoreiden välisten erojen lisäksi myös eroihin samalla sensorilla, mutta eri asetuksilla hankituissa aineistoissa. Naeset (2009) havaitsi maksimissaan 10 % eron puuston tilavuuden ennusteissa, kun tietyllä sensorilla hankittua aineistoa käytettiin regressiomallien laadintaan, ja puuston tilavuus ennustettiin laadituilla malleilla, mutta käyttäen toisella sensorilla hankittua aineistoa.

Lisää tutkimusta tarvitaan selvittämään, minkälaisissa tilanteissa aineistojen yhdistäminen on mahdollista. Sensoreiden välisiä eroja voidaan tutkia vertailemalla samasta kohteesta eri sensoreilla hankittuja aineistoja keskenään. Vertailuihin ei välttämättä tarvita maastoreferenssiaineistoja, jos ollaan kiinnostuneita vain eroista sensorien välillä (Solberg ym. 2010). Etuna maastokoealoihin perustuviin tutkimuksiin verrattuna on, että voidaan tutkia hyvin laajojakin alueita, jolloin tulosten pohjalta tehtyjen päätelmien luotettavuus on suuri.

4.4 Aluepohjaiset laserpiirteet

Testatut aluepohjaiset laserpiirteet selittivät kohtalaisen hyvin alikasvoksen runkolukua ja keskipituutta, mutta eivät lehtipuiden osuutta. Tulosten yleistämistä ajatellen otos (66 koeruu-tua) on kuitenkin kohtalaisen pieni. Käytetty menetelmä, jossa ylempään latvuskerroksen lat-vuksen alaraja saatiin maastomittauksista, saattaa antaa liian optimistisia tuloksia. Todellisuu-
dessa lisävirhettä tulisi latvusrajan määrittämisestä laseraineistosta.

Tuloksille on vaikea löytää vertailukohtia aiemmista tutkimuksista, koska vastaavanlaisia tutkimuksia ei ole tehty aiemmin. Useimmissa alikasvoksen mittausta käsittelevissä tutkimuk-sissa alikasvos on määritelty eri tavalla ja mukaan on otettu vain tiettyä rajaa suuremmat puut. Tässä tutkimuksessa laadittiin regressiomallit alikasvoksen ominaisuuksille yksi selittävä muuttuja kerrallaan, eikä laadittu usean selittävän muuttujan malleja, koska käytettävissä ole-
va maastoaineisto oli suppea. Tulokset ovat kuitenkin yhdenmukaisia Maltamon ym. (2005) tutkimuksen kanssa. Kyseisessä tutkimuksessa selitysaste alikasvoksen runkoluvulle usean selittävän muuttujan regressiomallilla oli 0,87. Nyt saadut selitysasteet parhailla muuttujilla olivat 0,50–0,87, mitkä ovat kohtalaisen korkeita ottaen huomioon nyt tutkitun alikasvoksen pienen koon. Toisaalta nyt tutkitut metsiköt olivat suhteellisen väljästi kasvaneita männiköitä, joissa pulsseja alikasvoskerrokseen pääsi runsaasti, ja suuresta osasta alikasvospuita saatiin näytteitä, kun taas Maltamon ym. (2005) tutkimuksen metsät olivat luonnontilaisen kaltaisia kuusikoita.

Saatuja tuloksia voidaan verrata myös taimikoissa saatuihin tuloksiin. Hieman erilaisia tulok-sia saivat Naasset ja Bjerknes (2001), joiden tutkimuksessa keskipituuden ennustaminen on-nistui runkoluvun ennustamista paremmin. Taimikoiden puuston tiheys on kuitenkin usein kohtalaisen tasainen alikasvokseen verrattuna. Lisäksi alikasvoksen tapauksessa voi olla riit-tävää, että määritetään ennakkoraivauksen tarve harvennuksissa, jolloin karkea arvio alikas-voksen runkoluvusta riittää. Tehty demonstraatio alikasvoksen täydellisen poiston vaikutuk-sesta laserkaikujen korkeusjakaumaan osoitti, että tällä tasolla alikasvoksen tunnistaminen voi mahdollista.

Vallitsevan latvuskerroksen pulsseja pidättävää vaikutusta ei otettu huomioon ennusteita teh-täessä. Riaño ym. (2003) esittivät alikasvoksesta saatujen pulssien lukumäärän korjaamista korkeusluokittain luomalla simuloitu aaltomuoto laserpisteistä. Vastaavaa ei yritetty tässä

työssä. Sen sijaan alikasvokseen osuneiden pulssien tilajakaumalla ja pulssitiheydellä sekä ylemmän latvuskerroksen puuston ominaisuuksilla yritettiin selittää regressiomallien jäännösvirheitä, mutta selitysaasteet jäivät heikoiksi. Syynä voi olla se, että vallitsevan puuston pidättävä vaikutus ei vaihdellut kovin paljon koeruutujen välillä. Aikaisemmissa tutkimuksissa ennusteet alikasvoksen ominaisuuksille ovat olleet epätarkimpia, kun vallitseva latvuskerros on ollut tiheä.

4.5 Menetelmäkehitys tulevaisuudessa

Tämän tutkimuksen tulosten valossa alikasvoksen havaitseminen ja karkeiden ennusteiden tekeminen alikasvoksen runkoluvulle ja pituudelle on ainakin jossakin määrin mahdollista nykyisin käytössä olevilla harvapulssisilla kaikulaseraineistoilla. Sen sijaan alikasvoksen tarkempi luokittelu on nykyisin menetelmin hankalaa. Tulevaisuudessa tarkempaan alikasvoksen ominaisuuksien kuvaukseen voidaan päästä aaltomuotolaserilla, jota on käytetty suuren jalanjäljen systeemeissä, mutta jonka käytön tutkimusta kasvillisuuden kuvauksessa pienen jalanjäljen systeemeillä ollaan vasta aloittamassa. Aaltomuotolaser voi myös mahdollistaa kaikulaseria tarkemman energiahäviöiden mittauksen, jolloin tässä tutkimuksessa esitetty signaalin kompensointi energiahäviöillä tarkentuu. Aaltomuotolaserin haittapuolena on aineistojen vaatima suuri tallennus- ja laskentakapasiteetti. Toisaalta tietokoneiden laskentakapasiteetti on ainakin toistaiseksi kehittynyt jatkuvasti.

Valmista menetelmää alikasvoksen ennustamiseksi ei esitetty. Menetelmä tulee todennäköisesti olemaan aluepohjainen, koska pienten alikasvospuiden erottaminen yksittäisen puun tasolla ei ole mahdollista mm. latvusten limittäisyyden takia. Oli käytetty menetelmä mikä tahansa, on tärkeää, että alikasvososumat voidaan automaattisesti erottaa osumista vallitsevaan latvuskerrokseen. Tässä tutkimuksessa ei otettu tähän kysymykseen kantaa, vaan oletettiin, että erottelu pystytään tekemään riittävällä tarkkuudella. Alikasvososumien erottaminen voisi perustua esimerkiksi ylemmän latvuskerroksen latvusrajan määrittämiseen laseraineistosta. Menetelmiä tähän on tutkittu jonkin verran (Naeset ja Okland 2002, Maltamo ym. 2006). Tulevaisuudessa laseraineistojen pistetiheyden kasvaessa yksinpuintulkinta voi olla varteenotettava vaihtoehto käytännön inventointisovelluksissa. Eräs mahdollisuus voisi olla ylemmän latvuskerroksen yksinpuintulkinta, jolloin voitaisiin poistaa ylemmän latvuskerroksen puista saadut laserkaiut ja tehdä ennusteita alikasvokselle aluepohjaisesti jäljelle jääneestä

pistejoukosta. Menetelmiä yksittäisen puun latvusrajan määrittämiseen ovat esittäneet mm. Holmgren ja Persson (2004) sekä Vauhkonen (2010). Vaikka intensiteettitieto ei sovellu puulajin tunnistamiseen, intensiteettiä voidaan mahdollisesti hyödyntää alikasvososumien erottamisessa, jos alikasvos poikkeaa heijastusominaisuuksiltaan ylemmästä latvuserroksesta (Morsdorf ym. 2010).

5 Johtopäätökset

Lasersignaalin tarkastelu pulssitasolla osoitti, että luotettava puulajin tunnistaminen alikasvoksessa laserintensiteettiä käyttäen ei ole mahdollista puulajien välisten pienten intensiteettierojen ja intensiteetin suuren hajonnan takia. Erityisesti pulsseilla, joista on saatu aiempi kaiku ylemmästä latvuskerroksesta, havaittu intensiteetti alikasvoksesta sisältää kohinaa. Tässä tutkimuksessa osoitettiin ensimmäistä kertaa empiirisellä aineistolla, että intensiteettejä voidaan korjata pulssin energiahäviöiden perusteella. Käytännön puulajiluokituksen kannalta korjauksen tuoma hyöty ei kuitenkaan ollut suuri. Aaltomuotolaseria käyttäen päästään mahdollisesti tarkempiin tuloksiin niin puulajiluokituksessa kuin energiahäviöiden kompensoinnissa.

Alikasvospuulajien välillä havaittiin selkeitä eroja todennäköisyydessä saada kaiku laserpulsista. Lisäksi kaiun todennäköisyyteen vaikuttavat tekijät vaikuttivat eri tavoin eri puulajeilla. Keilauksen toteutukseen liittyvillä tekijöillä (mm. lentokorkeus) oli vaikutusta kaiun todennäköisyyteen. Tuloksilla on merkitystä laserkaikujen korkeusjakauman tulkinnan kannalta, koska korkeusjakauma voi vaihdella eri puulajien metsiköissä ja eri keilauksien välillä. Lisää tutkimuksia tarvitaan selvittämään, aiheutuuko havaituista eroista korkeusjakaumapiirteisiin merkittäviä eroja, jotka voisivat vaikuttaa alikasvokselle tehtyjen aluepohjaisten ennusteiden tarkkuuteen.

Tutkittujen sensorien välillä havaittiin eroja erityisesti laserkaikujen intensiteettijakaumissa sekä jonkin verran myös korkeusjakaumissa. Tulosten valossa eri sensoreilla hankittujen aineistojen yhdistäminen ei ole täysin ongelmaton ja sensoreiden välisiä eroja on syytä selvittää tarkemmin.

Aluepohjaiset laserpiirteet selittivät kohtalaisen hyvin alikasvoksen runkolukua ja keskipituutta. Käytännön metsäinventointisovellusten kannalta hyvä asia oli, että selitysvaiva ei merkittävästi heikentynyt pulssitiheyden pienentyessä. Lehtipuiden osuuden ennustaminen ei sen sijaan onnistunut. Tulosten perusteella laserkeilausaineistoja voidaan käyttää ainakin ennakkoraivaustarpeen arvioinnissa, jossa riittävät alikasvoksen havaitseminen sekä karkeat estimaatit tiheydelle ja pituudelle. Alikasvoksen tarkempi kuvaus (esimerkiksi puulajiosuuksien määrittäminen) on kuitenkin vaikeaa. Tässä tutkimuksessa käytetty aineisto oli aluepohjaisen

tulkinnan kannalta pieni. Lisäselvitystä tarvitaan tulosten yleistämiseksi tämän tutkimuksen koaloista poikkeaviin metsiin.

Kirjallisuus

Baldwin, V. C. & Peterson, K. D. 1997. Predicting the crown shape of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* 27(1): 102–107.

Bartemucci, P., Messier, C. & Canham, C. D. 2006. Overstory influences on light attenuation patterns and understory plant community diversity and composition in southern boreal forests of Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 36(9): 2065–2079.

Brandtberg, T., Warner, T. A., Landenberger, R. E. & McGraw, J. B. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85(3): 290–303.

Donoghue, D. N. M., Watt, P. J., Cox, N. J. & Wilson, J. 2007. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment* 110(4): 509–522.

Goodwin, N. R., Coops, N. C. & Culvenor, D. S. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment* 103(2): 140–152.

Gower, S. T., Kucharik, C. J. & Norman, J. M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70(1): 29–51.

Heikkilä, J. 2007. Turvemaiden puun kasvatusta ja korjuu – nykytila ja kehittämistarpeet. *Metlan työraportteja* 43: 1–29.

Hill, R. A. & Broughton, R. K. 2009. Mapping the understorey of deciduous woodland from leaf-on and leaf-off airborne LiDAR data: A case study in lowland Britain. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(2): 223–233.

Holmgren, J. & Persson, A. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90(4): 415–423.

Hopkinson, C. 2007. The influence of flying altitude, beam divergence, and pulse repetition frequency on laser pulse return intensity and canopy frequency distribution. *Canadian Journal of Remote Sensing* 33: 312–324.

Hopkinson, C. & Chasmer, L. 2009. Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. *Remote Sensing of Environment* 113(1): 275–288.

Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.

Hyypä, J., Hyypä, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A. & Holopainen, M. 2009. Forest inventory using small-footprint airborne LiDAR. *Julkaisussa: Shan, J. & Toth, C. K. (toim).*

Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. s. 335–370.

Jaskierniak, D., Lane, P. N. J., Robinson, A. & Lucieer, A. 2011. Extracting LiDAR indices to characterise multilayered forest structure using mixture distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 115(2): 573–585.

Kaasalainen, S., Hyyppä, H., Kukko, A., Litkey, P., Ahokas, E., Hyyppä, J., Lehner, H., Jaakkola, A., Suomalainen, J., Akujärvi, A., Kaasalainen, M. & Pyysalo, U. 2009. Radiometric calibration of LIDAR intensity with commercially available reference targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(2): 588–598.

Korhonen, K., Tomppo, E., Henttonen, H., Ihalainen, A. & Tonteri, T. 2000. Hämeen-Uudenmaan metsäkeskuksen alueen metsävarat 1965–1999. *Metsätieteen aikakauskirja* 3B/2000: 489–566.

Korpela, I. 2004. Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. *Silva Fennica - Monographs* (3): 1–93.

Korpela, I. 2008. Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 112(10): 3891–3897.

Korpela, I. & Välimäki, E. 2007. Talousmetsän maanpintamallinnus arkistoilmakuvilta ja laserkeilauksella. *Maanmittaus* 82(2): 5–27.

Korpela, I. & Tokola, T. 2006. Potential of aerial image-based monoscopic and multiview single-tree forest inventory: A simulation approach. *Forest Science* 52(2): 136–147.

Korpela, I., Tuomola, T. & Välimäki, E. 2007. Mapping forest plots: an efficient method combining photogrammetry and field triangulation. *Silva Fennica* 41(3): 457–469.

Korpela, I., Tuomola, T., Tokola, T. & Dahlin, B. 2008. Appraisal of seedling stand vegetation with airborne imagery and discrete-return LiDAR - an exploratory analysis. *Silva Fennica* 42(5): 753–772.

Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., Holopainen, M. & Minkkinen, K. 2009. Airborne small-footprint discrete-return LiDAR data in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation, and habitats. *Forest Ecology and Management* 258(7): 1549–1566.

Korpela, I., Orka, H. O., Hyyppä, J., Heikkinen, V. & Tokola, T. 2010a. Range and AGC normalization in airborne discrete-return LiDAR intensity data for forest canopies. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(4): 369–379.

Korpela, I., Orka, H. O., Maltamo, M., Tokola, T. & Hyyppä, J. 2010b. Tree species classification using airborne LiDAR - effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fennica* 44(2): 319–339.

Kuuluvainen, T., Jarvinen, E., Hokkanen, T. J., Rouvinen, S. & Heikkinen, K. 1998. Structural heterogeneity and spatial autocorrelation in a natural mature *Pinus sylvestris* dominated forest. *Ecography* 21(2): 159–174.

- Larsen, M. 1997. Crown modelling to find tree top positions in aerial photographs. Proceedings of the third international airborne remote sensing conference and exhibition, volume II. s. 428–435.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. & Harding, D. 1999. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment* 70(3): 339–361.
- Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K., Wallermann, J. & Olsson, H. 2010. Estimation of tree lists from airborne laser scanning by combining single-tree and area-based methods. *International Journal of Remote Sensing* 31(5): 1175–1192.
- Magnussen, S. & Boudewyn, P. 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research* 28(7): 1016–1031.
- Maltamo, M., Hyypä, J. & Malinen, J. 2006a. A comparative study of the use of laser scanner data and field measurements in the prediction of crown height in boreal forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21(3): 231–238.
- Maltamo, M., Eerikainen, K., Packalen, P. & Hyypä, J. 2006b. Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics. *Forestry (Oxford)* 79(2): 217–229.
- Maltamo, M., Malinen, J., Packalen, P., Suvanto, A. & Kangas, J. 2006c. Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography, and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research* 36(2): 426–436.
- Maltamo, M., Packalen, P., Yu, X., Eerikainen, K., Hyypä, J. & Pitkanen, J. 2005. Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data. *Forest Ecology and Management* 216(1): 41–50.
- Martinuzzi, S., Vierling, L. A., Gould, W. A., Falkowski, M. J., Evans, J. S., Hudak, A. T. & Vierling, K. T. 2009. Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability. *Remote Sensing of Environment* 113(12): 2533–2546.
- Metsäkeskus 2011. Metsävaratiedon keräämisestä entistä tehokkaampaa. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: http://www.metsakeskus.fi/web/fin/palvelut/Ajankohtaista/Metsavaratiedon_keruu/. [Viitattu 30.4.2011].
- Metsätilastollinen vuosikirja 2010. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa, 472 s.
- Morsdorf, F., Meier, E., Allgöwer, B. & Nuesch, D. 2003. Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV-3/W13*: 27–33.
- Morsdorf, F., Frey, O., Meier, E., Itten, K. I. & Allgoewer, B. 2008. Assessment of the influence of flying altitude and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): 1387–1406.

- Morsdorf, F., Marell, A., Koetz, B., Cassagne, N., Pimont, F., Rigolot, E. & Allgoewer, B. 2010. Discrimination of vegetation strata in a multi-layered Mediterranean forest ecosystem using height and intensity information derived from airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 114(7): 1403–1415.
- Naesset, E. 1997a. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61(2): 246–253.
- Naesset, E. 1997b. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52(2): 49–56.
- Naesset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80(1): 88–99.
- Naesset, E. 2004a. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(2): 164–179.
- Naesset, E. 2004b. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first Nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 554–557.
- Naesset, E. 2004c. Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. *Remote Sensing of Environment* 91(2): 243–255.
- Naesset, E. 2007. Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research* 22(5): 433–442.
- Naesset, E. 2009. Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 113(1): 148–159.
- Naesset, E. & Bjercknes, K. O. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 78(3): 328–340.
- Naesset, E. & Okland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79(1): 105–115.
- Persson, A., Holmgren, J. & Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(9): 925–932.
- Petrie, G. & Toth, C. K. 2009. Introduction to laser ranging, profiling and scanning. *Julkaisussa: Shan, J. & Toth, C. K. (toim). Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. s. 1–27.*

- Pukkala, T., Lähde, E. & Laiho, O. 2011. Metsän jatkuva kasvatus. Joen Forest Program Consulting, Joensuu. 229 s.
- Rautiainen, M., Möttö, M., Stenberg, P. & Ervasti, S. 2008. Crown envelope shape measurements and models. *Silva Fennica* 42(1): 19–33.
- Riaño, D., Meier, E., Allgower, B., Chuvieco, E. & Ustin, S. L. 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment* 86(2): 177–186.
- Solberg, S., Naesset, E. & Bollandsas, O. M. 2006. Single tree segmentation using airborne laser scanner data in a structurally heterogeneous spruce forest. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72(12): 1369–1378.
- Solberg, S., Næsset, E. & Lange, H. 2010. Comparing canopy penetration of repeated ALS acquisitions. *Silvilaser 2010*, the 10th international conference on LiDAR applications for assessing forest ecosystems. September 14-17, 2010, Freiburg, Germany.
- Vauhkonen, J. 2010. Estimating crown base height for Scots pine by means of the 3D geometry of airborne laser scanning data. *International Journal of Remote Sensing* 31(5): 1213–1226.
- Vogel, J. G. & Gower, S. T. 1998. Carbon and nitrogen dynamics of boreal jack pine stands with and without a green alder understory. *Ecosystems* 1(4): 386–400.
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T. & Studnicka, N. 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60(2): 100–112.
- Wehr, A. 2009. LiDAR systems and calibration. *Julkaisussa: Shan, J. & Toth, C. K. (toim). Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. s. 129–172.*

Liite 1. Selostus puiden paikannustarkkuuden arvioinnista ja paikannustarkkuuden parantamisesta maastotöiden jälkeen.

Ilmakuvalle näkyvien puiden ("ilmakuvapuut") paikannuksessa käytetyn fotogrammetrisen menetelmän tarkkuutta on arvioitu aiemmissa julkaisuissa, ja se on ollut 0,1–0,4 m (Korpela ym. 2007, Korpela ym. 2010b). Seuraavassa esitetään ilmakuvalle näkymättömien puiden ("omissiopuut", $h > 0,3$ m) paikannukseen käytetyn vaijerimenetelmän tarkkuuden arviointi ja tarkkuuden parantamiseen käytetyt menetelmät.

Omissiopuiden paikannus pyrittiin tekemään mahdollisimman tarkasti latvuskeskipisteen kohdalle (XY-tasossa). Mittaajat määrittivät latvuskeskipisteen paikan maastossa silmänvaraisesti. Tavoitteena oli alle 0,15 m keskimääräinen tarkkuus (X ja Y-koordinaattien keskihajonta, $\sigma(X) = \sigma(Y) = 0,15$ m). Tarkkuutta arvioitiin työn edetessä kahdella eri menetelmällä.

Ensimmäisessä arviointimenetelmässä paikannettiin vaijerimenetelmää käyttäen ilmakuvalta jo paikannettuja isoja puita (kontrollipuut) ja verrattiin vaijerimenetelmän tuottamia koordinaatteja ilmakuvalta mitattuihin koordinaatteihin. Fotogrammetrisen paikannuksen ja vaijerimenetelmän tuottamien koordinaattien erotusten varianssi (σ_{tot}^2) kuvaa menetelmien yhteenlaskettua vaihtelua, eli fotogrammetrisen paikannusmenetelmän varianssin (σ_{foto}^2) ja vaijerimenetelmän varianssin (σ_{alikk}^2) summaa (Yhtälö 1). Kun kokonaisvariانسsista vähennetään fotogrammetrisen paikannuksen varianssi, saadaan vaijerimenetelmän varianssi, josta edelleen voidaan laskea keskihajonta. Tällä tavoin saadaan arvio vaijerimenetelmän tuottamien koordinaattien keskihajonnasta sekä X- että Y-suunnassa, kun oletetaan tunnetuiksi fotogrammetrisen paikannuksen keskihajonnat vastaavissa suunnissa. Koealalla A kontrollipuuta oli yhteensä 222 kpl ja koealalla B yhteensä 122 kpl.

$$\sigma_{tot} = \sigma_{foto}^2 + \sigma_{alikk}^2 \quad (1)$$

Edellä kuvattu tarkistus antaa kuitenkin vain arvion vaijerimenetelmän tarkkuudesta. Arvioon vaikuttaa paljon se, miten tarkka on oletus fotogrammetrisen paikannuksen keskihajonnasta. Sekä vaijerimenetelmän että fotogrammetrisen paikannuksen todellisen tarkkuuden selvittämiseksi tehtiin koealalla B tarkistusmittauksia, joissa mitattiin puiden välisiä etäisyyksiä maastossa. Etäisyyksiä mitattiin sekä omissiopuiden välillä että ilmakuvapuiden välillä.

Maastossa mitattujen etäisyyksien tulisi vastata vaijerimenetelmän tuottamien koordinaattien perusteella saatuja laskennallisia etäisyyksiä.

Ilmakuvapuiden välisiä etäisyyksiä mitattiin yhteensä 26 kpl. Omissiopuiden välisiä etäisyyksiä mitattiin sekä mittauskaistojen (8×30 m) sisällä että kaistojen välillä. Edellinen kuvaa suorakulman kanssa työskentelyn tarkkuutta ja jälkimmäinen vaijerimenetelmän kokonaistarkkuutta, johon sisältyy sekä mittaajien työskentelyn tarkkuus että linjan päiden paikannuksen tarkkuus. Kaistojen sisäisiä tarkistusmittauksia tehtiin yhteensä 23 kpl linjan suunnassa (±30 astetta) ja 12 kpl linjaa vastaan kohtisuoraan (±30 astetta). Oletuksena oli, että linjan suunnassa mittausvirhe on suurempi kuin linjaa vastaan kohtisuorassa, koska suorakulman poikkeama 90° kulmasta vaikuttaa voimakkaammin tähän suuntaan. Kaistojen välisiä etäisyysmittauksia tehtiin 16 kpl. Tarkistettavat kaistat valittiin siten, että ne olisivat toisistaan riippumattomia eli vaijerin päiden paikannukseen ei ollut käytetty samoja kiintopistepuita. Riippumattomuus varmistettiin tekemällä etäisyysmittaukset joka neljännen kaistan välillä. Tutkittavien kaistojen väliin jäi siis aina kolme kaistaa.

Tarkistusmittausten perusteella linjan sisäinen paikannustarkkuus oli linjan suunnassa 3,8 cm ja linjaa vastaan kohtisuorassa suunnassa 2,2 cm. Linjojen sisäinen tarkkuus oli hyvä, eikä sen parantamiseen olisi ollut jälkeensä mahdollisuuttakaan. Sen sijaan voitiin parantaa vaijerimenetelmän kokonaistarkkuutta tarkentamalla vaijerin alku- ja loppupisteiden paikannusta.

Vaijerin alku- ja loppupisteiden paikat ratkaistiin maanmittauksessa käytetyllä tasoituslaskennalla. Siinä hyödynnetään pienimmän neliösumman menetelmää (PNS), jossa minimoidaan paikannettavalta pisteeltä kiintopistepuihin tehtyjen suunta- ja etäisyshavaintojen sekä kiintopistepuiden paikannuksen jäännösvirheiden neliöiden summaa (Korpela ym. 2007). Paikannettavasta pisteestä P_0 mitataan suuntia ja etäisyyksiä kiintopisteisiin P_A . Pisteestä P_0 koordinaatit ovat (X_0, Y_0) , ja pisteen P_A koordinaatit (X_A, Y_A) . Kiintopisteillä on ilmakuvasta mitatut koordinaatit $(X_{A(obs)}, Y_{A(obs)})$. Pisteestä P_0 pisteeseen P_A mitattu suunta on $\alpha_{(obs)}$ ja etäisyys $d_{(obs)}$. Jäännösvirheet (residuaalit, havaintovirheet) lasketaan havaintoyhtälöillä:

Pisteestä P_0 ja P_A välinen etäisyys:

$$\sqrt{(X_0 - X_A)^2 + (Y_0 - Y_A)^2} - d_{obs} = 0 \quad (2)$$

Pisteestä P_0 pisteeseen P_A mitattu suunta (atsimuutti):

$$\arctan\left(\frac{(Y_0 - Y_A)}{(X_0 - X_A)}\right) - \alpha_{obs} = 0 \quad (3)$$

Pisteen P_A koordinaatit:

$$X_A - X_{A(obs)} = 0 \quad (4)$$

$$Y_A - Y_{A(obs)} = 0 \quad (5)$$

Tasointaslaskennassa ratkaistaan koordinaatit X_0 , Y_0 , X_A ja Y_A iteratiivisesti (kokeilemalla) siten, että minimoidaan jäännösvirheiden neliöiden painotettua summaa. Painot kullekin havaintoyhtälölle määräytyvät ja asetettiin havaintojen oletetun virheen (keskihajonnan) mukaan. Painojen määrittämiseksi on tunnettava kiintopisteiden mitattujen koordinaattien $X_{A(obs)}$ ja $Y_{A(obs)}$ keskihajonta, suuntahavaintojen $\alpha_{(obs)}$ keskihajonta sekä etäisyyshavaintojen $d_{(obs)}$ keskihajonta (tasointaslaskennan parametrit).

Kun havaintoyhtälöitä on enemmän kuin tuntemattomia, on kyse redundantista tapauksesta, jolloin voidaan laskea tasointaslaskennan tuottamille koordinaateille virhe-estimaatit. Jäännösvirheiden painoyksikön keskivirheen (σ_0) tulisi olla n. 1, mikäli tasointaslaskennan parametrit on oikein määritetty. Lisäksi voidaan laskea virhe-estimaatit σ_X ja σ_Y tasointaslaskennan tuottamille tuntemattoman pisteen koordinaateille (X_0 , Y_0).

Vaijerin päiden paikannuksessa kiintopisteinä (P_A) olivat fotogrammetrisesti paikannetut valitsevan latvuskerroksen puut. Jokaisesta paikannettavasta pisteestä tehtiin kahdeksan suunta- ja kahdeksan etäisyyshavaintoa kiintopistepuihin. Etäisyydet mitattiin mittanauhalla ja suunnat bussolilla. Tasointaslaskentaa varten määritettiin kiintopisteiden paikannuksen keskihajonaksi 0,25 m koealalla A ja 0,35 m koealalla B (Taulukko 1). Koealalla B käytetty arvo 0,35 m saatiin tehtyjen puiden välisten etäisyysmittauksen perusteella. Koealalla B fotogrammetrisen paikannus ei ollut yhtä tarkkaa kuin koealalla A, koska puut olivat suuria, lakkapäisiä

mäntyjä. Etäisyyshavaintojen keskihajonaksi asetettiin 0,10 m ja suuntahavaintojen keskihajonaksi 0,25 rad (Taulukko 1).

Taulukko 1. Tasoituskennassa käytetyt parametrit.

	Ilmakuvauiden paikannuksen keskihajonta, m	Etäisyyshavaintojen keskihajonta, m	Suuntahavaintojen keskihajonta, rad
Koeala A	0,25	0,10	0,025
Koeala B	0,35	0,10	0,025

Vaijerin alku- ja loppupisteiden paikannuksen tarkkuutta oli mahdollista parantaa 1) tarkentamalla fotogrammetrisesti mitattujen kiintopisteiden koordinaatteja, 2) ottamalla tasoituskennaan mukaan lisää etäisyyshavaintoja sekä 3) poistamalla virheellisiltä vaikuttavia suunta- ja etäisyyshavaintoja tai kiintopisteitä. Jokaisen vaiheen jälkeen suoritettiin tasoituskenta, ja tutkittiin parannuksen vaikutusta tasoituskennan virhe-estimaattien keskiarvoihin (Taulukko 2) sekä tarkistusmittausten tuottamiin vaijerimenetelmän tarkkuuden estimaatteihin (Taulukko 3).

Taulukko 2. Vaijerin päiden paikannuksessa käytetyn tasoituskennan virhe-estimaatit. Kiintopisteet: A = alkuperäiset kiintopisteiden koordinaatit, B = kiintopisteiden fotogrammetrinen paikannus tehty uudelleen. Suunta- ja etäisyyshavainnot: 1 = tasoituskenta kahdeksalla suunta ja kahdeksalla etäisyyshavainnolla, 2 = linjojen alkupäille otettu lisää etäisyyshavaintoja, 3 = yksittäisiä kiintopisteitä poistettu.

Kiintopisteet	Suunta- ja etäisyyshavainnot	Tasoituskennan virhe-estimaatit		
		σ_0	σ_x, m	σ_y, m
Koeala A				
A	1	1,38	0,14	0,13
A	2	1,19	0,12	0,10
A	3	1,01	0,10	0,09
Koeala				
A	1	1,02	0,14	0,14
B	1	0,75	0,10	0,10
B	2	0,84	0,10	0,11
B	3	0,73	0,09	0,10

Taulukko 3. Omissiopuiden paikannuksessa käytetyn menetelmän harha ja hajonta tarkistusmittausten perusteella. Harha ja hajonta (1) kuvaavat fotogrammetrisesti paikannettuihin puihin tehtyjen kontrollimittausten tuloksia. Hajonta (2) on mittaustaistojen välillä tehtyjen puiden välisten etäisyysmittausten perusteella laskettu. Kiintopisteet: A = alkuperäiset kiintopisteiden koordinaatit, B = kiintopistepuiden fotogrammetrinen paikannus tehty uudelleen. Suunta- ja etäisyyshavainnot: 1 = tasoituslaskenta kahdeksalla suunta ja kahdeksalla etäisyyshavainnolla, 2 = linjojen alkupäille otettu lisää etäisyyshavaintoja, 3 = yksittäisiä kiintopisteitä poistettu.

Kiintopisteet	Suunta- ja etäisyys-havainnot	Harha ja hajonta (1)				Hajonta (2), m
		Harha		Hajonta		
		X, m	Y, m	X, m	Y, m	
A	1	-0,02	0,01	0,05	0,14	-
A	2	-0,01	0,01	0,06	0,10	-
A	3	-0,03	0,00	0,06	0,10	-
A	1	-0,06	0,01	0,23	0,14	0,12
B	1	-0,01	0,07	0,16	0,15	0,08
B	2	-0,03	0,07	0,11	0,13	0,07
B	3	-0,03	0,06	0,11	0,13	0,07

Kiintopistepuiden uudelleenmittaus: Oletuksena oli, että fotogrammetrinen paikannusmenetelmä on harhaton. Työ tehtiin rutiinityönä useiden muita tutkimuksia varten mitattujen koealojen mittauksen yhteydessä. Oli mahdollista, että suorittamalla tasoituslaskennassa käytettyjen kiintopistepuiden fotogrammetrinen paikannus uudelleen erityisen huolellisesti voitaisiin parantaa kiintopisteiden koordinaattien tarkkuutta. Koealalla B, jossa alkuperäisillä kiintopisteillä ei kontrolli- ja tarkistusmittausten perusteella aivan päästy tavoiteltuun alle 0,15 m omissiopuiden paikannustarkkuuteen (Taulukko 3) uusittiin fotogrammetriset mittaukset. Uusien kiintopisteiden käyttö pienensi sekä tasoituslaskennan virhe-estimaatteja (Taulukko 2) että tarkistusmittausten perusteella arvioitua omissiopuiden paikannuksen tarkkuutta (Taulukko 3).

Lisäetäisyyshavainnot vaijerin alkupisteille: Vaijerin varrelta mitattuja kontrollipuita käytettiin vaijerin alkupisteiden paikannuksessa kiintopisteinä, koska niiden etäisyys vaijerin alkupisteeseen voitiin laskea vaijeria pitkin kuljetun matkan ja vaijeria vastaan kohtisuoran etäisyyden avulla. Molemmille koealoille tehtiin alkupisteiden paikannus uudestaan käyttämällä kaikkia etäisyyshavaintoja, jotka olivat saatavilla, kuitenkin maksimissaan 17 etäisyyshavaintoa paikannettavaa pistettä kohti. Lisäetäisyyshavaintojen käyttö paransi tasoituslaskennan virhe-estimaatteja hieman koealalla A, mutta ei juurikaan koealalla B (Taulukko 2). Kontrollipuihin tehtyjen mittausten perusteella laskettu menetelmän tarkkuus kuitenkin parani mo-

lemmilla koealoilla, ja koealalla B tehtyjen puiden välisten etäisyysmittausten perusteella laskettu vaijerimenetelmän tarkkuus parani myös (Taulukko 3).

Virheellisten suunta- ja etäisyyshavaintojen poisto: Havaintoon liittyvä suuri jäännösvirhe voi olla merkki havaintovirheestä. On mahdollista, että virheellinen havainto vaikuttaa ratkaisuun (X_0 , Y_0) paljonkin, ja tämä yksittäinen havainto poistamalla voidaan parantaa tasoituslaskennan tarkkuutta. Koska havaintoyhtälöiden suuret ovat eri yksiköissä (metrit, radiaanit), täytyy jäännösvirheet normalisoida, jotta niitä voidaan vertailla keskenään. Keskivirheellään normalisoituja jäännösvirheitä (ns. Baarda-testisuure) voidaan käyttää virheellisten havaintojen löytämiseen. Ongelmana on silti, että on vaikea arvioida, aiheutuuko suuri Baarda kiintopisteen paikannuksen epätarkkuudesta tai maastossa tehtyjen suunta- ja etäisyyshavaintojen epätarkkuudesta. On myös mahdollista, että kaikki muut havainnot ovat virheellisiä, ja suuren Baardan havainto on oikea. Mitä enemmän havaintoja kiintopisteisiin on, sitä pienempi on todennäköisyys, että suuren Baardan omaava havainto olisi harhaton, ja kaikki muut ovat harhaisia. Kiintopistepuiden uudelleenmittauksen ja lisäetäisyyshavaintojen mukaan ottamisen jälkeen käytiin jokainen vaijerin alku- ja loppupiste läpi. Jos tasoituslaskennan virhe-estimaatit (σ_X tai σ_Y) olivat yli 0,15 m ja yhdessä havainnoista Baarda oli selvästi muita suurempi, ja mikäli tämä havainto poistamalla tasoituslaskennan virhe-estimaatit pienenevät selvästi, poistettiin havainto. Koealalla A poistettiin kuusi kiintopistettä ja koealalla B poistettiin viisi kiintopistettä. Kiintopisteiden poistamisen tuloksena tasoituslaskennan keskimääräiset virhe-estimaatit pienenevät edelleen hieman (Taulukko 2), mutta tarkistusmittausten perusteella laskettu menetelmän tarkkuus ei juuri enää parantunut (Taulukko 3).

Liite 2. Kaiun todennäköisyyden mallintaminen logistisella regressiolla.

$$\text{logit}(p_i) = b_0 + b_1 \cdot x$$

Selitykset: OR = ristitulosuhde (odds ratio), *tree_h* = puun pituus (m), *rel_dist_stem* = pulssin minimietäisyys puun rungosta / puun pituus, *intersect_vol* = pulssin leikkaustilavuus puun latvuksen kanssa (l), *intersect_length* = pulssin leikkausmatka puun latvuksessa (m), *range* = etäisyys sensorilta ylimpään leikkauskohtaan (m), *scan_angle* = skannauskulma (astetta), *rel_dist_top* = ylimmän leikkauskohdan pystyettäisyys puun latvasta / puun pituus, *intersect_h* = ylimmän leikkauskohdan korkeus maasta (m), *footprint_area* = pulssin leikkauspin-ta-ala puun latvuksen kanssa leveimmän leikkauksen kohdalla (%), *n_prev* = aikaisempien kaikujen lukumäärä ennen leikkausta, REF = muuttujaa on käytetty vertailutasona, johon muita muuttujien tasoja verrataan (luok-kamuuttujilla).

Koela A

	ALTM_06_1km			ALS_07_1km			ALS_08_1km			ALS_08_2km		
	β_1	OR (95% muusväli)	p	β_1	OR (95% muusväli)	p	β_1	OR (95% muusväli)	p	β_1	OR (95% muusväli)	p
<i>Puulaji</i>												
<i>Kuusi</i>	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
<i>Mänty</i>	-1,601	0,20 (0,15-0,28)	<0,001	-1,233	0,29 (0,20-0,43)	<0,001	-1,537	0,21 (0,11-0,44)	<0,001	-	-	-
<i>Koivu</i>	-1,174	0,31 (0,29-0,33)	<0,001	-0,519	0,60 (0,55-0,65)	<0,001	-0,657	0,52 (0,45-0,60)	<0,001	-0,517	0,60 (0,49-0,73)	<0,001
<i>Haapa</i>	-2,517	0,08 (0,07-0,10)	<0,001	-1,733	0,18 (0,14-0,22)	<0,001	-1,809	0,16 (0,11-0,25)	<0,001	-2,108	0,12 (0,06-0,23)	<0,001
<i>Raita</i>	-1,223	0,29 (0,25-0,35)	<0,001	-0,397	0,67 (0,54-0,83)	<0,001	-0,338	0,71 (0,48-1,07)	0,104	-0,661	0,52 (0,32-0,84)	0,008
<i>Pihlaja</i>	-2,019	0,13 (0,12-0,15)	<0,001	-1,348	0,26 (0,22-0,31)	<0,001	-1,259	0,28 (0,21-0,38)	<0,001	-1,026	0,36 (0,24-0,53)	<0,001
<i>Paju</i>	-1,777	0,17 (0,15-0,19)	<0,001	-1,222	0,29 (0,25-0,35)	<0,001	-1,344	0,26 (0,20-0,34)	<0,001	-1,211	0,30 (0,20-0,43)	<0,001
<i>Kataja</i>	0,036	1,04 (0,80-1,34)	0,781	-0,582	0,56 (0,41-0,76)	<0,001	0,030	1,03 (0,55-1,94)	0,927	-	-	-
<i>tree_h</i>	0,087	1,09 (1,08-1,10)	<0,001	0,175	1,19 (1,17-1,21)	<0,001	0,181	1,20 (1,17-1,23)	<0,001	0,200	1,22 (1,18-1,27)	<0,001
<i>rel_dist_stem</i>	-4,567	0,01 (0,01-0,01)	<0,001	-9,226	0,00 (0,00-0,00)	<0,001	-8,139	0,00 (0,00-0,00)	<0,001	-8,502	0,00 (0,00-0,00)	<0,001
<i>vol</i>	0,012	1,01 (1,01-1,01)	<0,001	0,075	1,08 (1,07-1,08)	<0,001	0,046	1,05 (1,04-1,05)	<0,001	0,013	1,01 (1,01-1,01)	<0,001
<i>path</i>	0,512	1,67 (1,63-1,70)	<0,001	0,708	2,03 (1,97-2,09)	<0,001	0,648	1,91 (1,82-2,01)	<0,001	0,774	2,17 (2,01-2,34)	<0,001
<i>range</i>	-0,007	0,99 (0,99-1,00)	<0,001	-0,062	0,94 (0,93-0,95)	<0,001	-0,159	0,85 (0,83-0,87)	<0,001	-0,035	0,97 (0,95-0,98)	<0,001
<i>scan_angle</i>	-0,011	0,99 (0,98-1,00)	0,041	0,012	1,01 (0,98-1,04)	0,430	0,019	1,02 (0,98-1,06)	0,380	0,062	1,06 (0,95-1,20)	0,297
<i>rel_dist_top</i>	-3,388	0,03 (0,03-0,04)	<0,001	-4,670	0,01 (0,01-0,01)	<0,001	-4,350	0,01 (0,01-0,02)	<0,001	-3,646	0,03 (0,02-0,04)	<0,001
<i>intersect_h</i>	0,187	1,21 (1,19-1,22)	<0,001	0,318	1,37 (1,35-1,40)	<0,001	0,306	1,36 (1,31-1,40)	<0,001	0,343	1,41 (1,35-1,47)	<0,001
<i>footprint_area</i>												
100 %	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
<100%	1,223	3,40 (3,22-3,59)	<0,001	1,658	5,25 (4,76-5,79)	<0,001	1,50	4,48 (3,86-5,20)	<0,001	1,627	5,09 (4,27-6,07)	<0,001
<i>n_prev</i>												
0	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
1	-0,591	0,55 (0,53-0,58)	<0,001	-0,597	0,55 (0,51-0,59)	<0,001	-0,683	0,51 (0,44-0,57)	<0,001	-0,643	0,53 (0,44-0,63)	<0,001
2	-1,091	0,34 (0,29-0,38)	<0,001	-1,357	0,26 (0,22-0,30)	<0,001	-1,931	0,14 (0,11-0,19)	<0,001	-1,966	0,14 (0,09-0,21)	<0,001

Koecala B

Puulaji	ALTM_06_1km			ALS_07_1km			ALS_08_1km			ALS_08_2km		
	p _i	Luotta- musväli OR (95 %)	p	p _i	Luotta- musväli OR (95 %)	p	p _i	Luotta- musväli OR (95 %)	p	p _i	Luotta- musväli OR (95 %)	p
Kuusi	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
Mänty	-2,131	0,12 (0,10-0,15)	<0,001	-2,816	0,06 (0,05-0,08)	<0,001	-1,879	0,15 (0,12-0,19)	<0,001	-1,991	0,14 (0,10-0,18)	<0,001
Koivu	-0,323	0,72 (0,64-0,82)	<0,001	-0,180	0,84 (0,73-0,95)	0,008	-0,717	0,49 (0,42-0,57)	<0,001	-0,842	0,43 (0,35-0,53)	<0,001
Haapa	2,604	0,07 (0,05-0,12)	<0,001	-2,147	0,12 (0,08-0,18)	<0,001	-2,100	0,12 (0,07-0,22)	<0,001	-2,135	0,12 (0,06-0,23)	<0,001
Leppä	-0,219	0,80 (0,71-0,91)	<0,001	0,012	1,01 (0,89-1,15)	0,857	0,095	1,10 (0,93-1,30)	0,260	-0,083	0,92 (0,73-1,16)	0,480
Pihlaja	-1,456	0,23 (0,16-0,34)	<0,001	-1,312	0,27 (0,18-0,40)	<0,001	-1,436	0,24 (0,14-0,41)	<0,001	-1,525	0,22 (0,10-0,47)	<0,001
Kataja	-0,263	0,77 (0,55-1,07)	0,124	-0,629	0,53 (0,37-0,77)	<0,001	0,126	1,13 (0,75-1,71)	0,548	0,127	1,14 (0,69-1,86)	0,614
<i>tree_h</i>	0,065	1,07 (1,06-1,08)	<0,001	0,125	1,13 (1,12-1,15)	<0,001	0,020	1,02 (1,01-1,03)	<0,001	0,024	1,02 (1,01-1,04)	0,002
<i>rel_dist_stem</i>	-3,202	0,04 (0,03-0,05)	<0,001	-5,909	0,00 (0,00-0,00)	<0,001	-3,106	0,04 (0,03-0,06)	<0,001	-2,863	0,06 (0,04-0,08)	<0,001
<i>vol</i>	0,006	1,01 (1,01-1,01)	<0,001	0,041	1,04 (1,04-1,04)	<0,001	0,029	1,03 (1,03-1,03)	<0,001	0,008	1,01 (1,01-1,01)	<0,001
<i>path</i>	0,274	1,32 (1,30-1,34)	<0,001	0,404	1,50 (1,47-1,53)	<0,001	0,439	1,55 (1,51-1,59)	<0,001	0,425	1,53 (1,48-1,58)	<0,001
<i>range</i>	-0,003	1,00 (1,00-1,00)	<0,001	-0,081	0,92 (0,91-0,93)	<0,001	-0,001	1,00 (1,00-1,00)	0,105	-0,009	0,99 (0,99-1,00)	0,002
<i>scan_angle</i>	0,011	1,01 (1,00-1,03)	0,106	-0,007	0,99 (0,98-1,01)	0,308	-0,003	1,00 (0,98-1,01)	0,770	0,080	1,08 (0,95-1,23)	0,227
<i>rel_dist_top</i>	-3,566	0,03 (0,02-0,03)	<0,001	-3,788	0,02 (0,02-0,03)	<0,001	-0,909	0,40 (0,34-0,47)	<0,001	-1,827	0,16 (0,13-0,20)	<0,001
<i>intersect_h</i>	0,171	1,19 (1,17-1,20)	<0,001	0,255	1,29 (1,27-1,31)	<0,001	0,057	1,06 (1,04-1,07)	<0,001	0,096	1,10 (1,08-1,12)	<0,001
<i>footprint_area</i>												
100 %	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
<100%	1,561	4,76 (4,44-5,10)	<0,001	1,852	6,37 (5,80-7,00)	<0,001	1,628	5,10 (4,62-5,62)	<0,001	1,732	5,65 (5,06-6,32)	<0,001
<i>n_prev</i>												
0	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF	REF
1	-0,161	0,85 (0,80-0,91)	<0,001	-0,377	0,69 (0,64-0,74)	<0,001	-0,278	0,76 (0,70-0,82)	<0,001	-0,227	0,80 (0,72-0,89)	<0,001
2	-0,239	0,79 (0,68-0,92)	0,002	-0,677	0,51 (0,43-0,61)	<0,001	-0,558	0,57 (0,48-0,69)	<0,001	-0,567	0,57 (0,46-0,70)	<0,001