

Turvemaan kantavuuden ennustaminen laserkeilausaineistoilla

Harri Lindeman, Jari Ala-Illomäki, Matti Sirén, Mikko Vastaranta,
Markus Holopainen ja Jori Uusitalo

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute - sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisutoiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

PL 18, 01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2102
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18, 01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2102
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Lindeman, Harri, Ala-Ilomäki, Jari, Sirén, Matti, Vastaranta, Mikko, Holopainen, Markus & Uusitalo, Jori			
Nimeke Turvemaan kantavuuden ennustaminen laserkeilausaineistoilla			
Vuosi 2013	Sivumäärä 31	ISBN 978-951-40-2417-7 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Länsi-Suomi / PUU-ohjelma / 90224 Turvemaiden kesäkorjuu liikkeelle, 3544 Uudet tekniset menetelmät maaston kulkukelpoisuuden ennustamiseen ja hakkuun suunnitteluun, 3594 Pehmeiden maiden hakkuiden tehostaminen			
Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, 11.04.2013			
Tiivistelmä Turvemaiden metsävarat ovat merkittävä puuvaranto Suomen metsätaloudessa. Turvemaiden puunkorjuu on haasteellista pienen kertymän pitkien metsäkuljetusmatkojen ja sulan maan aikaisen heikon kantavuuden johdosta. Turvemaiden puut on totuttu korjaamaan talvella, mutta hakkuumahdollisuuksien lisääntyminen ja leudot talvet ovat johtaneet sulan maan aikaisen puunkorjuun lisääntymiseen turvemailla. Laserkeilaus on vakiintumassa merkittäväksi metsien kaukokartoitusmenetelmäksi. Laserkeilausaineistoilla voidaan ennustaa puustoa tarkasti myös metsikkökuvion sisällä. Laserkeilausta on toteutettu runsaasti viime vuosina ja laserkeilausaineistoja on käytettävissä suuressa osassa Suomea. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia laserkeilausaineistojen hyödyntämistä turvemaiden puunkorjuun suunnittelussa ja kantavuuden ennustamisessa. Tutkimuksessa oli käytössä kaksi eri tiheyksistä laserkeilausaineistoa, joihin oli toteutettu puustotulkinta eri menetelmillä. Laserkeilausaineistoista käytettiin puustoeestimaatteja, latvuksen korkeusmalleja ja maanpintamalleja. Tutkimuksessa laserkeilausaineistojen hyödyntäminen havaittiin lupaavaksi menetelmäksi kantavuuden ennustamisessa turvemailla. Puustoa ennustavat aineistot toimivat loogisesti kantavuuden ennustamisessa. Turvemaan kantavuus vaihtelee runsaasti eikä laserkeilausaineistoilla pystytty selittämään koko vaihtelua. Laserkeilausaineistojen hyödyntämiseen kantavuuden ennustamisessa tarvitaan lisätutkimuksia laajemmalla aineistolla.			
Asiasanat turvemaat, puunkorjuu, laserkeilaus			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp263.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Harri Lindeman, Kaironientie 15, 39700 Parkano, Sähköposti harri.lindeman@metla.fi			
Muita tietoja			

Sisällys

Alkusanat	5
Lyhenteet	6
1 Johdanto	7
2 Aineisto ja menetelmät	8
2.1 Tutkimusalue ja koealat	8
2.2 Laserkeilausaineistot	11
2.3 Maastomittaukset	16
2.4 Maastokoe	17
2.5 Tilastollinen analyysi	19
3 Tulokset	19
3.1 Aineiston keskiarvot ja vaihtelu	19
3.2 Korrelaatioanalyysi	21
3.3 Regressioanalyysi	24
3.3.1 Raiteen syvyyden ennustaminen maastossa mitatun maasto- ja puustotiedon avulla	24
3.3.2 Raiteen syvyyden ennustaminen laserkeilausaineistojen avulla	25
4 Tulosten tarkastelu	27
Lähteet	29

Alkusanat

Finnish Bioeconomy Cluster FIBIC Oy (www.fibic.fi) EffFibre-ohjelman WP 2:n “Potential and feasibility of intensive wood and biomass production” osana Metsähallitus käynnisti 2011 yhteistyössä Metsäntutkimuslaitoksen kanssa hankekokonaisuuden ”Turvemaiden kesäkorjuu liikkeelle”, jonka tavoitteena on edistää suometsien sulanmaan aikaisten puunkorjuuoperaatioiden toteutumista. Hankekokonaisuus käsitti tutkimukset integroidun aines- ja energiapuun korjuun edellytyksistä turvemaakohteilla ja laserkeilausaineistosta saatavien tietojen käyttömahdollisuudesta turvemaaleimikoiden korjuukelpoisuuden kuvauksessa. Tässä raportissa esitetään keskeiset tulokset laserkeilaustutkimuksesta.

Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita organisaatioita ja henkilöitä. Metsähallituksesta hankkeen ohjausryhmään kuuluivat hankintapäällikkö Markku Eklund, tietojärjestelmäpäällikkö Risto Laamanen ja kehityspäällikkö Jouni Karjalainen. Metsäntutkimuslaitoksessa hanketta hallinnoi aluejohtaja Jori Uusitalo. Tutkimus toteutettiin Metsähallituksen Nurmeksens metsätiimin alueella Nurmeksessä. Puunkorjuun ohjauksesta vastasivat suunnittelija Risto Ryytänen ja korjuuesimies Pasi Jormanainen Metsähallituksesta. Metsäkoneet tulivat Motoajo Oy:ltä. Maastotyön toteuttivat Ari Ryytänen, Pauli Alavataja ja Jari Ilomäki Metsäntutkimuslaitokselta. Laserkeilaukset toteutti FM-International Oy FINNMAP. Harvapulssisen laserkeilausaineiston puustotulkinnan toteutti Arbonaut Oy. Tiheäpulsissisen laserkeilausaineiston puustotulkinnan toteuttivat projektitutkija Mikko Vastaranta ja professori Markus Holopainen Helsingin yliopiston metsätieteiden laitokselta.

Tampereella 16.4.2013

Tekijät

Lyhenteet

CHM _{ALS_HD_10}	Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston latvuksenkorkeusmallin korkeuden keskiarvo 10 m säteellä koealapisteestä, cm
CHM _{ALS_LD_5}	Harvapulssisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallin korkeuden keskiarvo 5 m säteellä koealapisteestä, cm
DEM _{EDIT_HD}	Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston pienialaiset korkeuserot esittävä pintamalli, cm
DEM _{EDIT_LD}	Harvapulssisen laserkeilausaineiston pienialaiset korkeuserot esittävä pintamalli, cm
DEM _{ORIG_HD}	Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston pintamallin korkeus merenpinnasta koealapisteessä, m
DEM _{ORIG_LD}	Harvapulssisen laserkeilausaineiston pintamallin korkeus merenpinnasta koealapisteessä, m
PPA _{ALS_HD_10}	Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston puuston pohjapinta-alan estimaatin keskiarvo 10 m säteellä koealapisteestä, m ² /ha
PPA _{ALS_LD_10}	Harvapulssisen laserkeilausaineiston puuston pohjapinta-alan estimaatin keskiarvo 10 m säteellä koealapisteestä, m ² /ha
PPA _{MAASTO}	Maastossa mitattu puuston pohjapinta-ala, m ² /ha
Raiteen syvyys _{AKn}	Koealan n:n ajokerran raiteen syvyyden keskiarvo, cm
Runkoluku _{MAASTO}	Koealalta maastossa mitattu puuston runkoluku, kpl/ha
V _{ALS_HD_10}	Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston puuston tilavuuden estimaatin keskiarvo 10 m säteellä koealapisteestä, m ³ /ha
V _{ALS_LD_10}	Harvapulssisen laserkeilausaineiston puuston tilavuuden estimaatin keskiarvo 10 m säteellä koealapisteestä, m ³ /ha
V _{MAASTO}	Maastossa mitattu puuston tilavuus, m ³ /ha

1 Johdanto

Turvemailla kasvavat puustot ovat muodostuneet merkittäväksi puuvarannoksi Suomen metsätaloudessa. Turvemaiden puuvarat ovat kasvaneet runsaiden 1960- ja 1970-lukujen metsäojitusten seurauksena (Metsätalustollinen vuosikirja 2001). Suopuustojen on arvioitu olevan yli 500 miljoonaa kuutiometriä. Koko maassa suopuustojen osuus on 24 % ja joissain maakunnissa huomattavasti suurempi, kuten Etelä-Pohjanmaan 42 %. (Korhonen ym. 2007)

Turvemaiden puut on totuttu korjaamaan talvella maanpinnan ollessa jäässä. Hakkuumahdollisuuksien lisääntyminen on johtanut tarpeeseen korjata puuta myös sulan maan aikana erityisesti runsassoisissa maakunnissa. Lisäksi leudot talvet ovat aiheuttaneet turvemaiden puunkorjuuseen ongelmia. Högnäs (1997) on todennut turvemaiden puunkorjuun ongelman olevan ennen kaikkea taloudellinen. Pieni kertymä ja pitkät metsäkuljetusmatkat rasittavat kannattavuutta.

Puuston määrää on pidetty turvemaan kantavuutta hyvin selittävänä tekijänä. Turvemaaharvennusten korjuukelpoisuusluokituksessa (Högnäs ym. 2011) puuston määrä on päätekijänä korjuukuvion kantavuuden ennustamisessa. Muita tekijöitä kantavuusluokituksessa ovat pohjaveden syvyys, turpeen kosteus, turpeen paksuus ja maastokuljetusmatka. Uusitalon ja Ala-Ilomäen (2013) tutkimuksessa raiteenmuodostumista selittivät parhaiten hakkuutähteiden määrä, turpeen leikkausmoduli, puuston tilavuus ja turpeen kosteus. Laserkeilausaineistoilla puuston määrää voidaan ennustaa kuvion sisäisesti.

Turvemaiden puunkorjuukalustoa ja koneiden varustelua on testattu 1980-luvulta alkaen (Sirén ym. 1987, Högnäs 1997 ja Ala-Ilomäki y. 2011). Konekaluston osalta on testattu esimerkiksi erilaisia tela-alustaisia koneita (Högnäs 1997 sekä Uusitalo ja Ala-Ilomäki 2013). Telakoneet ovat osoittautuneet 1980-luvulla huomattavasti kalliimmiksi korjuukustannuksiltaan (Högnäs 1997). Kantavuutta parantavia varusteita, kuten telojen ja lisäpyöräparin käyttöä, ovat tutkineet esimerkiksi Högnäs (1997) ja Ala-Ilomäki ym. (2011).

Laserkeilaus on kehittynyt merkittäväksi menetelmäksi metsien kaukokartoituksessa 1990- ja 2000-lukujen aikana. Laserkeilausaineistojen hyödyntämistä metsävarojen inventoinnissa ja puustotulkinnassa ovat tutkineet esimerkiksi Hyyppä ja Inkinen (1999), Næsset (2002), Breidenbach (2010), Peuhkurinen (2011) sekä Vastaranta ym. (2012). Laserkeilausta on käytetty metsien inventointien kehittämiseen ja laserkeilaus on vakiintumassa metsäsuunnittelun työvälineeksi. Suomi laserkeilataan todennäköisesti kokonaisuudessaan tämän vuosikymmenen aikana ja laserkeilaus on integroitumassa uusiutuviin metsävaratietojärjestelmiin. Puustoestimaatteja on tuotettu yksinpuintulkinnalla (ITD, Individual tree detection) ja aluepohjaisella menetelmällä (ABA, Area-based approach). ITD-menetelmässä puut tunnistetaan latvuksen korkeusmallin lokaalien maksimien avulla ja latvukset segmentoidaan. Segmentoinnin jälkeen puun tunnuksentunnukset ennustetaan laserin avulla. ABA-menetelmä perustuu maastokoealojen ja laserpiirteiden väliseen riippuvuuteen. Menetelmässä hyödynnetään maastosta tarkasti mitattuja koealoja, joiden laserpiirteiden perusteella ennustetaan puustotunnukset hilaruudukolle. (Holopainen ym. 2011a) Yksinpuintulkinta vaatii tiheäpulsisemmän aineiston kuin aluepohjainen menetelmä.

Koska yksittäisen puun erottelu puuryhmästä on monissa metsiköissä vaikeaa, ovat tutkijat viime vuosina kehittäneet menetelmiä, jossa yhden puun tulkinnan sijaan pyritään tulkitsemaan puuryhmiä eli puuryväksiä. Ryvästulkintamenetelmän perusajatuksena on hyödyntää maastokoealoilta tarkasti mitattuja puutietoja ja laserpisteaineistosta irrotettujen piirteiden tilastollista riippuvuutta. Puuryväsmenetelmä perustuu latvuksen korkeusmallin lokaalien maksimien seg-

mentoitiin ja puustotunnusten ennustamiseen segmenteittäin (Breidenbach ym. 2010). Menetelmän otosyksikkö on latvusmallista segmentoitu alue, joka kuvaa yksittäisen puun tai puuryhmän latvusta.

Puunkorjuun olosuhteita voidaan ennustaa laserkeilauksen avulla myös ilman puustotulkintaa. Laserkeilausaineistosta irrotettu maanpintamalli (DEM, digital elevation model) saadaan interpoloimalla viimeiset matalimmat kaiut ja latvuksen korkeusmalli (CHM, canopy height model) lasketaan korkeimmista kaiuista, joista on vähennetty pintamallin korkeus. (Holopainen ym. 2011b). Näillä aineistoilla voi olla hyvinkin paljon käyttöarvoa puunkorjuun suunnittelussa.

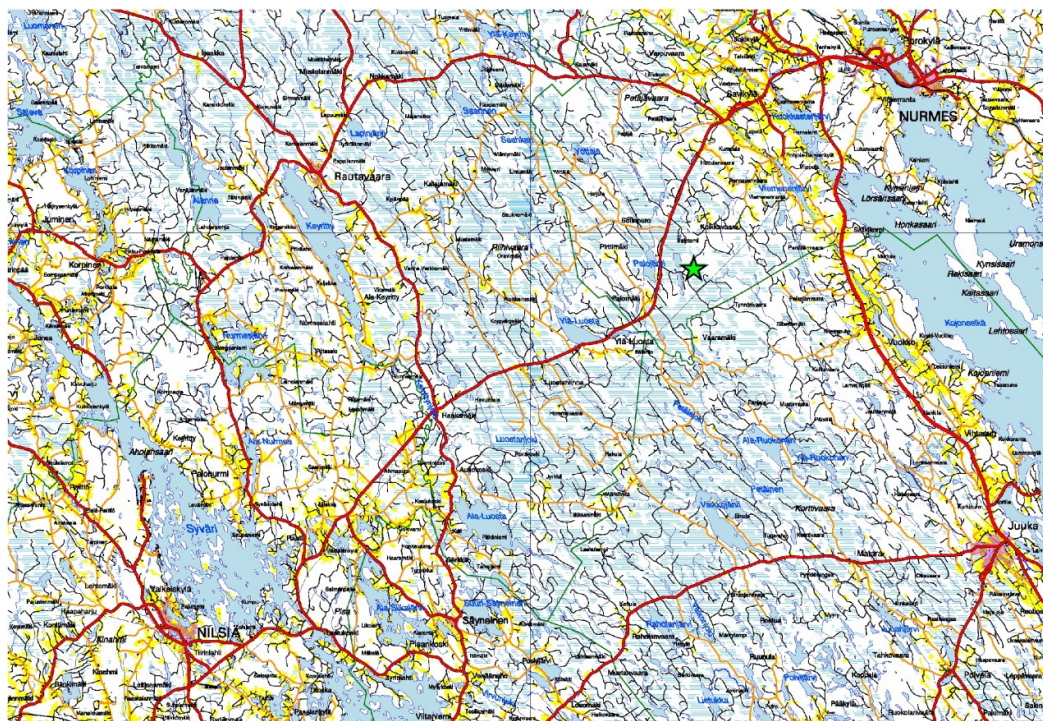
Laserkeilausaineistojen käyttökelpoisuuden testaaminen puunkorjuun suunnittelun apuvälineenä on varsin uusi tutkimusaihe. Haavisto ym. (2011) ja Uusitalo ym. (2012) testasivat vuonna 2010 kaukokartoitusaineistojen soveltuvuutta kantavuuden ennustamiseen turvemaan kesäaikaisessa puunkorjuussa. Tutkimuksessa saatiin viitteitä, että laserkeilausaineistoja voisi käyttää kantavuuden ennustamisessa. Lamminen ja Väättäin (2012) ovat kehittäneet laserkeilattuun korkeusmalliin perustuvaa korjuun suunnittelua avustavaa menetelmää metsäkoneen kuljettajille kivennäismaiden hakkuisiin. Mohtashami ym. (2012) ovat tutkineet kustannuspinta-analysillä laserkeilatun maanpintamallin hyödyntämistä ajourien reittisuunnittelussa kivennäismaalla.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia laserkeilausaineistojen hyödyntämistä turvemaan kantavuuden ja raiteenmuodostumisen ennustamisessa. Tutkimuksessa pyrittiin ennustamaan raiteen syvyyttä kahden laserkeilausaineiston puustoestimaattien, latvuksen korkeusmallien ja maanpintamallien sekä maastossa mitattujen puusto- ja maaperätunnusten avulla.

2 Aineisto ja menetelmät

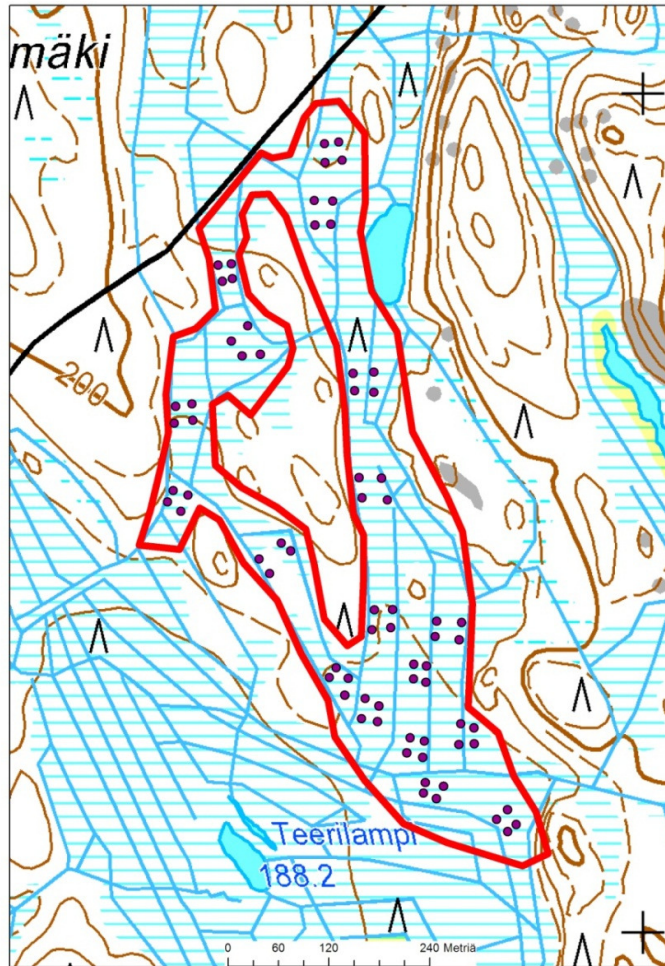
2.1 Tutkimusalue ja koealat

Tutkimus toteutettiin Pohjois-Karjalassa Nurmeksen Pitkäkankaan Teerisuolla (kuva 1). Koealue on noin 15 hehtaarin turvema-alue. Kohde oli luokiteltu Metsähallituksen järjestelmässä kesäkorjuukohteeksi. Koealueen läntinen osa on itäistä vaihtelevampi puustoltaan ja turpeen paksuudelta sekä kokonaisuutena puustoisempi ja ohutturpeisempi. Alueelle oli suunniteltu harvennushakkuu ja kunnostusojitus.

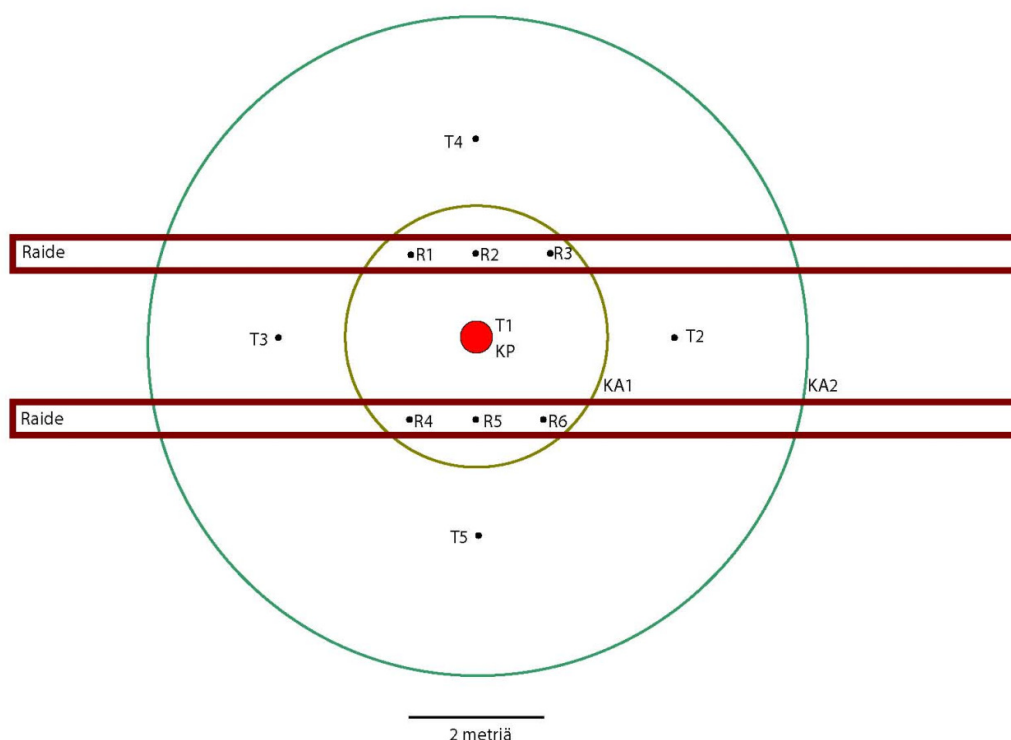


Kuva 1. Tutkimusalue sijaitsee Nurmeksen ja Nilsian välillä noin 25 kilometriä Nurmeksestä lounaaseen. ©Maanmittauslaitos lupa nro 6/MYY/13

Koealueelle sijoitettiin 72 koealapistettä tasaisesti neljän koealan ryppäissä (Kuva 2.). Koealojen sijainti mitattiin Trimble ProXH GPS-laitteella jälkikorjausta käyttäen tai mittaamalla koealan etäisyys ja suunta GPS-mittauspisteestä. Koealapisteen ympärille muodostettiin eri säteisiä ympyräkoaloja mittauksia varten (kuva 3). Puustokoealan säde oli viisi metriä. Kasvillisuuskoeealan säde oli kaksi metriä. Laserkeilausaineistojen koealojen säteet olivat viisi tai kymmenen metriä. Raiteiden syvyys ja leveys mitattiin koealalta kuudesta pisteestä. Turpeen paksuus ja leikkausmoduli mitattiin koealalta viidestä pisteestä.



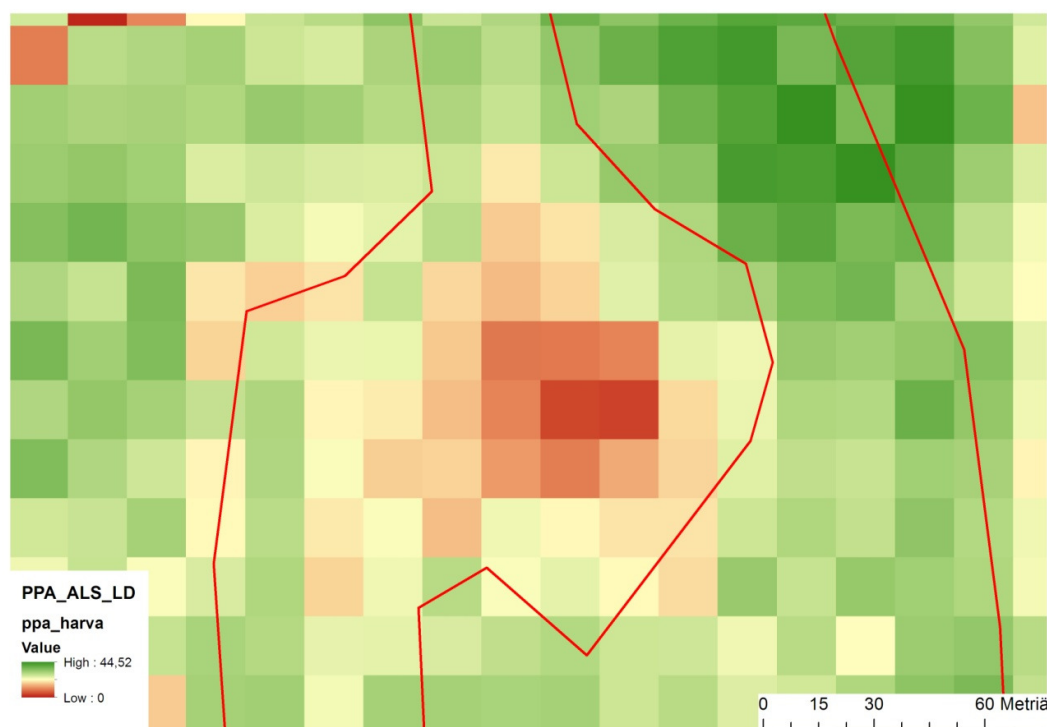
Kuva 2. Koealueen rajat (punainen viiva) ja koealojen sijainti (violetit pisteet).
©Maanmittauslaitos lupa nro 6/MYY/13



Kuva 3. Kaavio maastokoealasta. KP on koealan keskipiste, T1, T2, T3, T4 ja T5 ovat turpeen paksuuden ja leikkausmodulin mittauspisteitä, R1, R2, R3, R4, R5 ja R6 ovat raiteen syvyyden ja leveyden mittauspisteitä, KA1 on kasvillisuuden peittävyden koealan ympyrä (säde on kaksi metriä) sekä KA2 on puustokoealan ympyrä (säde on viisi metriä).

2.2 Laserkeilausaineistot

Tutkimuksessa käytettiin kahta eri tiheyksistä laserkeilausaineistoa. Harvapulssinen laserkeilaus toteutettiin Metsäkeskus Pohjois-Karjalan ja Metsähallituksen yhteishankintana laajalle alueelle Pohjois-Karjalan alueella. Harvapulssinen laserkeilaus suoritettiin lentokoneella 7.6.2011–7.7.2011. Käytetty keilain oli Leica ALS50II SN058 Freebird. Laserkeilauksen suoritti FM-International Oy. Laserkeilauksen lentokorkeus 2000 m ja nopeus 62 m/s. Keilauksen avauskulma oli 30 astetta, keilaustaajuus 30 Hz ja pulssitaajuus 59 kHz. Harvapulssisen laserkeilausaineiston tiheys oli noin 1 pulssi/m². Laserkeilauksen toteuttaja luovutti pisteaineiston LAS -formaattissa sekä tuottamansa maanpintamallin että latvuksen korkeusmallin TIFF-tiedostoina. Harvapulssisen laserkeilausaineiston puustotulkinnan tuotti Arbonaut Oy. Puustotunnukset esitettiin koko keilausalueelle ABA-menetelmällä noin 700–800 maastossa mitatun koealan aineistolla (Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon laatuseloste 2012). Puustotunnukset oli ennustettu 16 metrin pikselikoon hilaruudukkoon (kuva 4). Harvapulssisen laserkeilausaineiston puuston tilavuuden ($V_{ALS_LD_10}$) ja pohjapinta-alan ($PPA_{ALS_LD_10}$) estimaateilla käytettiin kymmenen metrin sädettä.



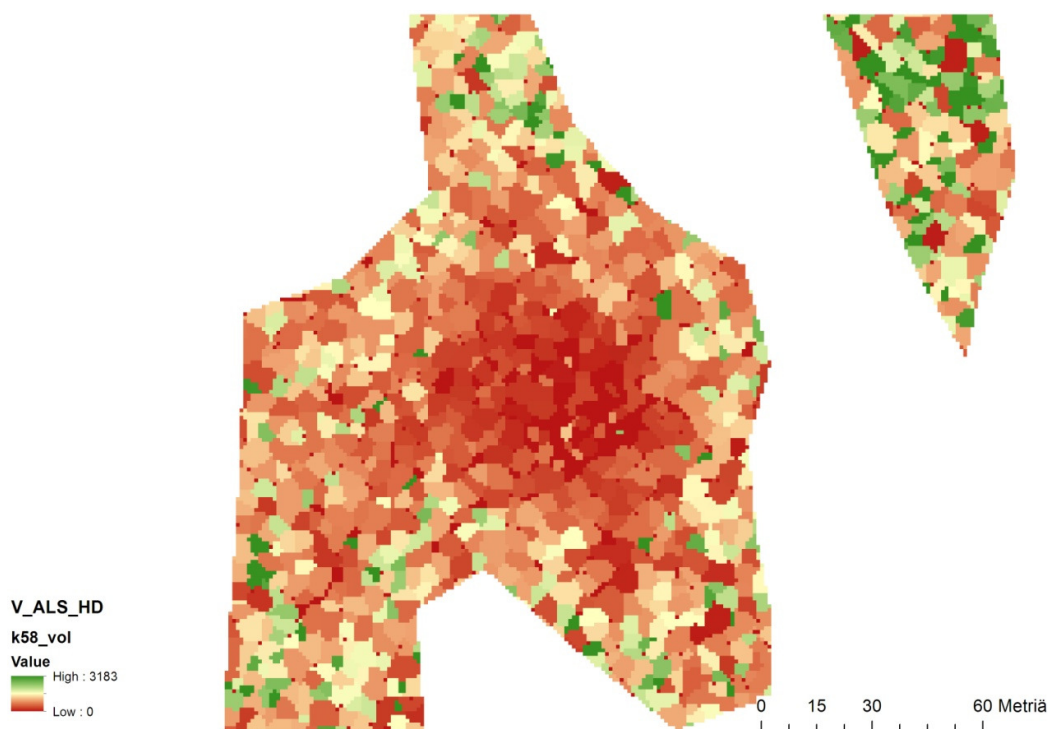
Kuva 4. Esimerkki harvapulssisen laserkeilausaineiston puuston pohjapinta-alan estimaatti rasterina. Tummanvihreät alueet ovat runsaspuustoisimpia ja tummanpunaiset alueet vähäpuustoisimpia.

Tiheäpulsinen laserkeilaus toteutettiin 28.6.2011 vain tätä tutkimusta varten. Laserkeilaus suoritettiin FM-International Oy. Keilaus lentokorkeus 2000 m ja nopeus 62 m/s. Keilaus avauskulma oli 30 astetta, keilaustaajuus 52 Hz ja pulssitaajuus 59 kHz. Käytetty keilain oli Leica ALS50II SN058 Freebird. Tiheäpulsisen laserkeilausaineiston tiheys oli noin 4 pulsia/m². Laserkeilaus toteutettiin luovutettiin pisteaineiston LAS -formaattina sekä tuotettiin maanpintamallin että latvuksen korkeusmallin TIFF-tiedostoina. Tiheäpulsinen laserkeilausaineistosta Helsingin yliopisto toteutti puustotulkinnan ryväsmenetelmää hyväksi käyttäen. Tätä tarkoitusta varten Metsäntutkimuslaitos toteutti erilliset maastomittaukset syksyllä 2011. Koealueelle muodostettiin kolme ositetta metsikkötyypin perusteella; räme, korpi ja kangas. Kunkin ositteeseen valittiin kolme kuviota ja näihin valittuihin kuvioihin sijoitettiin kuhunkin kolme koealaa. Koealan koko oli 10*30 m, ne sijoitettiin kohtisuoraan ojan suuntaan nähden siten, että suorakaiteen kapeampi 10 m sivu on ojan suuntaisesti. Yksi suorakaiteen peruskulmapiste määritettiin tarkkuus-GPS:n avulla ja muut kulmapisteet suuntakehän ja mittanauhan avulla. Suorakaiteen alueelta mitattiin kaikki vähintään 5 cm paksuiset pystyssä olevat elävät ja kuolleet puut. Puusta määritettiin puulaji, mitattiin rinnankorkeusläpimitta millimetrin tarkkuudella sekä puun x,y -koordinaatti suuntakehän ja mittanauhan avulla (rinnankorkeudelta ytimen kohdalta). Koealalta valittiin kaksi koepuuta per puulaji pituuskoepuiksi.

Maastossa mitatut opetuspuut liitettiin sijaintitiedon perusteella segmenteille (kuva 5). Yksi segmentti saattaa näin sisältää yhden puun, useamman puun tai ei yhtään puuta. Kaikki maastossa mitatut puut liitettiin lähimpään segmenttiin. Maastotietojen yleistäminen segmenteille tehtiin laserkeilausaineistosta laskettujen piirteiden avulla. Puuryväsmenetyksessä yleisesti käytettyjä piirteitä ovat normalisoitujen laserpisteiden (korkeuksia maanpinnasta) korkeusjakaumasta lasketut prosenttipisteet sekä korkeuden keskiarvo, suhteellisten korkeuksien tai prosenttipisteiden tiheydet, keskihajonta ja variaatiokerroin (Næsset 2002). Prosenttipisteet ovat alhaalta ylös laskettuja laserpisteiden korkeusjakauman arvoja, jotka kertovat, millä korkeudella

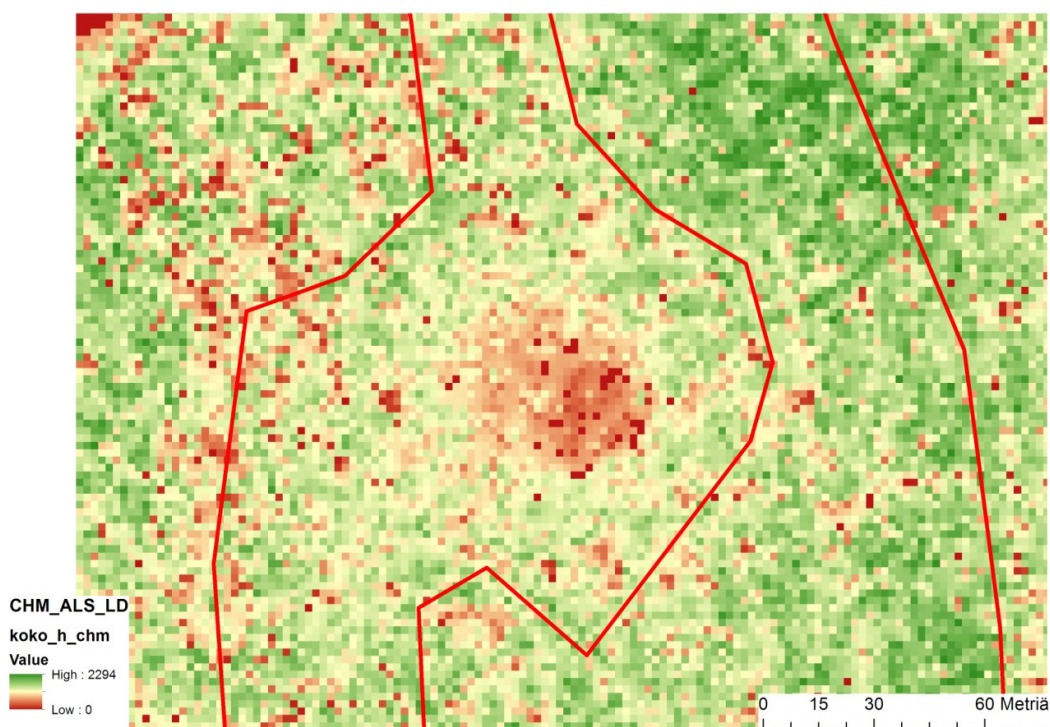
tietty kumulatiivinen osuus heijastuneista pisteistä on. Selittävässä muuttujana käytetään myös suhteellisia läpäisevyyksiä, eli kuinka suuri osa segmentille osuneista laserpulseista on heijastunut tietyn suhteellisen korkeuden yläpuolelta. Piirteet lasketaan erikseen eri paluukaiuille (esimerkiksi ensimmäisille ja viimeisille paluukaiuille). Maastokoealoilta mitattujen puiden tunnusten ja segmentin alalta irrotettujen laserpiirteiden välinen tilastollinen riippuvuus mallinnettiin käyttäen lähimmän naapurin ennustusmenetelmää (Nearest neighbor, NN).

Ryvästulkinnan toteuttamisen jälkeen korjuukuvion rajausta muutettiin. Tästä syystä ryvästulkinta toteutui vain osalle kuviota, 39 koealalle. Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston puuston tilavuuden ($V_{ALS_HD_10}$) ja pohjapinta-alan ($PPA_{ALS_HD_10}$) estimaateilla käytettiin kymmenen metrin sädettä.

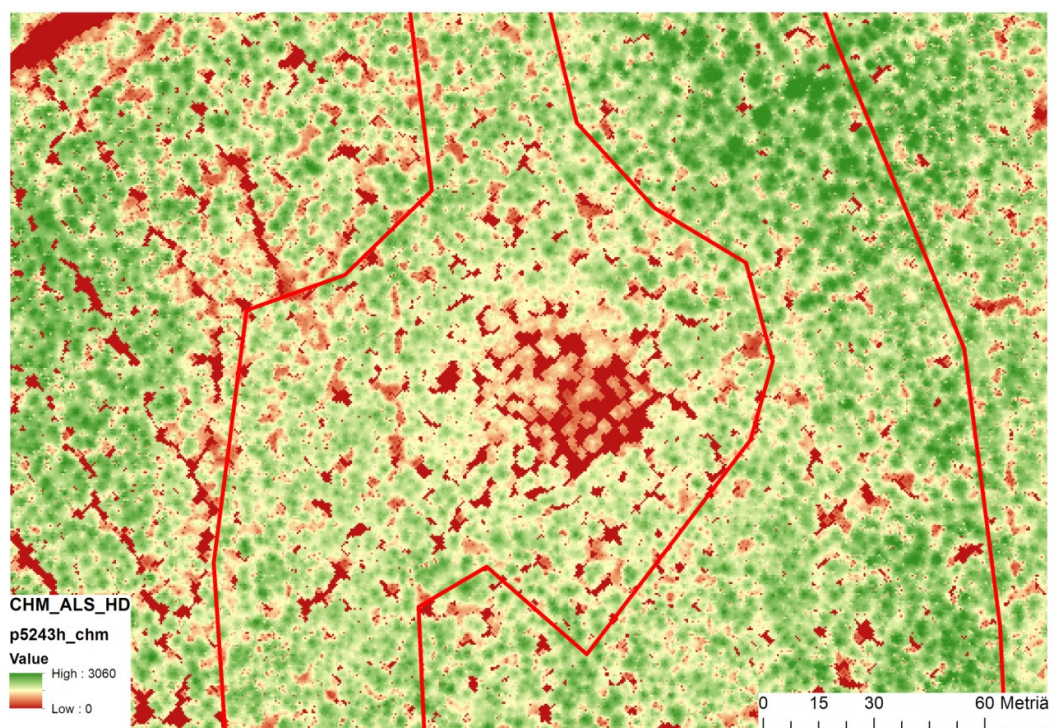


Kuva 5. Esimerkkialue tiheäpulssisen laserkeilausaineiston puuston tilavuuden estimaatin rasterista, jossa puusto on segmentoitu latvuksen perusteella. Tummanvihreät alueet ovat runsaspuustoisimpia ja tummanpunaiset alueet vähäpuustoisimpia.

Ennustettujen puustotunnusten lisäksi tutkimuksessa käytettiin laserkeilauksen toimittajan tuottamia latvuksen korkeusmalleja. Harvapulssisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallin pikselikoko oli 2 m ja tiheäpulssisen 0,5 m. Harvapulssisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallilla käytettiin viiden metrin sädettä ($CHM_{ALS_LD_5}$) ja tiheäpulssisella ($CHM_{ALS_HD_10}$) kymmenen metrin sädettä.

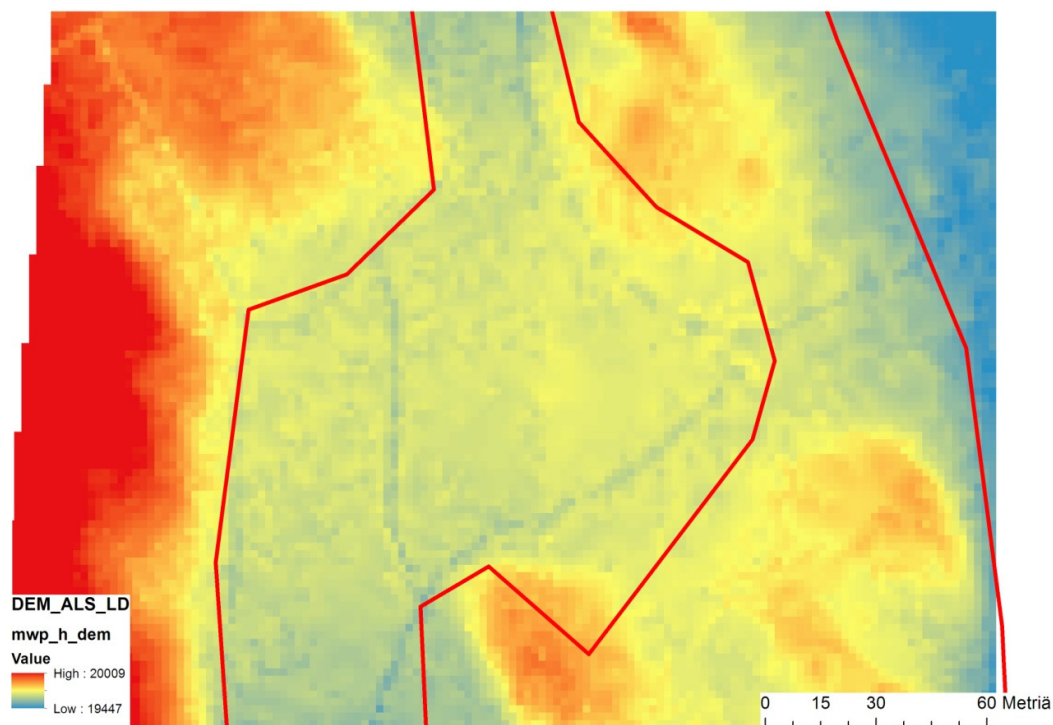


Kuva 6. Esimerkkialue harvapulssisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallista. Korkein kasvillisuus on tummanvihreää ja matalin kasvillisuus tummanpunaista.

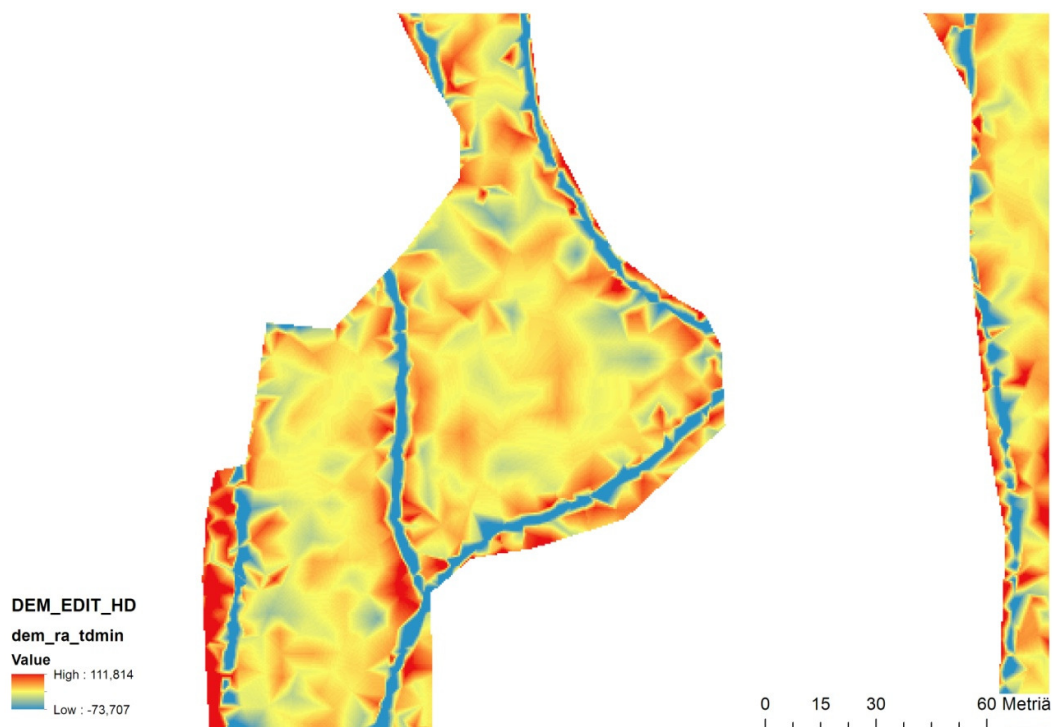


Kuva 7. Esimerkkialue tiheäpulsin laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallista. Korkein kasvillisuus on tummanvihreää ja matalin kasvillisuus tummanpunaista.

Puustotunnusten lisäksi tutkittiin maanpintamallin hyödyntämistä raiteenmuodostuksen ennustamisessa turvemaalla. Pintamallista tutkimuksessa käytettiin sekä alkuperäistä korkeutta merenpinnasta ennustavaa mallia (kuva 8) että pienialaiset korkeuserot huomioon ottavaa mallia, jossa pikselin korkeudesta merenpinnasta vähennettiin pikseliä ympäröivän 15 metrin säteisen ympyrän keskikorkeus (kuva 9). Korkeutta merenpinnasta kuvaavien pintamallien arvoina käytettiin koealapisteen arvoa (harvapulssinen laserkeilausaineisto DEM_{ORIG_LD} ja tiheäpulssinen laserkeilausaineisto DEM_{ORIG_HD}). Pienialaiset korkeuserot kuvaavan pintamallin arvoina käytettiin viiden metrin säteisen ympyrän keskiarvoa (harvapulssinen laserkeilausaineisto DEM_{EDIT_LD} ja tiheäpulssinen laserkeilausaineisto DEM_{EDIT_HD}).



Kuva 8. Esimerkkialue harvapulssisen laserkeilausaineiston pintamallista. Punaiset alueet ovat korkeammalla ja siniset matalimmalla.



Kuva 9. Esimerkkialue tiheäpulssisen laserkeilausaineiston pienialaiset korkeuserot esittävästä pintamallista. Mallissa on esitetty korkeuden erotus viidentoista metrin säteisen ympyrän keskiarvokorkeuteen. Punaiset alueet ovat korkeimmalla ja siniset alueet matalammalla.

2.3 Maastomittaukset

Puustotiedot mitattiin 79 m² ympyräkoeloilta. Puustoksi luettiin kaikki rinnankorkeusläpimitään yli 5 cm rungot. Jokaisesta rungosta mitattiin rinnankorkeusläpimitta ja joka kolmannesta rungosta pituus. Puustotunnukset laskettiin Koelajen puu- ja puustotunnusten laskentaohjelmalla (Heinonen 1994). Mitatuista puustotunnuksista käytettiin runkolukua ($Runkoluku_{MAASTO}$, kpl/ha), tilavuutta (V_{MAASTO} , m³/ha) ja pohjapinta-ala (PPA_{MAASTO} , m²/ha).

Turpeen paksuus ja leikkausmoduli mitattiin viidestä kohdasta koelalalta. Turpeen paksuus mitattiin kuusi metriä pitkällä turverassilla. Turverassin pituus riitti kahta koelaa lukuun ottamatta. Leikkausmoduli mitattiin Metsätutkimuslaitoksessa kehitetyllä piikkisiipikairalla (kuva 10, Ala-Ilomäki ym. 2011). Käytetyn piikkisiipikairan piikkien pituus oli 170 mm ja halkaisija 200 mm.



Kuva 10. Leikkausmodulin mittauksessa käytetty piikkisiipikaira. Kuva: Metla/Hannu Latvajärvi.

Turpeen kosteus mitattiin koelapisteestä neljällä mittauksella elävän sammalkerroksen alta. Mittauksissa käytettiin Delta-T ML2x ThetaKit-kosteusmittaria, jossa oli 60 mm:n piikit. Mittarin mittausaluetta korkeammat kosteudet luettiin 100 % kosteutena. Korkeimmat mittarista luetut tulokset olivat noin 99 %. Pohjavedenpinnan syvyys mitattiin jokaisesta koelapisteestä ennen hakkuuta. Pohjavedenpinnan syvyys mitattiin rei'itetystä muoviputkesta, joka oli asennettu noin kaksi kuukautta aiemmin.

2.4 Maastokoe

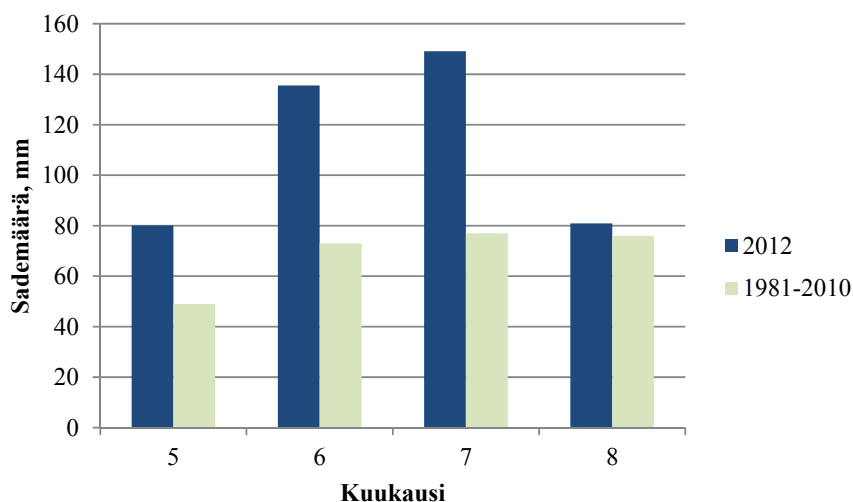
Maastokokeen puunkorjuu toteutettiin elokuussa 2012. Hakkuu toteutettiin kuusipyöräisellä John Deere 1070 –hakkuukoneella. Hakkuukone oli varustettu kantavilla teloilla telissä ja pyöräteloilla. Metsäkuljetus toteutettiin kahdeksanpyöräisellä Valmet 830.3 –kuormatraktorilla (kuva 10). Kuormatraktori oli varustettu kantavilla teloilla kuorman alla ja vetävillä teloilla ohjaamon alla. Kummalakin koneella oli yksi kuljettaja. Molemmat kuljettajat olivat kokeneita. Raiteen syvyys ja leveys mitattiin jokaisen ajokerran jälkeen. Raiteet mitattiin kuudesta kohdasta, koelapisteiden kohdalta sekä metrin koelapisteestä eteenpäin ja taaksepäin uralla molemmista raiteista. Laskennassa käytettiin raiteen syvyyden koalan keskiarvoa. Raiteen syvyyden mittaamisessa käytettiin apuna kaksijalkaista kampamaista telinettä, jonka jalat olivat raiteen ulkopuolella.



Kuva 11. Kuormatraktori koealalla. Kuva: Metla/Jari Ala-Ilomäki.

Hakkuu suoritettiin kokonaisuudessaan ennen metsäkuljetusta koealarypäs kerrallaan. Koealojen ympäristön puusto harvennettiin noin 30 metrin matkalla. Hakkuukoneella ajettiin läpi myös ne koealat, joilla ei ollut hakkuu tarvetta. Metsäkuljetuksessa koealat ajettiin ensin läpi tyhjällä kuormatraktorilla. Kuljettajaa ohjeistettiin ajamaan koealoilla mahdollisimman tarkasti aiempia raiteita noudattaen. Seuraavilla ajokerroilla kuormatraktorissa oli 6650 kg puutavarakuorma. Heikosta kantavuudesta johtuen kuormatulla kuormatraktorilla ei ajettu 16 koealalla. Nämä koealat olivat vähäpuustoisempia kuin koealat keskimäärin.

Sää tutkimusalueella oli hyvin sateinen koko kesän 2012. Kesän (toukokuu-elokuu) sateet olivat 285 millimetriä. Kesä- ja heinäkuun sateet olivat noin 1,9-kertaiset vuosien 1981 – 2010 keskiarvoon verrattuna (kuva 10). Kuukausittaiset ilman keskilämpötilat olivat vuonna 2012 lähes samat kuin vuosina 1980 – 2010. (Ilmatieteen laitos 2012) Puunkorjuu kohteella rajoitettiin pelkästään tutkimuskoealoille runsaista sateista ja märkyydestä johtuen. Hakkuun ja metsäkuljetuksen välisen ajan sademäärä kohteella oli 22 mm ja metsäkuljetuksen aikana 6 mm.



Kuva 12. Kuukausittaiset sademäärät vuonna 2012 ja vuosien 1981 – 2010 keskiarvo Rautavaaran Ylä-Luostassa. (Ilmatieteen laitos 2012)

2.5 Tilastollinen analyysi

Aineistot analysoitiin käyttäen korrelaatioanalyysiä sekä lineaarista regressioanalyysiä. Aineistot analysoitiin PASW Statistics 17.0-ohjelmalla. Tuloksista esitetään korrelaatiotaulut sekä regressiomalleja. Lineaariset regressiomallit laadittiin sekä yksittäisistä maastomittausten aineistoista että yksittäisistä laserkeilausaineistoista. Lisäksi laadittiin maastoaineiston perusteella kahden ja kolmen selittävän muuttujan malleja. Kaikkien mallien selitettävä muuttuja on kolmannen ajokerran jälkeinen raiteen syvyys (Raiteen syvyys_{AK3}).

Tutkimuksessa käytetyt mallit esitetään seuraavassa.

Yhden selittävän muuttujan mallit ovat muotoa:

$$y = a + bx, \quad (1)$$

missä y = kolmannen ajokerran jälkeinen raiteensyvyys, cm
 a = vakio
 b = selittävän muuttujan kerroin
 x = selittävän muuttujan arvo.

Kahden selittävän muuttujan mallit ovat muotoa:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2, \quad (2)$$

missä a = vakio
 x_1 = 1. selittävän muuttujan arvo
 x_2 = 2. selittävän muuttujan arvo
 b_n = selittävien muuttujien kertoimet.

Kolmen selittävän muuttujan malli on muotoa:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (3)$$

missä a = vakio
 x_1 = 1. selittävän muuttujan arvo
 x_2 = 2. selittävän muuttujan arvo
 x_3 = 3. selittävän muuttujan arvo
 b_n = selittävien muuttujien kertoimet.

3 Tulokset

3.1 Aineiston keskiarvot ja vaihtelu

Taulukossa 1 on esitetty maastossa mitattujen ja laserkeilausaineistojen puustotunnusten sekä pintamallien korkeuksien vaihtelu, keskiarvot ja keskihajonnat koelaloilla. Puuston tilavuuden ja pohjapinta-alan vaihteluväli ja keskiarvot ovat suurimpia maastossa mitatussa aineistossa. Tiheäpulsin laserkeilausaineiston puuston estimaattien vaihteluväli ja keskiarvot ovat pienem-

piä kuin harvapulssisen laserkeilausaineiston estimaattien. Harvapulssisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallin korkeuden vaihtelu ja keskiarvot ovat hieman suurempia kuin tiheäpulssisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallissa. Pintamallien vaihtelut ovat lähes samat eri laserkeilausaineistoilla. Muiden maastossa mitattujen tunnusten vaihtelua, keskiarvoja ja keskihajontoja on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 1. Puustotunnusten ja maanpintamallien korkeuksien vaihteluvälit, keskiarvot ja keskihajonnat kolmannen ajokerran koaloilla.

	N	Pienin	Suurin	Keskiarvo	Keskihajonta
Runkoluku _{MAASTO} , kpl/ha	56	630	4560	1660	800
V _{MAASTO} , m ³ /ha	56	64	340	180	9
V _{ALS LD 10} , m ³ /ha	56	97	300	170	39
V _{ALS HD 10} , m ³ /ha	34	61	210	130	33
PPA _{MAASTO} , m ² /ha	56	10	49	25	8,9
PPA _{ALS LD 10} , m ² /ha	56	15	36	23	4,1
PPA _{ALS HD 10} , m ² /ha	34	9	24	17	3,9
CHM _{ALS LD 5} , cm	56	630	1450	1080	170
CHM _{ALS HD 10} , cm	56	670	1360	1010	130
DEM _{ORIG LD} , m	56	192	197	194	1,1
DEM _{ORIG HD} , m	56	192	197	194	1,2
DEM _{EDIT LD} , cm	56	-10	12	1,2	4,6
DEM _{EDIT HD} , cm	56	-8,0	11	1,4	4,3

Taulukko 2. Kolmannen ajokerran koaloilta mitattujen tunnusten vaihteluvälit, keskiarvot ja keskihajonnat.

	Pienin	Suurin	Keskiarvo	Keskihajonta
Turpeen paksuus, cm	18	480	140	93
Leikkausmoduli, kPa	32	96	63	12
Pohjavedenpinnan syvyys, cm	3	38	19	7
Turpeen kosteus, VWC- %	44	100	72	17

Maastokokeessa ensimmäisen ajokerran raiteen keskisyvyys oli 4,5 senttimetriä, toisen ajokerran 6,7 senttimetriä ja kolmannen ajokerran 11,1 senttimetriä (taulukko 3). Neljäs ja viides ajokerta eivät ole vertailukelpoisia, koska ne ajettiin vain kantavimmilla koaloilla.

Taulukko 3. Maastokokeen ajokerrat, ajatut koalat ja raiteen syvyudet.

Ajokerta	Korjuukone	Koaloja	Keskimääräinen raiteen syvyys, cm
1	Hakkuukone	70	4,5
2	Kuormatraktori, ei kuormaa	68	6,7
3	Kuormatraktori, 6650 kg kuorma	56	11,1
4	Kuormatraktori, 6650 kg kuorma	24	12,4
5	Kuormatraktori, 6650 kg kuorma	4	9,2

3.2 Korrelaatioanalyysi

Raiteen syvyyden ja puuston tilavuuden korrelaatiot on esitetty taulukossa 4. Sekä mitatun puuston tilavuuden että laserkeilausaineistojen puuston tilavuuden estimaattien korrelaatiot raiteen syvyyden kanssa ovat negatiivisia. Mitatun puuston tilavuuden ja harvapulssisen laserkeilausaineiston korrelaatiot raiteen syvyyden kanssa ovat kohtalaisia ja lähes yhtä voimakkaita. Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston puuston tilavuuden estimaatin ja raiteensyvyyden välinen korrelaatio on erittäin heikko.

Mitatun puuston tilavuuden korrelaatio harvapulssisen laserkeilausaineiston kanssa on melko voimakasta ja tiheäpulssisen laserkeilausaineiston kanssa on kohtalainen. Puuston tilavuuden laserkeilaus estimaattien välinen korrelaatio on voimakasta.

Taulukko 4. Mitatun puuston tilavuuden, laserkeilausaineistojen puuston tilavuuden estimaattien ja kolmannen ajokerran raiteen syvyyden korrelaatiokertoimet (R), korrelaatiokertoimen merkitsevyysarvo (p) sekä otoksen koko (N).

		V_{MAASTO}	$V_{\text{ALS_LD_10}}$	$V_{\text{ALS_HD_10}}$
		R	R	R
		p	p	p
		N	N	N
Raiteen syvyys _{SAK3}	R	-0,359	-0,360	-0,060
	p	0,007	0,006	0,735
	N	56	56	34
V_{MAASTO}	R		0,630	0,547
	p		0,000	0,000
	N		72	39
$V_{\text{ALS_LD_10}}$	R			0,867
	p			0,000
	N			39

Raiteen syvyyden ja puuston pohjapinta-alojen korrelaatiot on esitetty taulukossa 5. Sekä mitatun puuston pohjapinta-alan että laserkeilausaineistojen pohjapinta-alan estimaattien korrelaatiot raiteen syvyyden kanssa ovat negatiivisia ja voimakkaampia kuin vastaavilla puuston tilavuuden arvoilla. Mitatun puuston pohjapinta-alan ja harvapulssisen laserkeilausaineiston pohjapinta-alan estimaatin korrelaatiot raiteen syvyyden kanssa ovat kohtalaisia. Tiheäpulssisen laserkeilausaineiston pohjapinta-alan estimaatin korrelaatio raiteen syvyyden kanssa on heikko.

Mitatun puuston pohjapinta-alan korrelaatio harvapulssisen laserkeilausaineiston pohjapinta-alan estimaatin kanssa on melko voimakasta ja tiheäpulssisen laserkeilausaineiston pohjapinta-alan estimaatin kanssa kohtalainen. Laserkeilausaineistojen pohjapinta-alan estimaattien välinen korrelaatio on voimakas.

Taulukko 5. Mitatun puuston pohjapinta-alan, laserkeilausaineistojen pohjapinta-alan estimaattien ja kolmannen ajokerran raiteen syvyyden korrelaatiokertoimet (R), korrelaatiokertoimen merkitsevyysarvo (p) sekä otoksen koko (N).

		PPA _{MAASTO}	PPA _{ALS_LD_10}	PPA _{ALS_HD_10}
		R	R	R
		p	p	p
		N	N	N
Raiteen syvyys _{SAK3}	R	-0,407	-0,386	-0,119
	p	0,002	0,003	0,503
	N	56	56	34
PPA _{MAASTO}	R		0,646	0,510
	p		0,000	0,001
	N		72	39
PPA _{ALS_LD_10}	R			0,827
	p			0,000
	N			39

Raiteen syvyyden ja latvuksen korkeusmallien korrelaatiot on esitetty taulukossa 6. Latvuksen korkeusmallien ja raiteen syvyyden korrelaatio on kohtalaista ja negatiivista. Latvuksen korkeusmallien välinen korrelaatio on voimakasta.

Taulukko 6. Latvuksen korkeusmallien ja kolmannen ajokerran raiteen syvyyden korrelaatiokertoimet (R), korrelaatiokertoimen merkitsevyysarvo (p) sekä otoksen koko (N).

		CHM _{ALS_LD_5}	CHM _{ALS_HD_10}
		R	R
		p	p
		N	N
Raiteen syvyys _{SAK3}	R	-0,321	-0,437
	p	0,016	0,001
	N	56	56
CHM _{ALS_LD_5}	R		0,839
	p		0,000
	N		72

Raiteen syvyyden ja maastossa mitattujen muuttujien korrelaatiot on esitetty taulukossa 7. Runkoluvulla, leikkausmodulilla ja pohjavedenpinnan syvyydellä on negatiivinen korrelaatio raiteen syvyyden kanssa. Turpeen paksuudella ja turpeen kosteudella on positiivinen korrelaatio raiteen syvyyden kanssa. Voimakkaimmin raiteen syvyyden kanssa korreloivat runkoluku, turpeen kosteus ja leikkausmoduli. Turpeen kosteus korreloi negatiivisesti ja melko voimakkaasti pohjavedenpinnan syvyyden kanssa.

Taulukko 7. Maastossa mitattujen muuttujien ja kolmannen ajokerran raiteen syvyyden korrelaatiokertoimet (R), korrelaatiokertoimen merkitsevyysarvo (p) sekä otoksen koko (N).

		Runkoluku, kpl/ha	Turpeen paksuus, cm	Leikkaus- moduli, kPa	Pohjave- denpinnan syvyys, cm	Turpeen kosteus, vwc- %
		R	R	R	R	R
		p	p	p	p	p
		N	N	N	N	N
Raiteen syvyys _{AK3}	R	-0,526	0,272	-0,391	-0,295	0,460
	p	0,000	0,043	0,003	0,027	0,000
	N	56	56	56	56	56
Runkoluku, kpl/ha	R		-0,291	0,133	0,509	-0,423
	p		0,013	0,265	0,000	0,000
	N		72	72	72	72
Turpeen paksuus, cm	R			-0,397	-0,349	0,425
	p			0,001	0,003	0,000
	N			72	72	72
Leikkausmoduli, kPa	R				-0,008	-0,046
	p				0,946	0,701
	N				72	72
Pohjavedenpinnan syvyys, cm	R					-0,665
	p					0,000
	N					72

Raiteen syvyyden ja pintamallien korrelaatiot on esitetty taulukossa 8. Kaikkien pintamallien korkeuksien korrelaatio kolmannen ajokerran raiteen syvyyden kanssa on negatiivinen. Korkeuden merenpinnasta esittävien mallien korkeuksien korrelaatio ensimmäisen ajokerran raiteen syvyyden kanssa on positiivinen. Korkeuden merenpinnasta esittävien mallien korrelaatiot ovat melko voimakkaita. Korkeuden merenpinnasta esittävien mallien välinen korrelaatio on hyvin voimakasta.

Taulukko 8. Pintamallien korkeuksien ja kolmannen ajokerran raiteen syvyyden korrelaatiokertoimet (R), korrelaatiokertoimen merkitsevyysarvo (p) sekä otoksen koko (N).

		DEM _{ORIG_LD}	DEM _{ORIG_HD}	DEM _{EDIT_LD}	DEM _{EDIT_HD}
		R	R	R	R
		p	p	p	p
		N	N	N	N
Raiteen syvyys _{AK3}	R	-0,342	-0,342	-0,202	-0,024
	p	0,010	0,010	0,135	0,860
	N	56	56	56	56
DEM _{ORIG_LD}	R		0,997	0,113	-0,081
	p		0,000	0,343	0,501
	N		72	72	72
DEM _{ORIG_HD}	R			0,092	-0,065
	p			0,442	0,588
	N			72	72
DEM _{EDIT_LD}	R				0,660
	p				0,000
	N				72

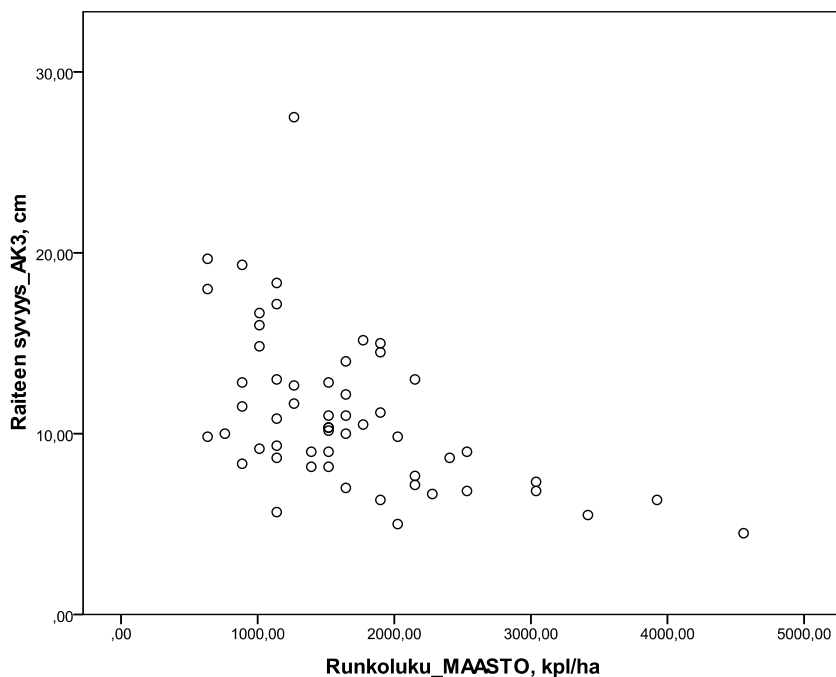
3.3 Regressioanalyysi

3.3.1 Raiteen syvyyden ennustaminen maastossa mitatun maasto- ja puustotiedon avulla

Maastossa mitatuista puusto- ja maastotunnuksista laadittiin lineaarisia regressiomalleja, joiden selitettävä muuttuja oli kolmannen ajokerran raiteen syvyys. Koko aineiston paras selittävä tunnus oli puuston runkoluku (kuva 11). Laadittu regressiomalli on esitetty seuraavassa:

	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Standardoitu regressiokerroin	p-arvo
Vakio	a	15,894	1,170		0,000
Runkoluku	b	-0,003	0,001	-0,0526	0,000

Muiden maastossa mitattujen tunnusten perusteella laaditut mallit ovat selitysasteen mukaisessa paremmuusjärjestyksessä turpeen paksuus, puuston pohjapinta-ala, leikkausmoduli, puuston tilavuus, pohjaveden pinnansyvyys ja turpeen paksuus. Laadittujen mallien tunnuksia on esitetty taulukossa 9.



Kuva 13. Kolmannen ajokerran jälkeisen raiteen syvyyden ja koealalta mitatun puuston runkoluvun välinen riippuvuus.

Taulukko 9. Maastossa mitatuista tunnuksista laadittujen kolmannen ajokerran raiteen syvyyttä selittävien regressiomallien otoksen koot, korrelaatiokertoimet, selityksasteet ja p-arvot.

Selittävä muuttuja	N	R	R ² , %	p-arvo	Keskihajonta
Runkoluku _{MAASTO} , kpl/ha	56	0,526	27,7	0,000	3,753
V _{MAASTO} , m ³ /ha	56	0,359	12,9	0,007	4,117
PPA _{MAASTO} , m ² /ha	56	0,407	16,6	0,002	4,029
Turpeen kosteus, VWC-%	56	0,460	21,1	0,000	3,918
Leikkausmoduli, kPa	56	0,391	15,3	0,003	4,061
Pohjaveden pinnansyvyys, cm	56	0,295	8,7	0,027	4,216
Turpeen paksuus, cm	56	0,272	7,4	0,043	4,246

Maastossa mitatuista tunnuksista laadittiin myös usean selittävän muuttujan lineaarisia regressiomalleja. Kahden selittävän muuttujan malleista parhaat olivat runkoluvun ja leikkausmodulin sekä runkoluvun ja turpeen kosteuden regressiomallit, joiden selityksasteet olivat 38 % ja 37 % edellä mainitussa järjestyksessä. Parhaassa regressiomallissa, jossa kaikki selittävät muuttujat olivat tilastollisesti merkitseviä (p-arvo < 0,05), oli selittävinä muuttujina runkoluku, leikkausmoduli ja turpeen kosteus:

	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Standardoitu regressiokerroin	p-arvo
Vakio	a	15,805	3,247		0,000
Runkoluku	b ₁	-0,002	0,001	-0,365	0,001
Leikkausmoduli	b ₂	-0,123	0,037	-0,335	0,002
Turpeen kosteus	b ₃	0,088	0,027	0,341	0,002

N	R	R ² , %	Keskihajonta
56	0,693	48,0	3,241

3.3.2 Raiteen syvyyden ennustaminen laserkeilausaineistojen avulla

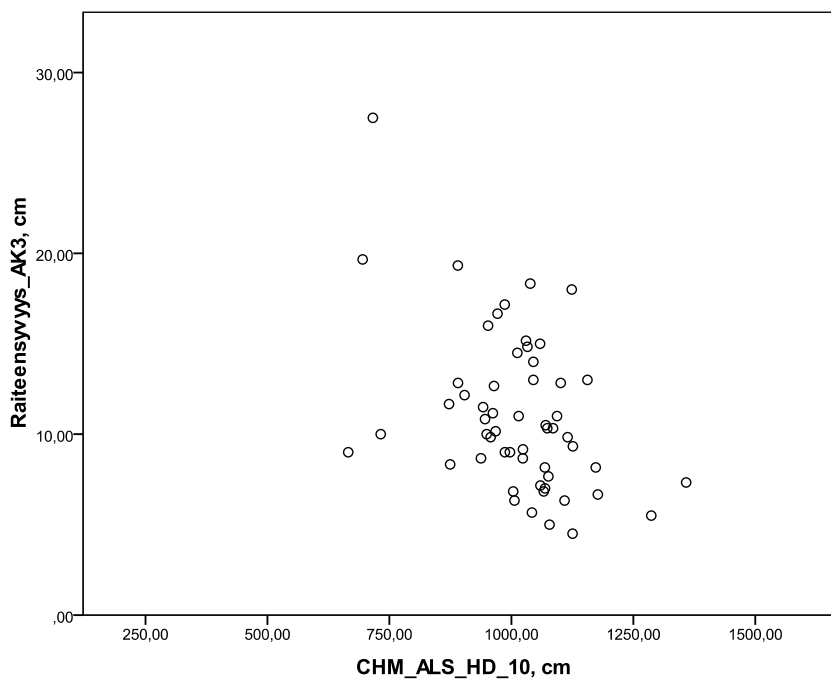
Laserkeilausaineistoista laadittiin kolmannen ajokerran jälkeisen raiteen syvyyttä selittäviä yhden selittävän muuttujan malleja. Loogisia ja tilastollisesti merkitseviä useamman selittävän muuttujan malleja ei laserkeilausaineistojen pohjalta tässä tarkastelussa löytynyt. Paras selittävä tunnus raiteen syvyydelle oli tiheäpulsin laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallin korkeus (kuva 12) mallilla:

	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Standardoitu regressiokerroin	p-arvo
Vakio	a	26,368	4,311		0,000
CHM _{ALS HD 10}	b	-0,015	0,004	-0,437	0,001

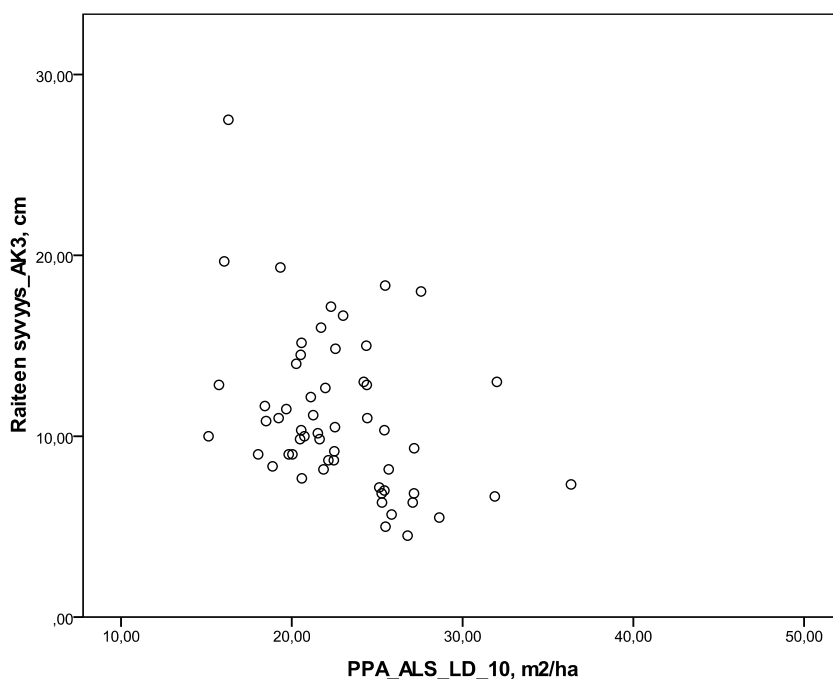
Paras harvapulssisen laserkeilausaineiston selittävä tunnus oli puuston pohjapinta-alan estimaatti (kuva 13). Aineiston pohjalta laadittiin seuraava malli:

	Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Standardoitu regressiokerroin	p-arvo
Vakio	a	20,477	3,104		0,000
PPA _{ALS} LD 10	b	-0,411	0,134	-0,386	0,003

Muiden laserkeilausaineistoista laadittujen regressiomallien tunnuksia on esitetty taulukossa 10.



Kuva 14. Kolmannen ajokerran jälkeisen raiteen syvyyden ja tiheäpulsseisen laserkeilausaineiston latvuk-
sen korkeusmallin keskikorkeuden välinen riippuvuus.



Kuva 15. Kolmannen ajokerran jälkeisen raiteen syvyyden ja harvapulssisen laserkeilausaineiston pohjapinta-alan estimaatin välinen riippuvuus.

Taulukko 10. Laserkeilausaineistoista laadittujen kolmannen ajokerran raiteen syvyyttä selittävien regressiomallien otoksen koot, korrelaatiokertoimet, selitysasteet ja p-arvot.

Selittävä muuttuja	N	R	R ² , %	p-arvo	Keskihajonta
V _{ALS LD 10} , m ³ /ha	56	0,360	12,9	0,006	4,116
V _{ALS HD 10} , m ³ /ha	34	0,060	0,4	0,735	3,941
PPA _{ALS LD 10} , m ² /ha	56	0,386	14,9	0,003	4,071
PPA _{ALS HD 10} , m ² /ha	34	0,119	1,4	0,503	3,962
CHM _{ALS LD 10} , cm	56	0,321	10,3	0,016	4,178
CHM _{ALS HD 10} , cm	56	0,437	19,1	0,001	3,968
DEM _{ORIG LD} , m	56	0,342	11,7	0,010	4,146
DEM _{ORIG HD} , m	56	0,342	11,7	0,010	4,146
DEM _{EDIT LD} , cm	56	0,202	4,1	0,135	4,321
DEM _{EDIT HD} , cm	56	0,024	0,1	0,860	4,411

4 Tulosten tarkastelu

Kokeen tuloksiin vaikuttivat tyypilliset järjestettyyn maastokokeeseen liittyvät seikat. Koe järjestettiin vain yhdellä alueella, joten tutkimusaineisto on suppea. Koalueella oli kuitenkin suuri vaihtelu puustossa ja turpeen paksuudessa. Runsaat sateet kesän 2012 aikana heikensivät kantavuutta koko alueella. Heikosta kantavuudesta johtuen ajokertojen määrää jouduttiin rajoittamaan kokeessa ja osa koaloista jouduttiin jättämään kolmannen ajokerran aineiston ulkopuolelle. Heikoimmin kantavien koalojen poisjäänti aineistosta pienensi vaihtelua ja vaikutti todennäköisesti laadittujen mallien selitysasteisiin heikentävästi.

Metsäkuljetuksessa kuormatraktorilla ajettiin vain koealojen läpi eli normaalin puun kuormausesta johtuvia pysähtymisiä ja liikkeelle lähtöjä ei ollut. Läpi ajamisella pyrittiin pienentämään ajamisesta johtuvaa vaihtelua. Koealoille kohdistunut räsitus oli vakio kaikilla koealoilla. Koealoilla ajettiin vain tutkimuksen ajokerrat ja käytettiin koko ajan samaa puutavarakuormaa.

Turpeen kosteus mitattiin vain pieneltä alueelta maatuneen turpeen yläpinnasta. Mittarin piikit olivat vain 60 millimetriä pitkät. Mittarin antamat hyvin korkeat yli 95 % kosteusarvot ovat mahdollisia, mutta kosteuden vaihtelu lienee suuntaa antava. Runsaiden sateiden vaikutusta kosteuden mittaamiseen ja kosteuden vaihteluun ei tunneta. Turpeen kosteus ennusti raiteen syvyyttä paremmin kuin pohjavedenpinnan syvyys. Myös Ala-Ilomäki (2006) totesi turpeen pintakosteuden olevan parempi ennustaja kuin pohjavedenpinnan syvyys ennustettaessa levykuormituslaitteella mitattavaa kimmokerrointa.

Puuryväsmenetelmällä toteutettu puustotulkinta tiheäpulsisesta laserkeilausaineistoista ei toiminut ennustettaessa kolmannen ajokerran raiteen syvyyttä. Tiheäpulsisen laserkeilausaineiston puustoestimaattien korrelaatiot olivat mitatun puuston kanssa likimain yhtä voimakkaita kuin harvapulsisen laserkeilausaineiston puustoestimaattien korrelaatiot, jotka ennustivat kolmannen ajokerran raiteen syvyyttä huomattavasti paremmin. Ryvästulkinnan puustoestimaattien arvot ja niiden vaihteluväli olivat merkittävästi pienemmät kuin maastossa mitattujen puustotunnusien tai harvapulsisen laserkeilausaineistojen alapohjaisien puustoestimaattien, joten ryvästulkinta ei täysin tavoittanut puuston vaihtelua tutkimusalueella.

Puuryväsmenetelmä toimii yksinpuintulkinnan tavoin oletettavasti parhaiten varttuneissa metsissä. Periaatteessa, kun segmentin sallitaan sisältää useampia puita, menetelmän pitäisi pystyä tuottamaan harhattomia tuloksia myös useampijaksoisissa metsissä. Maastokoealoilta mitattujen puiden tunnusten ja segmentin alalta irrotettujen laserpiirteiden välinen tilastollinen riippuvuus mallinnettiin lähimmän naapurin ennustusmenetelmällä (Breiman 2001). Ei-parametristen menetelmien ennusteet ovat herkkiä maastoaineiston kattavuudelle, sillä ne perustuvat täysin opetusaineistoon. Puuryväsmenetelmässä maastoaineiston paikannustarkkuus on erittäin tärkeässä asemassa. Maastossa mitatut opetuspuut pitää pystyä liittämään luotettavasti lasersegmenteille. Puuryväsmenetelmän käyttö käytännön sovelluksissa tarvitsee lisätutkimusta.

Maastossa mitattuihin puustoaineistoihin, harvapulsisen laserkeilausaineiston puuston estimaatteihin ja latvuksen korkeusmalleihin perustuvat regressiomallit olivat loogisia ja tukivat oletusta, että runsaspuustoiset alueet ovat kantavampia kuin vähäpuustoiset. Regressiomallien trendit raiteen syvyydessä olivat selvästi laskevia puuston määrän lisääntyessä. Kaikilla aineistoilla puuston pohjapinta-ala oli parempi ennustaja raiteen syvyydelle kuin puuston tilavuus. Myös Uusitalon ym. (2012) tutkimus tukee pohjapinta-alan paremmuutta. Tiheäpulsisen laserkeilausaineiston latvuksen korkeusmallin paremmuus harvapulsisiin aineistoihin verrattaessa antaa viitteitä, että tiheämmällä aineistolla voidaan saavuttaa tarkempia ennusteita. Puuston runkolukua lukuun ottamatta maastossa mitattujen puustotunnusten ja laserkeilausaineistojen puustoestimaattien latvuksen korkeusmallien regressiomallien selitysasteet olivat samantasoisia, joten laserkeilausaineistot selvisivät ennusteissa hyvin maastossa mitattuihin tunnuksiin verrattuna. Kolmen selittävän muuttujan malli, jossa selittäjinä olivat puuston runkoluku, leikkausmoduli ja turpeen kosteus, ennusti raiteen syvyyttä varsin hyvin. Laserkeilausaineistojen malleja voisi tukea, jos niihin voisi lisätä kaukokartoitusaineistoista selittäjän, joka ennustaisi turpeen kosteutta.

Pintamalli jäi tutkimuksessa heikoksi selittäjäksi raiteen syvyydelle. Koealueella oli ilmeisesti kivennäismaan rajaamia altaita, jotka vaikuttivat veden valumiseen suossa. Ilmeisissä altaissa,

joista yksi oli koealueen korkeimmalla kohdalla, oli kosteampaa ja puuston kasvu ollut heikom-
paa kuin voisi olettaa korkeusaseman perusteella. Ensimmäisen ajokerran raiteen syvyyden
positiivinen korrelaatio vaihtui kolmannella ajokerralla negatiiviseksi, kun yläosan heikosti
kantavilla koealoilla ei voitu ajaa kolmatta ajokertaa.

Raiteenmuodostuksessa on paljon tekijöitä, joita ei tässä tutkimuksessa voitu selvittää. Turve-
maan rakenne ja hyvin pienialainen vaihtelu voivat vaikuttaa raiteenmuodostukseen merkittä-
västi. Kuljettajien työtä ei tutkimuksessa seurattu, mutta kuljettajat ohjeistettiin toimimaan sa-
malla tavoin joka koealalla. Raiteenmuodostukseen vaikuttaa myös ennen koealaa ajosuunnassa
olevat painumat, joista maanpinnalle nouseminen lisää raiteenmuodostusta. Raiteen syvyyden
mittaamiseen ja mittauspisteen maanpinnan korkeuden arviointiin liittyy epävarmuustekijöitä,
jotka voivat vaikuttaa varsinkin matalia raiteita mitattaessa. Mittauksen referenssipinnan korke-
us arvioitiin raiteen sivussa olevien pisteiden avulla, joiden korkeus voi muuttua runsaan rasi-
tuksen ja raiteenmuodostuksen johdosta.

Jatkotutkimukset tulisi toteuttaa laajemmalla aineistolla. Laajemmassa aineistossa olisi hyvä
olla enemmän vaihtelua puustossa sekä vaihtelua säässä ja kosteusolosuhteissa. Kantavammissa
olosuhteissa voisi uria kuormittaa enemmän ja tutkia paremmin aineiston käyttöä kokoaja- ja
varastourien suunnittelussa. Erillisten laserpiirteiden tai latvuksen korkeusmallin eri piirteiden
käyttäminen ennustamisessa, joko yksittäin tai lisänä malleissa, voisi parantaa malleja. Laa-
jemmalla aineistolla voisi laatia yleistettävämpiä malleja, joita voisi hyödyntää käytännön
puunkorjuussa.

Laserkeilausaineistojen käyttömahdollisuudet turvemaiden puunkorjuun suunnittelussa vaikut-
tavat lupaavilta. Aineistoihin pohjautuva ennakkotieto antaa hakkuukoneen kuljettajalle mah-
dollisuuksia kohteen suunnitteluun ilman maastossa käyntiä. Vaikka kuormatraktori aiheuttaa
syvimmät urat puunkorjuussa, hakkuussa tehdyt valinnat vaikuttavat oleellisesti korjuun onnis-
tumiseen. Laserkeilausaineistoilla voi olla monia käyttömahdollisuuksia puunkorjuun suunnitte-
lussa. Latvuksenkorkeusmallista tai puustoestimaatista voidaan laatia kartta, jonka avulla kuljet-
taja voi suunnitella uraston. Korjuukohde voidaan myös luokitella eri tavoin. Osa korjuukuvios-
ta voidaan rajata korjuun ulkopuolelle ja osoittaa sekä heikosti että paremmin kantavat alueet.
Ennustettuun raiteenmuodostukseen perustuen voidaan laatia esimerkiksi kartta, jossa on määri-
telty sallitut ajokerrat kuvion eri osissa. Laserkeilausaineistot muodostanevat hyvän pohjan
myös automaattisen uraston suunnittelun kehittämiseksi. Hakkuukoneen kuljettajaa voidaan
laserkeilausaineiston pohjalta ohjeistaa myös puuston määrän ja tavoitepuuston osalta.

Lähteet

Ala-Ilomäki, J. 2006. The Effect of Weather Conditions on the Trafficability of Unfrozen Peat-
lands. *Forestry Studies - Metsanduslikud Uurimused* 45:57–66.

Ala-Ilomäki, J., Högnäs, T., Lamminen, S. & Sirén, M. 2011. Equipping a Conventional
Wheeled Forwarder for Peatland operations. *International Journal of Forest Engineering*
22(1):7–13.

Breidenbach, J., Næsset, E., Lien, V., Gobakken, T & Solberg, S. 2010. Prediction of species
specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach

based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 114:911–924

Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45 (1): 5–32.

Haavisto, M., Kaakkurivaara, T. & Uusitalo, J. 2011. Älykkyyttä puunkorjuun suunnitteluun– Laserkeilaus- ja paikkatietoaineistojen hyödyntämismahdollisuudet turvemaaleimikon ennakkosuunnittelussa. Metlan työraportteja 201. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp201.htm>

Heinonen, J. 1994. Koealojen puu- ja puustotunnusten laskentaohjelma KPL käyttöohje. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 504. 79 s.

Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M. & Hyyppä, H. 2011a. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(3):128–149.

Holopainen, M., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2011b. Lasermittaukset metsävarojen hallinnassa. Opetusmoniste, Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos.

Hyyppä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanning. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16(2):27–42

Högnäs, T. 1997. Puunkorjuu turvemaalla. Metsähallituksen aikaisemman kokeilutoiminnan tuloksia. Metsähallitus. Metsätalouden kehittämissyksikön tiedote 2. 12 s.

Högnäs, T., Kumpare, T. & Kärhä, K. 2011. Turvemaaharvennusten korjuukelpoisuusluokitus. Metsätehon tulosalvosarja 3/2011. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_03_Turvemaaharvennusten_korjuukelpoisuusluokitus_kk_th_tk.pdf

Ilmatieteen laitos. 2012. Säätilastot, Rautavaara, Ylä-Luosta.

Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. & Pitkänen, J. 2007. Suomen metsävarat metsäkeskuksittain 2004–2006 ja metsävarojen kehitys 1996–2006. *Metsätieteen aikakauskirja* 2B/2007: 149–213.

Lamminen, S. & Väätäinen, K. 2012. Laserkeilattu maasto- ja puustomalli kuljettajan avuksi. *Koneyrittäjä* 8: 16-17.

Metsätilastollinen vuosikirja 2001. 2001. Metsäntutkimuslaitos. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2001/index.html>

Mohtashami, S., Bergkvist, I., Löfgren, B. & Berg, S. 2012. A GIS Approach to Analyzing Off-Road Transportation: a Case Study in Sweden. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(2):275-284.

Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80:88–99.

Peuhkurinen, J. 2011. Estimating tree size distributions and timber assortment recoveries for wood procurement planning using airborne laser scanning. *Dissertationes Forestales* 126. 43s.

Sirén, M., Ala-Ilomäki, J. & Högnäs, T. 1987. Harvennuksiin soveltuvan metsäkuljetuskaluston maastokelpoisuus. *Folia Forestalia* 692. 60 s.

Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon laatuseloste. 2012. Suomen metsäkeskus.

Uusitalo, J., Kaakkurivaara, T. & Haavisto, M. 2012. Utilizing Airborne Laser Scanning Technology in Predicting Bearing Capacity of Peatland Forest. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(2): 329-337.

Uusitalo, J. & Ala-Ilomäki, J. 2013. The Significance of Above Ground Biomass, Brash Mat, Moisture Content and Mechanical Properties of Peat and Root Layer on the Bearing Capacity of Ditched Pine Mires. Käsikirjoitus referoitavana.

Vastaranta, M., Kankare, V., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2012. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67:73–79.