Metlan työraportteja 201
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp201.htm
ISBN 978-951-40-2299-9 (PDF)
ISSN 1795-150X

Älykkyyttä puunkorjuun suunnitteluun

– Laserkeilaus- ja paikkatietoaineistojen hyödyntämismahdollisuudet turvemaaleimikon ennakkosuunnittelussa

Maarit Haavisto, Tomi Kaakkurivaara ja Jori Uusitalo

METLA www.metla.fi

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.

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 2103
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija
Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2103
sähköposti info@metla.fi
http://www.metla.fi/

Tekijät
Maarit Haavisto, Tomi Kaakkurivaara ja Jori Uusitalo

Nimeke
Älykkyyttä puunkorjuun suunnitteluun – Laserkeilaus- ja paikkatietoaineistojen hyödyntämismahdollisuudet turvemaaleimikon ennakkosuunnittelussa

Vuosi	Sivumäärä	ISBN	ISSN
2011	18	978-951-40-2299-9 (PDF)	1795-150X

Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet
Länsi-Suomen alueyksikkö / Suometsienhyödyntäminen / 7324

Hyväksynyt
Antti Asikainen, professori, 11.5.2011

Tiivistelmä
Kaukokartoitusaineiston hyödyntäminen metsäsuunnittelussa on lisääntynyt viime vuosina. Tarjolla oleva aineisto on parantunut niin paljon, että kaukokartoitusmateriaalin avulla tehtävää ennakkosuunnittelua on kannattanut lisätä myös käytännön metsätalouden piirissä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, missä määrin tänä päivänä käytössä olevilla laserkeilaus- ja paikkatietoaineistoilla voidaan ennustaa leimikon kantavuutta ja kuinka hyödyllistä luotava ennakkoinformaatio on puunkorjuoperaatioiden toteuttamisen kannalta.

Tutkimuksessa saatiin vahva viittaus siihen, että yksittäisen maastokohdan suopinnan korkeudella ja puuston tilavuudella on vaikutusta tämän maastokohdan kantavuuteen. Puusto ja suopinnan korkeus eivät kuitenkaan pysty kokonaan selittämään eroja suon kantavuudessa, vaan on olemassa joukko muita tekijöitä, jotka vaikuttavat maaston kantavuudeen. Laserkeilauksen käyttökelpoisuutta korjuun suunnittelun apuvälineenä turvemaakohteissa voidaan pitää varsin lupaavana. Samanaikaisesti on kuitenkin jatkettava perustutkimusta, jossa selvitetään kaikkien mahdollisten eri tekijöiden vaikutusta suon kantavuuteen (kosteus, turpeen ominaisuudet, kenttäkerroksen kasvillisuus, jne).

Asiasanat
Laserkeilaus, turvemaan kantavuusluokittelu, leimikon ennakkosuunnittelu

Julkaisun verkko-osoite
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp201.htm

Tämä julkaisu korvaa julkaisun

Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla

Yhteydenotot
Tomi Kaakkurivaara, Metsäntutkimuslaitos, Kaironiementie 15, 39700 Parkano.
Sähköposti tomi.kaakkurivaara@metla.fi

Muita tietoja
taitto: Anne Siika

Sisällys

Alkusanat **5**

1 Johdanto **6**

2 Aineisto ja menetelmät **7**

3 Tulokset **10**

3.1 Kantavuutta ennustavien parametrien ja hakkuukoneen ajourapainuman välinen riippuvuus 10

3.2 Kantavuutta ennustavien parametrien ja lähikuljetuksen aiheuttaman ajourapainuman välinen riippuvuus 12

3.3 Hakkuukoneen tuottaman paikkatietoinformaation käyttökelpoisuus lähikuljetuksen suunnittelun apuvälineenä 14

4 Tulosten tarkastelu **15**

Lähteet **17**

Liite **18**

Alkusanat

Metsäntutkimuslaitoksen ja Metsähallituksen yhteishankkeessa Suometsien hyödyntäminen asetettiin tavoitteeksi kartoittaa ja analysoida ”älykkäiden teknologioiden” hyödyntämismahdollisuuksia turvemaiden puunkorjuun suunnittelussa. Aihetta lähestyttiin asiantuntijakuulemisten avulla. Asiantuntijapaneeleissa arvioitiin eri teknologioiden käyttökelpoisuutta, saavutettuja hyötyjä sekä vaadittavan tuotekehityspanoksen suuruutta. Tutkimukseen osallistuvat asiantuntijat edustivat hyvin laajasti sekä teknistä osaamista että puunkorjuun toteuttamisen ammattilaisia. Asiantuntijapaneeleihin osallistuivat seuraavat henkilöt: Heikki Savolainen ja Ari Siekkinen (Metsähallitus), Timo Ylänen (Komatsu Forest Oy), Kalle Seppi (John Deere Forestry Oy), Jukka-Pekka Syvälahti (ProSilva Oy), Antti Suvinen (Stora-Enso Metsä Oy), Juha Sibakow (Realmachine Oy), Heimo Ihalainen (TTY) sekä tutkijat Tomi Kaakkurivaara ja Jori Uusitalo (Metla).

Asiantuntijapaneeleiden arvioinnin perusteella luotiin arvio, että seuraavat kaksi hyödyntämiskelpoista ideaa kannattaa asettaa lisätutkimuksien kohteeksi:
- Puunkorjuun ennakkosuunnittelutyökalu, jossa laserkeilattu puustotieto, laserkeilattu maastokorkeustieto, hydrologiamallit sekä maaperäkartat yhdistetään ja luodaan leimikolle paikkatietomatriisi, jossa jokaiselle matriisin solulle tehdään kantavuusennuste
- Puuston hakkkuuvaiheessa syntyneen, hakkuukoneen tuottaman, informaation hyödyntäminen leimikon lähikuljetuksen suunnittelun apuvälineenä.

Saadun asiantuntijapalautteen ansiosta päätettiin testata näiden ideoiden toteuttamismahdollisuuksia käytännössä. Tämän hankkeen puitteissa suoritetut testaukset rajoittuivat yhteen leimikkokokonaisuuteen, Vuorijärven suolle, joka sijaitsee Helsingin yliopiston Hyytiälän kenttäaseman läheisyydessä. Suorittamamme kokeet liittyvät lähinnä ensimmäisenä mainitun tutkimusidean laserkeilaus- ja paikkatietoaineistojen hyödyntämismahdollisuuksien testaamiseen turvemaaleimikoiden ennakkosuunnittelussa.

Hakkuukoneen tuottaman informaation hyödyntämismahdollisuuksia testataan laajasti Metsäntutkimuslaitoksen muissa käynnissä olevissa hankkeissa. Näissä hankkeissa testataan mm. utraäänimittauksen sekä hakkuukoneen tuottaman moottoritehon hyödyntämistä metsikön kulkukelpoisuuden arvioinnissa. Lisäksi Metsäntutkimuslaitoksessa on kehitetty ja testattu LOGTRACK-työkalua, jolla voidaan suunnitella optimaalisia lähikuljetusreittejä ja reitistöjä tilanteessa, jossa maaperän kantavuus asettaa lähikuljetukselle merkittäviä rajoitteita.

Kiitämme kaikkia tutkimushankkeen toteuttamiseen osallistuvia henkilöitä ja organisaatioita saamastamme avusta. Erityisesti haluamme kiittää Metsähallitusta, John Deereä, Hyytiälän kenttäasemaa, yrittäjä Matti Mäkelää sekä metsäkoneen kuljettajia Eino Nieminen (PMT Mäkelä) ja Petri Lahtinen (John Deere), joiden avustuksella käytännön operaatiot toteutettiin. Lisäksi haluamme kiittää Reija Haapasta, Ilkka Korpelaa, Juho Pitkästä ja Sakari Tuomista avusta laserkeilausaineiston analysoinneissa ja muokkaamisessa.

Parkanossa 1.12.2010

Tutkimuksen tekijät

1 Johdanto

Hakkuupotentiaali turvemailla on kasvanut 1900-luvun puolessa välissä tehtyjen laajojen ojitusten myötä. Tällä hetkellä jo noin viidennes Suomen hakkuupotentiaalista on turvemailla (Nuutinen ym. 2007). Erityisesti ensiharvennusvaiheessa olevia leimikoita on runsaasti. Turvemaiden puunkorjuuta on pyritty kehittämään muun muassa valmistamalla niille paremmin soveltuvia, pienempiä ja kantavampia koneita sekä parantamalla koneiden teloja. Högnäsin (1997) mukaan ongelma on kuitenkin teknisen sijaan taloudellinen. Suopuun korjuuseen on jo olemassa teknisesti toimivia ratkaisuja, mutta ne eivät ole välttämättä taloudellisesti kannattavia. Tästä syystä tulisi panostaa erityisesti suopuukorjuun suunnitteluun ja toteutukseen sekä uusiin innovaatioihin.

Valtaosa turvemaiden hakkuista tehdään tällä hetkellä talvikaudella, jolloin suopohja on jäätynyt ja kantaa paremmin. Soilla on kuitenkin lähitulevaisuudessa suuri hakkuupotentiaali ja niiden kaikkien hakkaaminen talvikaudella on haasteellista, varsinkin kun talviolosuhteet vaihtelevat vuosittain suuresti. Turvemaiden kantavuuteen vaikuttaa sekä puuston määrä että tilajakauma. Harvapuustoisemmilla alueilla juuriston määrä on pienempi ja siten myös turvemaan kantavuus on myös heikko. Tästä syystä puuston tilarakenteen tunteminen auttaa ennakkosuunnittelussa suuntaamaan ajouria kantavammille kohdille leimikkoa. Lisäksi leimikon kantavuuteen oleellisesti vaikuttavat turpeen paksuus ja alueen vesitalous.

Kaukokartoitusaineiston hyödyntäminen metsäsuunnittelussa on lisääntynyt viime vuosina. Tarjolla oleva aineisto on parantunut niin paljon, että kaukokartoitusmateriaalin avulla tehtävää ennakkosuunnittelua on kannattanut lisätä myös käytännön metsätalouden piirissä. Useat puunhankintaorganisaatiot käyttävät apunaan niin satelliitti- kuin ilmakuviakin sekä uudempana aineistona laserkeilausaineistoa. Puuston tilavuutta on onnistuttu määrittämään laserkeilatun aineiston avulla (Packalén ym. 2008) Puulajien erottelu kaukokartoituksen avulla on yleisesti varsin hankalaa, koska vallitsevat heijastusolosuhteet sekoittuvat eri puulajien heijastusominaisuuksiin. Tosin onnistuneitakin puulajierotteluja laserkeilatun aineiston avulla on tehty (Korpela ym. 2009).

Laserkeilausaineiston hinnat vaihtelevat sen tarkkuudesta riippuen. Viime vuosien aikana tehdyissä inventoinneissa harvapulssinen aineisto, 0,5-1 pulssia per neliömetri, on maksanut 2-3 euroa hehtaarilta (Korhonen 2008). Mitä enemmän pulsseja neliömetriltä on tallennettu, sitä kalliimpaa aineisto on hankkia. Toisaalta taas vähäpulssista aineistoa varten maastotyön tarve on suurempi (Packalén ym. 2008).

Puustotunnuksia on onnistuttu ennustamaan onnistuneesti regressiomallien avulla, jolloin sekä pohjapinta-alan että tilavuuden estimaattien suhteelliset keskivirheet ovat olleet alle kymmenen prosentin (Suvato ym. 2005). Samat mallit eivät kuitenkaan näyttäisi sopivan kaikille sensoreille (Komulainen 2009) vaan ne tulisi laatia erilaisille sensoreille ja kohteille erikseen. Myös mallien laadinnassa käytetty pikselikoko rajoittaa tarkkuutta, jolle tulkinta voidaan tehdä. Mikäli mallit on laadittu 16 metrin pikseli kokoon, ei puustotulkintaakaan kannata tehdä paljon sitä pienemmälle pikselikoolle.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia, missä määrin tänä päivänä käytössä olevilla laserkeilaus- ja paikkatietoaineistoilla voidaan ennustaa leimikon kantavuutta ja kuinka hyödyllistä luotava ennakkoinformaatio on puunkorjuuoperaatioiden toteuttamisen kannalta.

2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimuskohteen muodosti kahden vierekkäisen turvemaakuvion puunkorjuukokonaisuus, joka sijaitsi Juupajoen kunnassa Ylä-Pirkanmaalla. Leimikko oli mäntyvaltainen turvemaakohde, jonka yhteispinta-ala on noin 4,5 ha. Molempien kuvioiden puusto oli inventoitu vuonna 2004. Isommalla kuviolla oli seuraavat hehtaarikohtaiset puustotunnukset: pohjapinta-ala 24 m^2, runkoluku 1500, keskipituus 11 m, keskiläpimitta 15 cm ja puuston tilavuus 138 m^2. Pienemmän kuvion puusto ei juuri eronnut isommasta: runkoluku 1400, pohjapinta-ala 22 m^2 ja keskipituus 10 m. Myös silmämääräisesti puusto oli vierekkäisillä kuvioilla hyvin samankaltaista, joskin kuvioiden boniteeetti erosi jonkun verran toisistaan.

Tutkimuskohteen osalta kartoitettiin saatavilla olevia, jo valmiina olevia paikkatietoaineistoja. Puuston arvioimiseen soveltuvan aineiston lisäksi erityisenä mielenkiintona olivat maaperän ja aluskasvillisuuden kartoitukseen liittyvät aineistot. Maaperästä on olemassa tietoa esimerkiksi Geologian tutkimuslaitoksella, jotka ovat ladattavissa Maanmittauslaitoksen ylläpitämässä Paikkatietolainaamossa. Aineiston tarkkuus ei kuitenkaan riitä leimikon sisäisen vaihtelun tarkasteluun. Yksi pistemäinen havainto löytyi myös leimikon sisältä.

Puustotulkinnan tekeminen alueelta oli huomattavasti helpompaa. Koska alue kuuluu Helsingin yliopiston käyttämiin tutkimusalueisiin, on sitä vuosien varrella kartoitettu varsin kattavasti. Alueelta on saatavilla laserkeilausaineistoa usealta lentokorkeudelta vuosilta 2004, 2006, 2008 ja 2009. Lisäksi alue laserkeilattiin myös hieman ennen hakkuun toteuttamista kesällä 2010. Tutkimuksessa valittiin käytettäväksi vuoden 2004 aineisto. Aineisto on hehtaarikohtaisissa binääritiedostoissa, joiden avulla esitetään laserin sijainti, asento ja kaikujen koordinaatit sekä kaiun intensiteetti.

Alueesta laadittiin maaston pintatasoa estimoiva pintamalli vuoden 2007 aineiston pohjalta. Valittaessa aineistosta viimeiset ja ainoat havainnot, tulee mukaan kuitenkin suuri määrä havaintoja, jotka eivät ole maahavaintoja. Apuna näiden maapisteiden valinnassa käytettiin Multiscale Curvature Classification (MCC) – luokitusta (Evans and Hudak 2007). MCC-luokitus on komentorivipohjineen työkalu metsäalueiden laserkeilausaineiston prosessointiin. Työkalun avulla voidaan luokitella havaintoja maapisteisiin ja ei maa-pisteisiin. Ohjelmassa käytettiin arvoja –s 1.0 ja –t 0.2.

Näistä suodatetuista maapisteistä laskettiin ArcGIS-sovelluksen avulla pintamalli (kuva 1). Pintamalli laskettiin IDW (Inverse distance weighted) – työkalun avulla käyttäen kolmea lähintä havaintoa. Etäisyydelle ei ollut määritelty maksimi arvoa. Pintamalli toi hyvin esiin alueella olevia korkeuseroja. Ojat ja niiden reunapenkat erottuivat selvästi kuvalta.

Pintamallin ja 2004 vuoden aineiston havaintojen pohjalta laskettiin puustohavainnoille korkeus- eli z-arvo. Z-arvon avulla saatiin laskettua alueelle puustoestimaatit regressiomallien avulla (Holopainen ym. 2008). Tämän tuloksena alueelle saatiin 16 metrin pikselikokoon laskettu gridi. Jokaiselle pikselille oli estimoitu puuston tilavuus ja pohjapinta-ala.

Etukäteen selvitetään myös, onko varvikkoa mahdollista havaita laserkeilausaineistosta, mikä saattaisi indikoida myös parempaa kantavuutta. Pohjakasvillisuuden kartoittaminen on kuitenkin osoittautunut aiemmissa tutkimuksissa haasteelliseksi, sillä niiden korkeus maanpinnasta ei ole kovin suuri eikä juuri eroa muun pintakasvillisuuden korkeusvaihtelusta (Korpela 2009). Turpeen pintakerroksessa sijaitsevan juuriston lisäksi myös varvikolla on vaikutusta kantavuuteen turvemailla.

Maastotiedustelussa havaittiin, että mitä korkeammalla merenpinnasta leimikon sisällä oltiin, sitä kantavammilla alueilla arvion mukaan liikuttiin. Korkeuserot leimikon sisällä olivat kokonaisuudessaan noin 1,5 m. Alimpana olivat ojat, joiden ajateltiin kantavan huonosti. Sarkaväleistä korkeampana kohosivat ojan penkereet ja yksittäiset laikut, jotka havaittiin ainakin parissa kohdassa kivennäismaasaarekkeiksi. Lisäksi pintamallista oli havaittavissa vanhat perkaamattomat ojat sekä erot peruskarttaan merkityistä avatuista ojista.

Sekä pintamalli että tilavuus ja pohjapinta-ala luokiteltiin viiteen luokkaan (taulukko 1). Varsinaisen kantavuusluokitus saatiin yhdistämällä korkeusluokitus ja puustotulkinta. Lopulliseen luokitukseen näistä valittiin korkeusluokkaan ja tilavuuteen perustuva malli:

Luokitus= 0,5*korkeusluokka+0,5*tilavuusluokka (1)

Saadun puustotulkinnan ja pintamallin avulla leimikolle suunniteltiin ajourat. Ajourat suunniteltiin leimikolle visuaalisesti siten, että ajourilta yltää harventamaan kaikkialta. Ajouria vältettiin sijoittamasta suurien ojien risteyksiin ja pyrittiin sijoittamaan urat leimikon kantavuusluokituksessa korkeampia arvoja saaneille alueille eli runsaspuustoisimmille ja korkeammalle meren pinnasta. Kaikki ajourat sijoitettiin kulkevaksi kuvioiden sisällä.

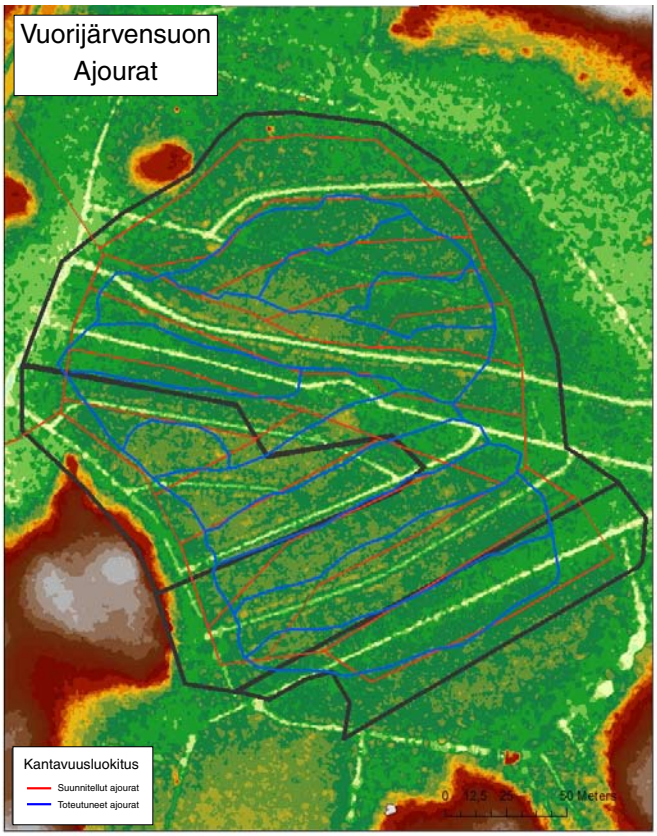
Kantavuusluokituksen ja etukäteen suunniteltujen ajourareittien pohjalta sijoitettiin leimikolle tasaisesti 20 koealapistettä. Koealapisteiden jaottelu eri kantavuusluokkiin on nähtävissä taulukossa 2 ja niiden jakautuminen eri leimikon osiin ja ajourareitistön suhteen voidaan havaita kuvien 1 ja 2 perusteella.

Taulukko 1. Puustoestimaattien ja korkeuden luokitus

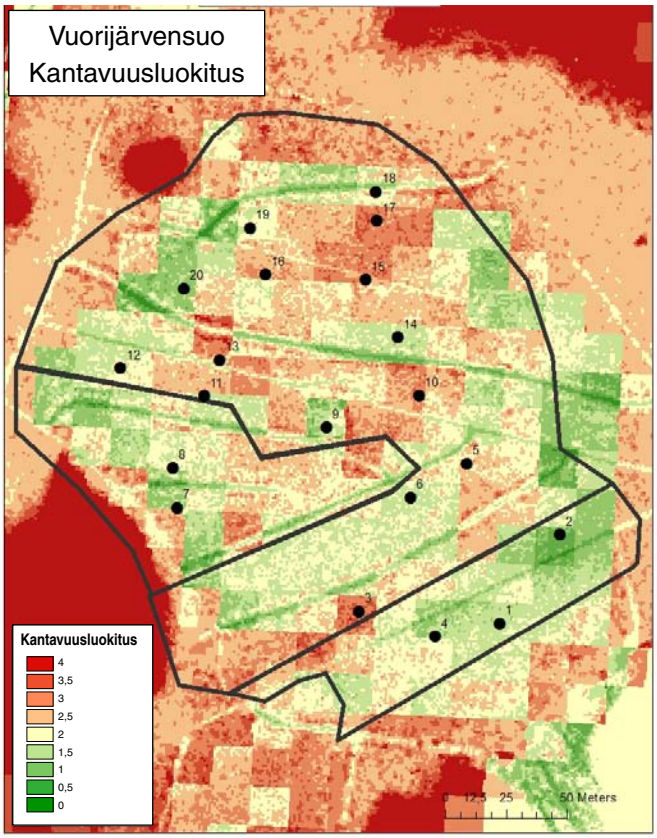
LUOKKA	PPA m^2/ha	TIL m^3/ha	ASL m
0	0–10	0–60	152,4–153,4
1	10 to 15	60–90	153,4–153,8
2	15–20	90–120	153,8–154
3	20–25	120–150	154–154,2
4	>25	>150	>154,2

Taulukko 2. Koealojen jakautuminen kantavuusluokituksen suhteen.

LUOKKA	Koealat	Lukumäärät
0,5	2	1
1	7, 18, 20	3
1,5	6, 9, 14, 19	4
2	2, 8, 12, 16	4
2,5	5, 11, 15	3
3	10, 17	2
3,5	3	1
4	13	1



Kuva 1. Alueen pintamalli sekä suunnitellut ja toteutuneet ajourat



Kuva 2. Lopulliset koealasijainnit ja leimikoiden kantavuusluokittelu

Hakkuukoneen kuljettaja ohjeistettiin ajamaan suunniteltuja reittejä. Hänelle oli tulostettu kartta ajourista suuressa mittakaavassa, jotta ajon seuraaminen olisi mahdollisimman helppoa. Reittejä sovittiin muutettavaksi vain, mikäli ajaminen joltakin kohtaa on käytännössä mahdotonta. Hakkuukoneen hakkaamat ajourat tallennettiin Metsähallituksen oman paikannusjärjestelmän avulla. Lisäksi yritettiin tallentaa PRI-tiedosto, mutta sen tallentaminen epäonnistui huonon ohjeistuksen vuoksi, eikä koordinaatteja saatu taltioitua.

Alueelta mitattiin hakkuun jälkeen urapainumat kaikkien 20 koealan osalta. Koealat paikannettiin Trimble ProXH GPS-laitteella (Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, USA) ilman reaaliaikaista korjausta. GPS-signaalin saaminen paikoitellen oli hyvin haasteellista. Painuma mitattiin 10 metrin matkalta molempien rengasurien keskeltä siten, että havaintoja luettiin yhteensä 22 per koeala. Jokaisen koealan aloituspiste merkittiin maastoon paaluin, johon kaikkien koealan mittauspisteiden paikannus perustui. Mittauspisteet määritettiin metrimitan avulla etäisyytenä aloituspisteestä. Lisäksi tallennettiin koealan keskikohdan sijainti GPS-laitteella sekä mitattiin rassilla turpeen keskimääräinen paksuus koealalla. Koealojen sijainnit jälkikorjattiin. Edelleen kullekin koealalle laskettiin jälkikäteen keskimääräinen korkeusarvo. Paikkatieto-ohjelmassa piirrettiin koealan ajourapainumamittauksia vastaava paikkavektori. Korkeusmalli visualisoitiin paikkatieto-ohjelmassa 2-ulotteisena mallina, jossa kunkin pisteen väriarvo indikoi korkeusluokkaa. Koealalle määritettiin korkeusarvo (suhteellinen keskiarvo) painottamalla kutakin vektorille osunutta korkeusarvoa sen pituusosuudella vektorin kokonaispituudesta.

Puutavaran ajo toteutettiin John Deere 810E – mallisella kuormatraktorilla. Kuormatraktorin puutavaran ajossa käyttämät urat tallennettiin John Deeren TimberNavi-sovelluksen avulla. Puutavaran ajon kuluessa käytettiin Timbernavissa olevaa sovellusta, joka tallentaa ajetut reitit erillisiin tiedostoihin. Lisäksi merkittiin paperikarttaan kierrosreitit ja puun lastauskohdat, jotta myöhemmin voitiin arvioida eri koealojen kohdilta ajettuja määriä. Osa reittitallennuksista epäonnistui. Puutavaran kuljetus jouduttiin keskeyttämään, sillä kokoojaurat alkoivat pettää. Vain osa puista saatiin ajettua onnistuneesti varastolle. Painuma mitattiin ajon jälkeen onnistuneesti 14 koealalta.

3 Tulokset

3.1 Kantavuutta ennustavien parametrien ja hakkuukoneen ajourapainuman välinen riippuvuus

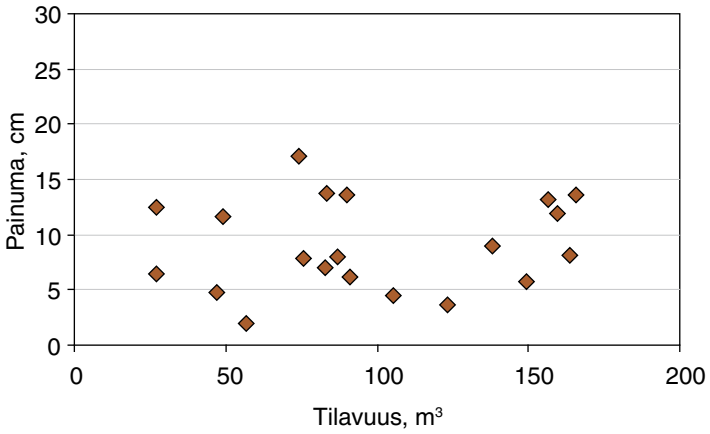
Hakkuukoneen aiheuttama yksittäinen painumahavainto vaihteli välillä 0–44 cm ja koealojen painuman keskiarvo välillä 2,0–17,1 cm. Koealojen välisessä vaihtelussa ei havaittu selvää spatiaalista riippuvuutta, ts. sekä pieniä että suuria painuma-arvo löytyi tasaisesti eri puolilta leimikkoa. Turpeen paksuus oli kaikilla koealaloilla suurempi kuin käytettävissä ollut 1,5 m mittarassi, lukuun ottamatta koealaa 9, joka oli sijoitettu keskellä suoaluetta sijaitsevalle erittäin pienikokoisen kalliokaistan reunaan.

Tärkeimpien kantavuutta ennustavien parametrien ja hakkuukoneen aiheuttaman koealan keskimääräisen ajourapainuman väliset tilastolliset riippuvuudet on esitetty taulukossa 3.

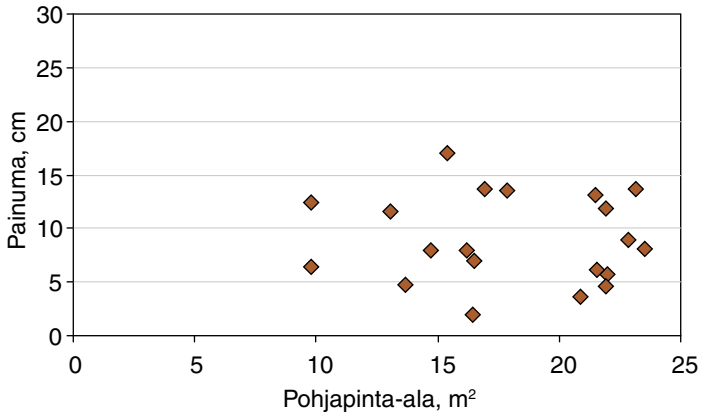
Taulukko 3. Puuston tilavuuden, puuston pohjapinta-alan, koealan korkeuden (merenpinnasta), hakkuukoneen aiheuttaman koealalan keskimääräisen painuman sekä koealan maksimipainuman väliset korrelaatiot. Taulukon merkinnät: (**) = riippuvuus on tilastollisesti merkitsevä riskitasolla 0,01; (*) = riippuvuus on tilastollisesti merkitsevä riskitasolla 0,1. N=20.

	Korkeus, cm	**Painuma$_{HAKKUU}$, cm**
Kantavuusluokka	0,049	-0,067
Pohjapinta-ala, m^2	-0,086	-0,059
Tilavuus, m^3	-0,199	0,125
Korkeus, m	1	-0,378 (*)
Painuma$_{HAKKUU}$, cm		1

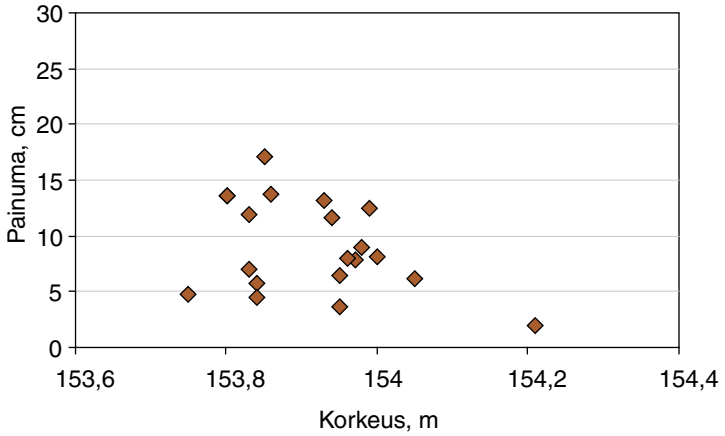
Hakkuukoneen keskimääräisen painuman ja puuston tilavuuden korrelaatio on heikko ja se on epälooginen, koska painuman ja puuston tilavuuden välillä voisi olettaa olevan negatiivinen korrelaatio, ts. mitä suurempi tilavuus, sen pienempi painuma. Riippuvuuden tarkempi tarkastelu (kuva 3 ja kuva 4) osoittaa, että epäloogisimmat havainnot, koealat 10, 15 ja 17, sijaitsevat samalla alueella leimikon koillisosassa. Alueella on suuret puustohavainnot ja syvät ajourapainumat. On huomioitavaa, että näiden havaintojen poistaminen aineistosta muuttaisi puustoin ja painuman välisen riippuvuuden selvästi negatiiviseksi (luokkaa -0,2).



Kuva 3. Puuston tilavuuden ja hakkuukoneen painuman välinen riippuvuus.



Kuva 4. Puuston pohjapinta-alan ja hakkuukoneen painuman välinen riippuvuus.



Kuva 5. Maanpinnan korkeuden ja hakkuukoneen painuman välinen riippuvuus.

Hakkuukoneen keskimääräisen painuman ja puuston pohjapinta-alan välillä ei myöskään ole selvää korrelaatiota mutta riippuvuus ei ole yhtä selkeästi epälooginen kuin puuston tilavuuden ja painuman välinen riippuvuus (taulukko 3 ja kuva 4). Havaittu ero antaa viitteitä siihen, että pohjapinta-ala voisi olla puuston tilavuutta sopivampi mittari ennustettaessa turvemaan kantavuutta.

Hakkuukoneen keskimääräisen painuman ja koealan korkeuden välillä voidaan havaita tilastollisesti merkitsevä, kohtalaisen selvä negatiivinen korrelaatio. Riippuvuutta on tarkemmin tarkasteltu kuvassa 5. Koeala, joka oli sijoitettu suoalueen keskellä olevan kivennäismaakaistan reunaan erottuu joukosta selvästi. Tämän havainnon poistaminen muuttaisi korrelaation -0,2 tasolle. Aineistossa on siis joka tapauksessa havaittavissa selvä negatiivinen korrelaatio maastopinnan korkeuden ja hakkuukoneen aiheuttaman painuman välillä.

3.2 Kantavuutta ennustavien parametrien ja lähikuljetuksen aiheuttaman ajourapainuman välinen riippuvuus

Kuormatraktori etenee harvennuksilla eri ajoreittejä yleensä hyvin epätasaisesti. Pienin rasitus on niille ajourareiteille, jossa kuormatraktori ajaa vain kerran vajaakuormaisena. Useimmiten palstauralle tulee kuitenkin vähintään kaksi ajo kertaa, yksi tyhjänä ja toinen vajaakuormaisena. Monille ajourareiteille, etenkin nk. pääajourille ajokertojen ja rasituksen määrä kasvaa ja on sitä suurempi mitä lähempänä ajoura sijaitsee varastopaikkaa. On siis lähes mahdotonta, ilman erityisjärjestelyitä, vertailla yhden leimikon sisällä kuormatraktorin aiheuttamaan ajourapainaumaa tasavertaisesti koealojen kesken.

Lähikuljetus aiheutti erittäin suuret painumat koko leimikon alueella ja rasitus kasvoi pääajourilla, jotka johtivat nk. kokoojauralle niin suuren rasituksen, että korjuu jouduttiin keskeyttämään. Lähikuljetuksen jälkeinen painuma mitattiin 16 koealalta eli kaikilla, joissa kuormatraktori oli ylittänyt koealan vähintään yhden kerran. Vähiten ajokertoja oli koealalla 5, jossa ajettiin vain yhden kerran ylitse vajaakuormaisena. Vastaavasti eniten ajokertoja oli koealalla 6, josta ajettiin ylitse 3 kertaa tyhjällä kuormalla, kerran vajaalla kuormalla ja 2 kertaa täydellä kuormalla eli yhteensä 6 kertaa. Kokonaismassa, joka saadaan laskemalla kaikkien koealan yli ajettujen kuormatraktorin kokonaismassojen (koneen oma massa + kuorman massa) summa vaihteli välillä 17 200–123 100 kg.

Koealojen painumien keskiarvo lähikuljetuksen jälkeen vaihteli välillä 2,0–27,5 cm, korkeimman mitatun arvon ollessa 57 cm. Tärkeimpien kantavuutta ennustavien parametrien ja lähikuljetuksen jälkeisen koealan keskimääräisen ajourapainuman väliset tilastolliset riippuvuudet on esitetty taulukossa 4.

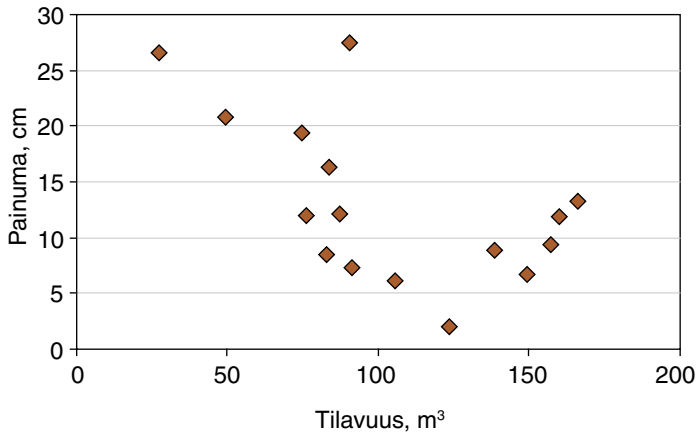
Puuston tilavuudella ja pohjapinta-alalla on selkeä negatiivinen korrelaatio lähikuljetuksen jälkeisen ajourapainuman kanssa ja tätä riippuvuutta on tarkemmin esitelty kuvissa 6 ja 7. Havaintopisteen korkeudella ja lähikuljetuksen jälkeisellä ajourapainumalla on yhdenmukaisesti hakkuukoneen aiheuttamaan painaumaan verrattuna, negatiivinen korrelaatio. Riippuvuutta on tarkemmin tarkasteltu kuvassa 8. Koeala 9, joka oli sijoitettu suoalueen keskellä olevan kivennäismaakaistan reunaan, on yksi neljästä koealasta, josta ei ollut lähikuljetuksen jälkeisiä mittauksia.

Taulukosta 4 on myös huomioitava, että koealan ylitse kulkeneen massan ja ajourapainuman välillä on selvä korrelaatio, joka vaikuttaa edellä esitettyihin tuloksiin (kuvat 6,7 ja 8). On syytä siis pyrkiä tarkastelemaan parametrien välistä riippuvuutta ilman kokonaismassan vaikutusta. Tämä toteutettiin osittaiskorrelaatiotarkastelun avulla. Osittaiskorrelaatio on kahden muuttujan välinen korrelaatio, kun yhden tai useamman muuttujan vaikutus on poistettu (eli vakioitu). Tämä voitaisiin tehdä myös laskemalla muuttujien korrelaatio kolmannen tekijän osajoukoissa.

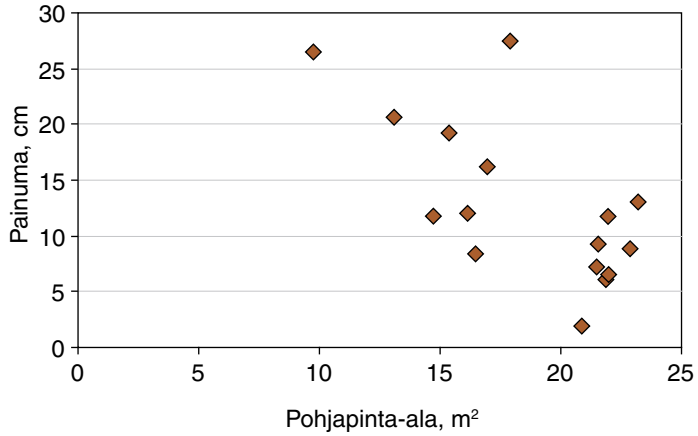
Osittaiskorrelaatiot tilanteessa, joissa koealan ylitse kulkeneen kokonaismassan vaikutus on poistettu, on esitetty taulukossa 5. Esitettyihin lukuihin on syytä suhtautua suurella varauksella. Osittaiskorrelaatiotarkastelun riippuvuuksilla ole selvää merkitsevää tilastollista riippuvuutta. Yhdenmukaisesti hakkuun jälkeisen ajourapainuman kanssa pohja-pinta-ala antaa korkeamman korrelaatioarvon. Korkeuden vaikutus näyttäisi kaikissa tarkasteluissa olevan samaa suuruusluokkaa.

	$Painuma_{LÄHIKULJ.}$, cm
Pohjapinta-ala, m^2	-0,681**
Tilavuus, m^3	-0,576*
Korkeus, m	-0,205
Kokonaismassa, kg	0,386

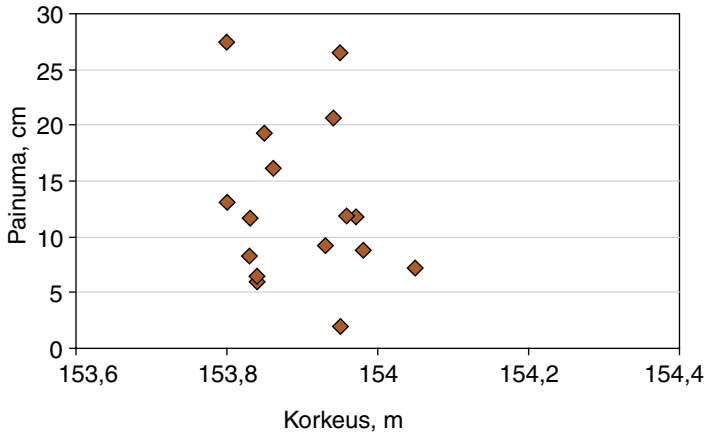
Taulukko 4. Puuston tilavuuden, puuston pohjapinta-alan, koealan korkeuden (merenpinnasta), lähikuljetuksen jälkeen mitatun koealan keskimääräisen painuman sekä koealan ylitse ajetun kuormien kokonaismassan väliset korrelaatiot. Taulukon merkinnät: (**) = riippuvuus on tilastollisesti merkitsevä riskitasolla 0,01; (*) = riippuvuus on tilastollisesti merkitsevä riskitasolla 0,1. N=16.



Kuva 6. Puuston tilavuuden ja lähikuljetuksen jälkeisen painuman välinen riippuvuus.



Kuva 7. Puuston pohjapinta-alan ja lähikuljetuksen jälkeisen painuman välinen riippuvuus.



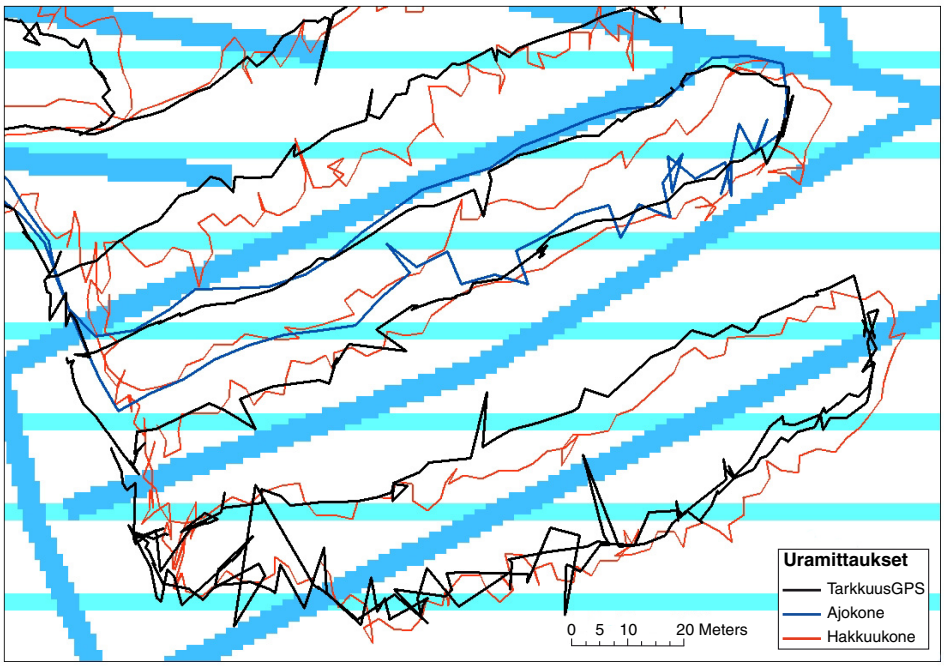
Kuva 8. Maanpinnan korkeuden ja lähikuljetuksen jälkeisen painuman välinen riippuvuus.

	$Painuma_{LÄHIKULJ.}$, cm
Pohjapinta-ala, m^2	-0,0,622
Tilavuus, m^3	-0,470
Korkeus, m	-0,234

Taulukko 5. Puuston tilavuuden, puuston pohjapinta-alan, koealan korkeuden (merenpinnasta) ja lähikuljetuksen jälkeen mitatun koealan keskimääräisen painuman väliset osittaiskorrelaatiot tilanteessa joissa koealan ylitse ajetun kuormien kokonaismassan vaikutus on vakioitu. N=16.

3.3 Hakkuukoneen tuottaman paikkatietoinformaation käyttökelpoisuus lähikuljetuksen suunnittelun apuvälineenä

Koealueelta tallennettiin ajourien sijainti kolmella eri tavalla 1) hakkuukoneen tietokoneeseen kytketyn gps-laitteen avulla 2) Kuormatraktorin tietokoneeseen kytketyn gps-laitteen avulla ja 3) mukana kannettavan gps-laitteen avulla kävellen pitkin ajouria. Vertailun tulos on esitetty kuvassa 9. Tuloksista voidaan päätellä, että nykyisten gps-laitteiden tuottamassa jäljitystiedossa on varsin suuri hajonta, joka voi monien sovellusten käyttökelpoisuuden kannalta olla hyvin ratkaisevaa.



Kuva 9. Kuvan keskellä hakkuukoneen, kuormatraktorin ja tarkkuusGPS:n eroja ajourien paikannuksessa.

4 Tulosten tarkastelu

Tutkimusaineisto on hyvin suppea ja se sisältää ainoastaan yhden leimikkokokonaisuuden. Kaikkiin saatuihin tuloksiin tuleekin suhtautua hyvin suurella varauksella. Laserkeilausmenetelmän antamia estimaatteja (tilavuus, korkeus) ei resurssien rajallisuuden takia pystytty tarkistamaan, mutta voidaan olettaa, että estimaattien luotettavuus on samaa luokkaa kuin mitä näillä menetelmillä on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu.

Hakkuukoneen ajourapainumaa tarkasteltaessa voidaan todeta, että mittauksen tarkkuuteen ja painuman syntyyn liittyy hyvin paljon vaihtelua, jotka ovat osittain sattumanvaraisia. Hakkuukoneen painumaan vaikuttaa mm. kuljettajan ajotapa, ajouran kaarteisuus sekä kantavuutta pyörän alla paikallisesti lisäävät hakkkutähteet ja kannot. Tästä syystä on varsin ymmärrettävää, että hakkuukoneen painuman ja puuston tilavuuden välillä ei pystytty havaitsemaan selvää negatiivista korrelaatiota.

Maastonpinnan korkeudella ja suopohjan kantavuuden välillä näyttäisi olevan kohtuullisen selvä riippuvuus. Mitä korkeammalla maastonkohta sijaitsee, sitä kantavammalla alustalla se on. Suoalueella on voi olla korkeampia paikkoja kangasmaakaistaleiden reunoissa ja ojien penkoissa, jotka ovat yleensä kantavampia kuin keskellä sarkaa olevat kohdat.

Puuston tilavuuden ja maaston kantavuuden välillä pitäisi teoreettisesti tarkastellen olla selkeä riippuvuus. Suurempi puustopääoma kehittää ympärilleen laajemman ja vahvemman juuriston, jolla on kantavuutta merkitsevästi lisäävä vaikutus. Tämä riippuvuus onkin aiemmin havaittu useissa tutkimuksissa (Ali-ilomäki 2005). Myös tämä tutkimus antaa jonkinlaisen vahvistuksen tuolle teorialla, vaikkakin käytetty tutkimusjärjestely ei anna vahvaa tilastollista oikeutusta tuon

teorian vahvistamiseksi. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää sen verran rohkaisevina, että tutkimusja kehittämistyötä tutkimusteeman alueella kannattaa ehdottomasti jatkaa.

Puusto ja suopinnan korkeus eivät selvästikään pysty kokonaan selittämään eroja suon kantavuudessa, vaan on olemassa joukko muita tekijöitä, jotka vaikuttavat maaston kantavuuteen. Näillä muilla tekijöillä näyttäisi olevan myös spatiaalinen luonne ts. ne voivat keskittyä tietylle rajatulle spatiaaliselle alueelle.

Laserkeilauksen käyttökelpoisuutta korjuun suunnittelun apuvälineenä turvemaakohteissa voidaan pitää varsin lupaavana. Samanaikaisesti on kuitenkin jatkettava perustutkimusta, jossa selvitetään kaikkien mahdollisten eri tekijöiden vaikutusta suon kantavuuteen (kosteus, turpeen ominaisuudet, kenttäkerroksen kasvillisuus, jne). Tilastollisista tarkasteluista pitäisi päästä eroon ja pyrkiä kehittämään malleja, joissa kantavuutta ennustetaan fysikaalisten lujuussuureiden avulla joko suorasti tai epäsuorasti. On mahdollista, että joitakin muitakin tärkeitä ennusteparametreja, kuin puuston tilavuutta ja korkeutta, voitaisiin ennustaa laserkeilauksen avulla (esim. aliskasvoksen määrä, kosteus, jne).

Metsien laserkeilaus on kehittyvä ala. Parhaillaan ensikokeiluja tehdään aaltomuotoisella keilauksella, jonka datasta on mahdollisuus saadaan enemmän tietoa alemmasta puujaksosta ja aluskasvillisuudesta, kuin nykyisin käytössä olevalla kaikulaserilla. Mahdollisina jatkotoimenpiteinä voisi kokeilla aaltolaserkeilausaineiston soveltuvuutta turvemaan kantavuuden määrittelyssä. Hyytiälän alueelle on tehty kesällä 2010 ennen Vuorijärven suolla tehtyjä hakkuita aaltolaserkeilaus. Uutta aineistoa olisi mahdollista verrata jo mitattuihin koealoihin ja etsiä lisää selittäviä tekijöitä kantavuuden luokittelussa. Vastaavissa tutkimuksissa uusilla koealoilla olisi järkevintä kontrolloida lähikuljetusta. Eri kantavuusluokkiin määriteltyjen koealojen yli ajettaisiin useita kertoja samanpainoisella kuormalla. Tämä sulkisi pois vaikeasti luokiteltavan ylityskertoihin ja kuorman painoon liittyvän kokonaisrasituksen.

Lähikuljetuksen suunnittelun parantaminen on herättänyt viime aikoina erittäin paljon kiinnostusta niin Suomessa kuin ulkomaillakin. Metsätutkimuslaitoksessa on kehitetty LOGTRACK-ohjelmisto, jolla voidaan suunnitella optimaalisia lähikuljetusreittejä ja reitistöjä tilanteessa, jossa maaperän kantavuus asettaa lähikuljetukselle merkittäviä rajoitteita. Jos maaston kantavuus voidaan ennustaa hakkuukoneen muodostamalle ajoreitistölle, on mahdollista yrittää optimoida ajoreitistöjä. Tässä tutkimuksessa tehty testi gis-datan tarkkuudesta antaa kuitenkin viitteitä siitä, että ajoreitistöjen optimointi ei ole vielä mahdollista käytännön tilanteissa.

Lähteet

Ala-Ilomäki, J. 2005. Metsäisten turvemaiden kulkukelpoisuus. Julkaisusta: Ahti, E., Kaunisto, S., Moilanen M., & Murtomaara I. (toim.) Suosta metsäksi Suometsien ekologisesti ja taloudellisesti kestävä käyttö, Tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 947: 98–111 s.

Evans, J. S. and Hudak, A. T. 2007. A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45:4 pp. 1029–1038.

Holopainen, M., Haapanen, R., Tuominen, S. and Viitala, R. 2008 Performance of airborne laser scanning- and aerial photograph-based statistical and textural features in forest variable estimation. SilviLaser 2008, Sept. 17–19. Edinburgh, UK. 105–112 s.

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

John Deere. http://www.timberoffice.com/english/products/timbernavi/ Luettu 7.6.2010.

Komulainen, A. 2009. Varkauden laserkeilausainestosta laaditun prosenttipistemallin käytettävyys Evolla.

Korhonen, K.T. 2008. Laserkeilaus Suomen metsien inventoinnissa. Julkaisussa: Henriksson, R. & Mäkelä, J. (toim.). Historiaa kunnioittaen, tulevaisuuteen suunnaten. Maanmittaustieteiden Seuran erillisjulkaisu 45. s. 17–23.

Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., Holopainen, M. and 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. s. 1549–1566.

Nuutinen, T., Hirvelä, H., Salminen, O. ja Härkönen, K. 2007. Alueelliset hakkuumahdollisuudet valtakunnan metsien 10. inventoinnin perusteella, maastotyöt 2004–2006. Metsätieteen aikakauskirja 2B/2007: 215–248.

Packalén, P., Pitkänen, P. and Maltamo, M. 2008. Comparison of individual tree detection and canopy height distribution approaches: a case study in Finland. Julkaisussa: Hill, R.A., Rosette, J. & Suárez, J. (eds.). Proceedings of SilviLaser 2008: 8th International Conference on LiDAR Applications in Forest Assessment and Inventory, September 17–19, 2008, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK. p. 22–29. ISBN 978-0-85538-774-7 ISBN 978-0-65538-771-7 http://geography.swan.ac.uk/silvilaser/forestry.htm 4.2.2010

Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. ja Kangas, J. 2005 Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. Metsätieteen aikakauskirja 4 /2005:413–428.

LIITE 1

Kuvia (©Metla/Tomi Kaakkurivaara) Vuorijärvensuon kohteesta lähikuljetuksen jälkeen.

Koeala 7 hakkuun ja lähikuljetuksen jälkeen. Koealalle laserkeilausaineistosta ennustetut puustoestimaatit olivat 10m^2/ha ja tilavuus 27 m^3/ha.

Koeala 12 hakkuun ja lähikuljetuksen jälkeen. Koealalle laserkeilausaineistosta ennustetut puustoestimaatit olivat 20m^2/ha ja tilavuus 98 m^3/ha