

Kuljettajaa opastavat järjestelmät koneellisessa puunkorjuussa – kooste hankkeen avaintuloksista

Kari Väätäinen, Sami Lamminen, Jari Ala-Ilomäki, Matti Sirén ja
Antti Asikainen



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 julkaisu toiminnassa 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. 029 532 2111
faksi 029 532 2103
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18, 01301 Vantaa
puh. 029 532 2111
faksi 029 532 2103
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Väättäinen, Kari, Lamminen, Sami, Ala-Ilomäki, Jari, Sirén, Matti ja Asikainen, Antti			
Nimeke Kuljettajaa opastavat järjestelmät koneellisessa puunkorjuussa – kooste hankkeen avaintuloksista			
Vuosi 2013	Sivumäärä 24	ISBN 978-951-40-2453-5 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuun toimipaikka / EffFibre-tutkimusohjelma / Älykkäät kuljettajaa opastavat järjestelmät koneellisessa puunkorjuussa			
Hyväksynyt Henrik Heräjärvi, PUU-ohjelman johtaja, 7.11.2013			
Tiivistelmä Keinoja puunhankinnan tehostamiseksi on etsitty FiBic Oy:n koordinoimassa EffFibre -ohjelmahankkeessa. Ohjelmaan kuuluvassa <i>Älykkäät kuljettajaa opastavat järjestelmät puunkorjuussa</i> -hankkeessa on tutkittu kuljettajaa opastavia järjestelmiä ja niihin liittyviä teknologioita puunkorjuun kustannus- ja ympäristötehokkuuden parantamiseksi. Hanke jakautui kolmeen päätehtävään, jotka olivat a) Tarkkaan maastomalliin perustuva karttaopaste LoggingMap hakkuukoneenkuljettajan tukena, b) Korjuukohteen kulkukelpoisuuden määrittäminen hakkuukoneen CAN-väylätiedoista, ja c) Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat kuljetustavat, opastustarpeet ja -mahdollisuudet. Ensimmäisessä tehtävässä tavoitteena oli tutkia ja selvittää tarkkaan laserkeilaukseen perustuvien maasto- ja puustomalliaineistojen karttapohjaista kuljettajaopastusta kulkukelpoisuuden määrittämisessä sekä ajouraverkoston suunnittelun tukena hakkuutyön aikana. Kenttätiestien perusteella tutkimusten hakkuukoneenkuljettajat kokivat karttaopasteet hyödyllisiksi ajouraverkoston suunnittelussa erityisesti maastoltaan haastavilla kohteilla. Kuljettajien mielestä ero perinteiseen peruskarttaan oli suuri ja tarkat paikkaan sidotut maaston korkeus- ja kaltevuustiedot auttaisivat hakkuutyön lisäksi myös metsäkuljetusta. Hakkuukoneen CAN-väylätiedoista kerätyillä ajoneuvon liikkuvuutta kuvaavilla tunnuksilla on mahdollista määrittää kulkukelpoisuuskartta metsäkuljetusta varten. Menetelmän etuina ovat tarkkuus, edullisuus ja tiedon kattavuus. Tulosten mukaan hakkuukoneen urapainumat ennustivat 74 % kuormatraktorin urapainumien vaihtelusta. Menetelmän edelleen kehittämiseksi tarkan maanopeuden ja maksimaalisen vetokyvyn määrittäminen sekä tiedonsiirron muodostaminen hakkuukoneen ja kuormatraktorin välillä olisivat edellytyksenä toimivan kulkukelpoisuuskartan käyttöönnotossa. Kolmannessa tehtävässä selvitettiin kuorman reititysopastuksen potentiaalia ja periaatteita puutavaran metsäkuljetuksessa sekä tutkittiin kuljetusmatkaa minimoivaa työmenetelmää puutavaran kuljetuksen tehostamiseksi harvennuskohteilta. Yksityiskohtainen ja paikkaan sidottu työntutkimusaineisto kerättiin kokeneen kuljettajan metsäkuljetuksesta kolmelta harvennuskohteelta. Toteutunutta metsäkuljetusta verrattiin VRP-reittioptimoinnin tulokseen samoilta kohteilta. Ajomatkaa minimoivalle reittioptimoinnille määritettiin käytäntöön siirrettävä kuorman hakutekniikka. Uuden työmenetelmän ja reittioptimoinnin avulla metsäkuljetusta voisi kehittää vähentämällä erityisesti ajomatkaa, mutta myös polttoainekulutusta, urapainumia sekä metsäkuljetuksen ajanmenekkiä. Jos metsäkuljetukseen kuljettajan tueksi voidaan kehittää opastava järjestelmä, keskimääräinen metsäkuljetuksen tuottavuuslisä olisi 10-20 % ja hyöty vuositasolla olisi noin 10 miljoonaa euroa Suomessa. In “Intelligent operator tutoring systems for wood harvesting” -project the aim was to find and study new technologies and tutoring systems improving the cost- and environmental competitiveness in timber harvesting. The project was divided into three subtopics named as a) Multi-informative map-based assistance in harvesting, b) Using harvester CAN-bus data for mobility mapping and c) Principles and potential of forwarder’s load cycle guidance. In Task 1 the main objective was to test and observe various map-based visualisations of Digital Elevation Model, DEM-data assisting the harvester operator in assessing terrain trafficability and in strip road planning. DEM map visualization concept Logging Map was developed and tested in practical demonstrations in three harvesting sites. According to the operators, new map information of terrain trafficability would improve the productivity, in addition to harvesting, also in forwarding. Target of the second task was to examine comprehensive, continuous and low-cost assessing system for measuring and identifying trafficability of a harvesting site. Using the harvester, preceding the heavier			

forwarder on the site, to create a mobility map of the extraction road network fulfils these requirements. According to the study results, harvester rut depth explained 74 % of the variation in forwarder rut depth. Future efforts should be aimed at cost effective measuring of ground speed, determination of maximum available tractive force from CAN data and data transfer from harvester to cloud server and back to forwarder.

The objectives of task 3 were to find out the potential effect of load cycle guidance in forwarding productivity and to identify efficient forwarding techniques. Detailed, positional and multi-source work study data on forwarding was gathered from three thinning sites. The forwarding output as well as individual load cycles were compared to the results obtained by the vehicle routing problem (VRP) - solution generated with the ArcGis-application. In addition, new forwarding technique, following closely VRP-solution by minimizing driving especially in driving during loading, was introduced. Compared to the operator's standard driving technique, the benefits included increased productivity, decreased soil compaction, lower fuel consumption and diminished strain to forwarder. On national level in Finland, the cost saving potential could be over 10 million euros, while the total annual forwarding costs are approximately 210 million euros.

Asiasanat

kuljettajaa opastava järjestelmä, laserkeilausaineisto, kulkukelpoisuuskartta, CAN-väylä, reititysoptimointi, vehicle routing problem (VRP)

operator tutoring system, laser scanning data, mobility map, CAN bus, route optimization, vehicle routing problem (VRP)

Julkaisun verkko-osoite

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp279.htm>

Tämä julkaisu korvaa julkaisun

Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla

Yhteydenotot

Kari Väätäinen, Metsäntutkimuslaitos, Itä-Suomen alueyksikkö, Yliopistokatu 6, PL 68, 80101 Joensuu

Sähköposti: kari.vaatainen@metla.fi

Muita tietoja

Intelligent operator tutoring systems for wood harvesting -hanke kuului FIBIC Oy:n alaisen EffFibre ohjelman WP3-hankekokonaisuuteen (Operational efficiency of intensified wood production and supply). Ohjelman ja hankkeen kesto on 3 vuotta ja päättyy 2013 loppuun mennessä.

Sisällys

Sisällys	5
1 Johdanto	6
1.1 Lähtökohta tutkimushankkeelle.....	6
1.2 Hankkeen tavoite ja tutkimustehtävät	7
2 Avaintulokset	8
2.1 Tarkkaan maastomalliin perustuva karttaopaste hakkuukoneen- kuljettajan tukena	8
2.1.1 Lähtökohta ja tavoite	8
2.2.2 Avaintulokset.....	9
2.2 Uudet tekniset menetelmät maaston kulkukelpoisuuden ennustamiseen ja hakkuun suunnitteluun	12
2.2.1 Kulkukelpoisuuskartan luonti anturoidulla hakkuukoneella	12
2.2.2 Mittausjärjestelmä	12
2.2.3 Koejärjestelyt	13
2.2.4 Kulkukelpoisuuden laskenta.....	14
2.2.5 Tulokset	14
2.3 Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat kuljetustavat ja tarve opastukselle	17
2.3.1 Lähtökohta ja tavoite	17
2.2.2 Avaintulokset.....	18
3 Johtopäätökset ja tulosten hyödyntäminen	21
3.1 Tarkkaan maastomalliin perustuva karttaopaste hakkuukoneen- kuljettajan tukena	21
3.2 Uudet tekniset menetelmät maaston kulkukelpoisuuden ennustamiseen ja hakkuun suunnitteluun	21
3.3 Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat kuljetustavat ja tarve opastukselle	22
Kirjallisuus	24

1 Johdanto

1.1 Lähtökohta tutkimushankkeelle

Suomessa puunkorjuun yksikkökustannukset eivät ole laskeneet viimeisen kymmenen vuoden aikana. 2000-luvun alusta tarkasteltaessa korjuukustannuksissa on havaittavissa jopa hienoista kasvua (Sandström 2013). Puunkorjuun yksikkökustannusten kasvua selittävät useiden kustannustekijöiden, erityisesti polttoaineen, voimakas hinnan nousu sekä korjuun siirtyminen yhä enemmän päätehakkuilta harvennuksille. Korjuukoneiden teknologiakehityksen tuoma tuottavuuslisä ei ole kompensoinut konekustannusten ja korjuukohteiden muutoksen aiheuttamaa lisäystä korjuun yksikkökustannuksissa. Finnish Bioeconomy Cluster (FIBIC) Oy:n EffFibre-ohjelman (2010-2013) tavoitteena on ollut alentaa puunhankinnan kokonaiskustannuksia ja auttaa siten parantamaan metsäteollisuuden kilpailukykyä pitkällä aikavälillä (Hagström-Näsi ym. 2010). EffFibre-ohjelmaan kuuluvassa *Älykkäät kuljettajaa opastavat järjestelmät puunkorjuussa* -hankkeessa etsittiin keinoja tehostaa koneellista puunkorjuuta kuljettajaopastuksen avulla.

Puunkorjuussa koneenkuljettajalla on suuri vaikutus korjuun tuottavuuteen ja työn laatuun. Perinteisten korjuukoneiden kehitystyössä on edetty vaiheeseen, jossa kuljettajan ja koneen muodostaman yksikön tuottavuutta voidaan kasvattaa koneenkuljettajan työtapoja kehittämällä kustannustehokkaammin kuin itse konetta kehittämällä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että varsinaisia konetointintoja, esimerkiksi puun syöttönopeutta tai koneen ajonopeutta, on vaikeaa hallitusti lisätä. Toisaalta näiden toimintojen kehityspotentialilla on vain rajallinen mahdollisuus lisätä tuottavuutta.

Työn tehokas suunnittelu ja päätöksenteko ovat perusta tuottavalle työlle ja hyvälle korjuujäljelle. Kuljettajat kaipaavat tietoa ja opastusta juuri suunnittelun ja päätöksenteon tueksi (Ylimäki ym. 2012). Esimerkkeinä olennaisesti korjuutyön kokonaissuorituksen vaikuttavista tehtävistä ovat ajouraverkoston suunnittelu ja toteutus sekä puutavaran metsäkuljetuksen suunnittelu ja toteutus. Työn tukemista ja opastusta kaivataan erityisesti työuransa alussa oleville koneenkuljettajille, sillä kokemattomien ja kokeneiden kuljettajien tuottavuusero voi olla jopa kolminkertainen (Ylimäki ym. 2012) ja työssäoppimisaika, jolloin tuottavuus kasvaa lähtötilanteesta yli 50 %, voi kestää 1-2 vuotta (Purfürst 2010, Ylimäki ym. 2012). Myös kokeneilla kuljettajilla voi olla tottumus käyttää tehotomia työtapoja ja tieto eri työtapojen todellisesta vaikutuksesta korjuun tuottavuuteen voi olla puutteellinen.

Parempaan suoritustasoon voidaan päästä hyödyntämällä älykkäitä opastavia järjestelmiä. Kuljettajaa opastavia järjestelmiä on tulossa puunkorjuukoneisiin jo nykyäänkin niissä olevien tietojärjestelmien lisäksi ja tueksi. Kuljettajaa opastavia järjestelmiä on laajasti jo käytössä muilla toimialoilla (Väättäinen ym. 2012). Opastavilla järjestelmillä pyritään erityisesti vähentämään kuljettajan henkistä kuormitusta ja epävarmuutta päätöksentekotilanteissa, joissa kuljettaja kaipaa lisäinformaatiota työn tehokkaaseen ja laadukkaaseen toteutukseen. Pidemmälle viedyt älykkäät opastavat järjestelmät hyödyntävät uusinta paikannus- ja sensoriteknikkaa, jossa koneen keräämän tiedon pohjalta tehdyillä laskelmilla voidaan kuljettajalle opastaa tehokkaita, polttoainetaloudellisia sekä konetta ja ympäristöä säästäviä työtekniikoita tilannekohtaisesti. Tietojärjestelmien sekä kartta- ja paikannusteknologian kehitys mahdollistaa uudenlaisien opastavien järjestelmien kehittämisen puunkorjuun suunnittelun ja toteutuksen tueksi.

1.2 Hankkeen tavoite ja tutkimustehtävät

Älykkäät kuljettajaa opastavat järjestelmät puunkorjuussa -hankkeessa tavoitteena on ollut tutkia, kehittää ja testata uusia kuljettajaa opastavia järjestelmiä ja siihen liittyviä teknologioita korjuutyön tueksi. Hanke on kestoaltaan kolmevuotinen ja hankerahoituksessa on ollut mukana Tekes, Fibic Oy, Metsäntutkimuslaitos ja Ponsse Oyj. Hankepartnereina mukana ovat Ponsse Oyj:n lisäksi olleet Creanex Oy, Metsähallitus, Metsä Group Oyj, Motoajo Oy, Jukka Virnala Oy, T:mi Jarmo Mustalammi ja Pohjois-Karjalan ammattiopisto Valtimo.

Hankkeen kokonaistavoitteena oli etsiä uusia automaattiseen tiedonkeruuseen ja olemassa olevaan dataan perustuvia teknologioita, joiden avulla koneellisen puunkorjuun kustannus- ja ympäristötehokkuutta voidaan parantaa. Ympäristötehokkuuteen voidaan tässä yhteydessä liittää hyvä korjuujälki ja polttoainetaloudellisuus. Hankkeessa kehitettiin laserkeilaukseen pohjautuva karttaopaste tarkasta maastomallista, joka tarjoaa kuljettajalle aiempaa tarkempaa tietoa korjuukohteen kulkukelpoisuudesta hakkuun ja metsäkuljetuksen aikana. Puutavaran metsäkuljetuksessa kokeiltiin puutavaran tarkan laji-, määrä- ja sijaintiedon hyödyntämistä kuljetuksen reitityksessä harvennuskohteilla, joissa kuljettajan suoritusta verrattiin metsäkuljetusmatkaa minimoivaan reittioptimointiin ja sitä tukevaan työtekniikkaan. Kolmantena teemana oli hakkuukoneen CAN-väylästä mitattuihin tietoihin pohjautuvan maaston kulkukelpoisuuskartan kehittäminen.

Hankkeen alussa toteutettiin kaksi tutkimusta, joista ensimmäisessä selvitettiin opastavien järjestelmien käyttöä ja kokemuksia muilla toimialoilla (Väättäinen ym. 2012). Aiempiin tutkimuksiin ja kirjallisuuteen perustuvassa tarkastelussa tuotiin myös esille kuljettajaopastukseen ja aina automaatioon asti käytettäviä tiedonkeruulaitteita ja sensoreita. Toisessa tutkimuksessa selvitettiin kyselytutkimuksella kuljettajaa opastavien järjestelmien tarvetta koneellisessa puunkorjuussa (Ylimäki ym. 2012). Kyselyn tulosten perusteella osoitettiin korjuutyön alueet, joissa opastukselle on eniten tarvetta.

Tässä raportissa esitetään tiiviisti avaintulokset hankkeen kolmesta tutkimustehtävästä, jotka olivat:

1. Tarkkaan maastomalliin perustuva karttaopaste LoggingMap hakkuukoneenkuljettajan tukena
2. Korjuukohteen kulkukelpoisuuden määrittäminen hakkuukoneen CAN-väylätiedoista
3. Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat kuljetustavat, opastustarpeet ja -mahdollisuudet.

Tehtävien perusteellisempi esitys ja läpikäynti on esitetty kullekin tutkimustehtävälle laadituissa omissa raporteissaan, jotka julkaistaan Metsäntutkimuslaitoksen Työraportteja -sarjassa.

2 Avaintulokset

2.1 Tarkkaan maastomalliin perustuva karttaopaste hakkuukoneenkuljettajan tukena

2.1.1 Lähtökohta ja tavoite

Puunkorjuun kokonaistuottavuuden ja korjuuvaurioiden kannalta ajouraverkoston suuntauksella ja sijoittelulla on merkittävä vaikutus. Ajouraverkoston ennakkosuunnittelussa tehdään ratkaisuja, joilla on vaikutusta sekä hakkuun että metsäkuljetuksen tuottavuuteen sekä ajourien välittömässä läheisyydessä syntyviin korjuuvaurioihin. Hyvä ennakkosuunnittelu mahdollistaa ajourien sijoittamisen metsäkuljetuksen kannalta suotuisiin kohtiin. Hyvän ajouraverkoston suunnittelun pohjana tulee olla metsäkuljetuksen kannalta kriittisten alueiden välttäminen. Ajouria ei pidä sijoittaa maastonkohtiin, joissa ajouran sivuttais- tai pitkittäiskaltevuus muodostuu liian suureksi. Erityisesti ajouran sivuttaiskaltevuus hidastaa metsäkuljetusta kuljettajan joutuessa varomaan kuorman liiallista kallistumista sekä heilahteluja liikkeessaan epätasaisella alustalla. Kuorman heilahtelu voi aiheuttaa runkovaurioita ajouravarsipuihin tai pahimmillaan kuormatraktorin kaatumisen.

Hakkuukoneen kuljettajan ammattitaidolla on suuri merkitys ajouraverkoston kokonaispituuteen ja laatuun. Hakkuukoneen kuljettajan vastuulla on ajouraverkoston suunnittelu ja toteuttaminen. Suunnittelussa kuljettajalla on yleensä apunaan hakkuukoneen näytöllä kartta hakkuukohteesta, joka pohjautuu Maanmittauslaitoksen peruskartta-aineistoon. Metsäkoneissa olevat elektroniset kartat eroavat perinteisistä paperikartoista käytännössä vain reaaliaikaisen GPS-paikannuksen ja automaattisesti tallentuvan kuljetun reitin osalta. Kartalla voi olla lisätietoina erilaista puunhankintaorganisaatiokohdata informaatiota hakkuukohteesta ja sen erityispiirteistä. Metsäkoneenkuljettajille tehdyn kyselytutkimuksen (Ylimäki ym. 2012) mukaan nykyinen karttatieto ei ole aina riittävää ajouraverkoston tarkalle suunnittelulle. Hakkuukoneenkuljettajat halusivat yksityiskohtaisempaa ja tarkempaa tietoa hakkuukohteen korjuuoloista ja ajouraverkoston kannalta ongelmallisista kohdista kuten pehmeistä tai maastonmuodoista.

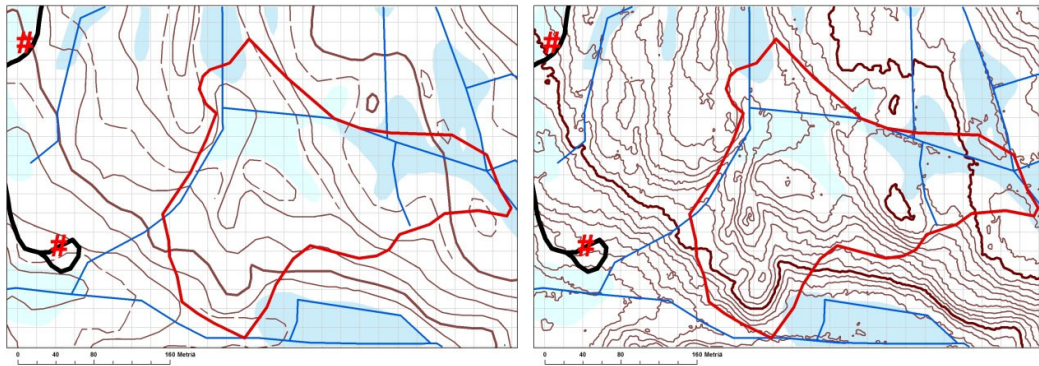
Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistojen perusteella on mahdollista luoda uudenlaisia karttatasoja, joiden avulla hakkuukohteen sisäinen korkeusvaihtelu ja maaston muodot on mahdollista esittää perinteisiä karttoja havainnollisemmin. Laserkeilausmenetelmän avulla aineistojen korkeus- ja sijaintitarkkuus paranee entisiin aineistoihin verrattuna. Tärkeimpiä aineistoja korkeusvaihtelun kuvaamiseen on digitaalinen maaston korkeusmalli (DEM). Maanmittauslaitoksella on ollut tarjolla koko maan kattava perinteisin menetelmin tuotettu korkeusmalli, jonka 10×10m pikselikoko ja kahden metrin korkeustarkkuus on liian karkeaa hakkuukohteen sisäisen vaihtelun kuvaamiseen. Maanmittauslaitos tuottaa parhaillaan valtakunnallista laserkeilaukseen perustuvaa korkeusmallia, jonka pikselikoko on 2×2 m ja korkeustarkkuus ±0,3 m. Tämän huomattavasti tarkemman korkeusmallin perusteella on mahdollista kuvata myös pienialaisia maastonmuotoja ja äkillisiä muutoksia rinnekaltevuuksissa.

Osahankkeessa selvitettiin uusia ratkaisumalleja yksityiskohtaisen kartta-aineiston luomiseen ja esittämiseen hakkuukoneenkuljettajalle nykyisen kartta-aineiston rinnalle/tilalle. Lähtökohtana oli käyttää laserkeilausaineistoja niiden suuren tarkkuuden takia. Tämän lisäksi tutkittiin erilaisia karttatasojen visualisointimahdollisuuksia ja sovellettavissa olevia tapoja esittää karttatasoja havainnollisesti.

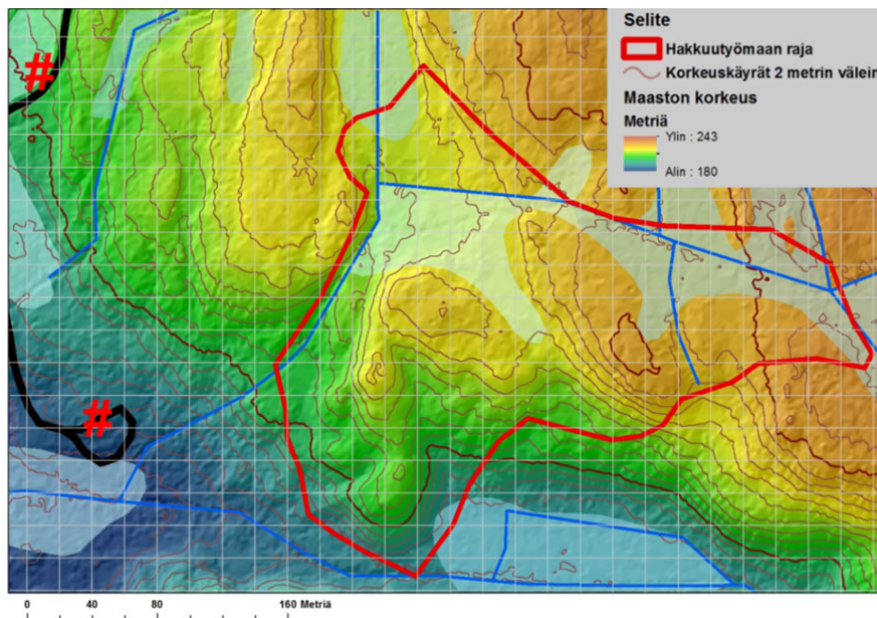
2.2.2 Avaintulokset

Moderneihin paikkatietoanalyysiohjelmiin on kehitetty ominaisuuksia, joilla pystytään käsittelemään digitaalisia korkeusmalliaineistoja. Monet näistä ominaisuuksista ovat vakiintuneessa käytössä erilaisissa maastonmuotoja kuvaavissa analyyseissä. Yksi merkittävä mahdollisuus käsiteltäessä digitaalista korkeusmallia on tuottaa sijaintitarkkoja korkeuskäyriä. Korkeuskäyriä on mahdollista tuottaa pienemmälläkin korkeuserolla kuin perinteisten korkeuskäyrien viiden metrin erottelu (kuva 1). Tiheämmällä korkeuserolla tuotetut korkeuskäyrät kuvaavat paremmin maaston pienialaista korkeusvaihtelua ja äkillisiä muutoksia, joilla on vaikutusta hakkuukoneen kuljettajan ajouraverkoston suunnitteluun.

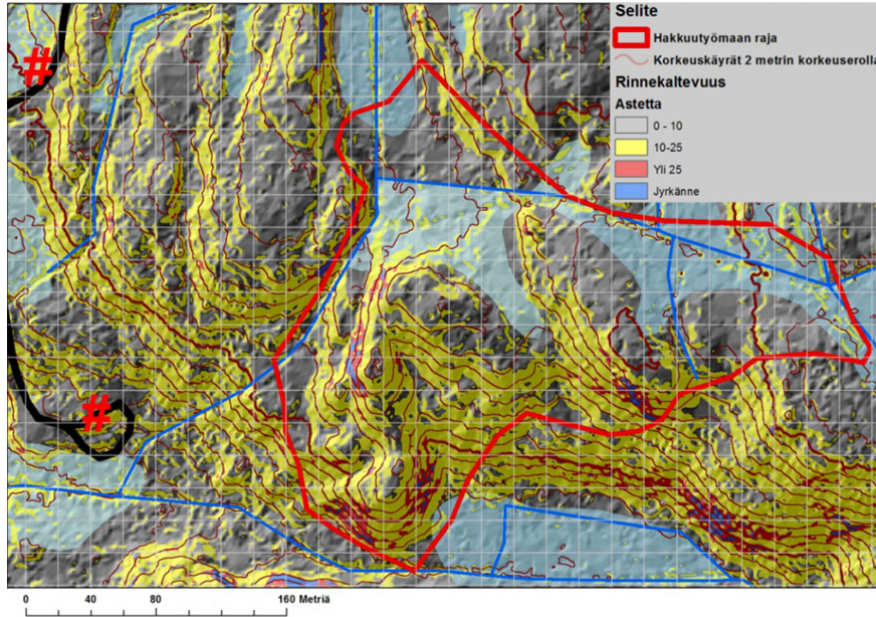
Yleisesti maaston korkeusmallista tuotettuja karttatasoja ovat maaston pinnanmuotojen vinovalvarjostus (kuva 2), rinnekaltevuus (kuvat 2 ja 3) ja rinteiden suunta. Taulukossa 1 on esitetty edellä mainittujen karttatasojen ominaisuuksia.



Kuva 1. Peruskartta ja laserkeilausaineiston perusteella lasketut korkeuskäyrät kahden metrin korkeuserolla. (Aineistot Maanmittauslaitos ja Metsähallitus 2012. Analyysit Metla)



Kuva 2. Digitaalinen korkeusmalli on liukuvärjätty ja mallista on laskettu korkeuskäyrät kahden metrin välein korkeusvaihtelun havainnollistamiseksi. (Aineistot Maanmittauslaitos ja Metsähallitus 2012. Analyysit Metla)



Kuva 3. Laserkeilatun korkeusmallin perusteella hakkuukohteelle on laskettu vinovalvarjostus, korkeuskäyrät kahden metrin korkeuserolla ja rinnekaltevuudet, jotka on luokiteltu kuormatraktorin liikkuvuusrajoitteiden mukaisesti. (Aineistot Maanmittauslaitos ja Metsähallitus 2012. Analyysit Metla)

Taulukko 1. Korkeusmallista laskettavien karttatasojen ominaisuuksia.

karttataso	Käyttö	Pikselin arvo luokiteltavissa	Kuvaus
Korkeusmalli	Korkeuden muutos/visualisointi	kyllä	Pikseli sisältää maaston korkeusarvon
Vinovalvarjostus	visualisointi	ei	Visualisointitarkoitukseen luotu karttataso, pikselin arvo kuvaa valon ja varjon suhdetta
Rinnekaltevuus	Korkeuden muutos/visualisointi	kyllä	Pikselin arvo kuvaa rinnekaltevuutta kyseisessä pisteessä. On mahdollista esittää jatkuvana pintana tai luokitelluna kaltevuusluokkiin
Rinteen suunta	Korkeuden muutos/visualisointi	kyllä	Pikseli kuvaa rinteen suuntaa. On järkevää visualisoida ja luokitella esim. ilmansuuntien mukaan

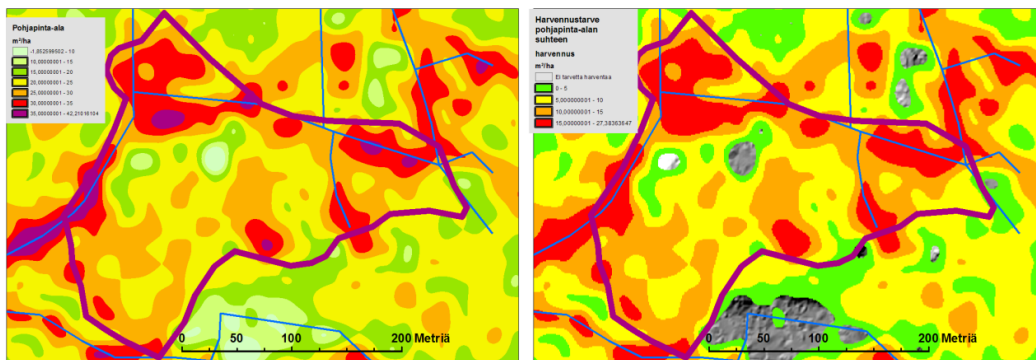
Hankkeen aikana kehitettiin LoggingMap-konsepti, jonka tarkoituksena on esittää kuljettajan työtä tukevaa informaatiota karttaperusteisesti metsäkoneen näytön avulla. Esitettävä tieto voi olla mitä tahansa jota kuljettaja kokee tarvitsevansa senhetkisissä työskentelyolosuhteissa. Konseptiin perustuen järjestettiin kolme testaus- ja demonstrointijaksoa eri korjuuympäristöissä Rautavaaralla marraskuussa 2012 ja tammikuussa 2013. Kaikki demonstrointikohteet sijaitsivat Metsähallituksen työmailla. Yhteistyö Metsähallituksen kanssa mahdollisti maastotietoaineistojen lisäksi myös sijaintitarkan laserkeilatun puustoinformaation käytön ja kokeilemisen kuljettajan opastamiseksi. Demon-

stroitikohteilla toimi kaksi kuljettajaa, joista ensimmäinen toteutti hakkuun kahdella ensimmäisellä kohteella ja toinen viimeisellä hakkuukohteella. Demonstraatioissa kuljettajille esitettiin useita maastonmuotoja kuvaavia karttatasoja erillisellä kannettavalla tietokoneella hakkuukoneen oman näytön rinnalla (kuva 4). Erillinen tietokone mahdollisti monipuoliset karttasovellustestaukset ja yksityiskohtaisten karttojen esittämisen ja reaaliaikaisen vertailun nykyiseen kartta-aineistoon.



Kuva 4. LoggingMap-demonstraatiot. Tarkkaa karttatietoa esitettiin kuljettajalle hakkuukoneen oman näytön rinnalla. (kuva: Jari Ala-Illomäki/Metla)

Kuljettajille esitettiin taulukossa 1 esitetyistä karttatasoista erilaisia visualisointiversioita. Näin pyrittiin löytämään havainnollisimmat tavat esittää tarkkaa informaatiota kuljettajalle, joka ei ole aikaisemmin tottunut lukemaan kyseisiä karttatasoja. Metsähallitukselta saadun puustoaineiston perusteella kuljettajalle esitettiin puuston vaihtelua kohteen eri osissa. Puuston vaihtelua kuvaavia karttatasoja olivat runkoluku (r/ha), tilavuus (m³/ha), pituus (m), pohjapinta-ala (m²/ha) ja harvennustarve pohjapinta-alan mukaan (m²/ha), kun tavoitepohjapinta-ala oli tiedossa (kuva 5).



Kuva 5. Puuston pohjapinta-ala ja harvennustarve Logging Map -karttasovelluksella esitettynä. (Aineistot Maanmittauslaitos ja Metsähallitus 2012. Analyysit Metla)

Demonstraatioiden jälkeen kuljettajilta kerättiin palautetta tarkemmasta karttainformaatiosta ja eri visualisointivaihtoehdoista. Yhteinen näkemys kuljettajilla oli, ettei nykyinen karttatieto ole riittävän tarkkaa ajouraverkoston suunnitteluun maastoltaan vaihtelevilla kohteilla ja jolloin näkyvyys on huono vuorokaudenajan, säätilan tai tiheän puuston takia. Tarkan karttainformaation korkeuskäyrät, rinnekaltevuudet ja korkeusvaihtelun kuvaaminen värein nähtiin erittäin hyödyllisiksi karttatasoiksi. Luokitellun aineiston, kuten rinnekaltevuuden, kohdalla visualisoinnin tulisi olla mahdollisimman selkeää ja sisältää vain vähän luokkia. Luokittelun tulisi olla laadittu metsäkoneiden liikkuvuuden kannalta kriittisten raja-arvojen mukaan. Puustotieto ja sen vaihtelu nähtiin hyödylliseksi tiedoksi harvennuksen kannalta, mutta ajouraverkoston suunnitteluun sillä ei nähty olevan vaikutusta. Tähän on syynä hakkuualueen rajausta sekä se, että ajouraverkoston tulisi joka tapauksessa kattaa koko alue.

2.2 Uudet tekniset menetelmät maaston kulkukelpoisuuden ennustamiseen ja hakkuun suunnitteluun

2.2.1 Kulkukelpoisuuskartan luonti anturoidulla hakkuukoneella

Ajoneuvon teho käytetään maastossa lähinnä vierintävastukseen verrattavissa olevan pyörien etenemistä vastustavan voiman (jäljempänä kulkuvastus), rinnevastuksen ja hitausvoiman voittamiseen. Tasaisessa maastossa vakionopeudella etenevän ajoneuvon etenemiseen käyttämä teho vastaa suuruudeltaan kulkuvastuksen kuluttamaa tehoa. Mittaamalla ajoneuvon etenemisnopeus ja sen käyttämä teho voimansiirrosta on näin ollen mahdollista laskea arvio kulkuvastuksesta. Kulkuvastuksen arvo edellä kuvatuissa oloissa taas riippuu lähinnä pyörien uppoamasta kulkualustaan ja se puolestaan maaston lujisuuden suhteesta ajoneuvon aiheuttamaan kuormitukseen. Ajoneuvon kulkuvastusta mittaamalla voidaan siis saada arvio maaston kulkukelpoisuudesta. Mittaamalla ajourilla ensimmäisenä liikkuvan hakkuukoneen kulkuvastusta hakkuukohteelle on mahdollista luoda kulkukelpoisuuskartta maastovaurioita ajatellen ongelmallisempaa kuormatraktoria varten. Mittausta voidaan täydentää mittaamalla pyörien uppoamaa sekä raiteensyvyyttä myös kuormatraktorissa, jolloin nykyinen työvoimavaltainen korjuujälkiseuranta saadaan automatisoitua.

Perusedellytykset järjestelmän toteutukselle ovat jo olemassa: voimansiirron teho voidaan mitata hakkuukoneen CAN-väylästä ja paikkaan sidottu kulkukelpoisuustieto välittää sen karttajärjestelmään ja edelleen kuormatraktoriin. Mittaus tapahtuu normaalin hakkuutyön ohessa, kattaa jatkuvana koko ajouraverkon eikä sen kerääminen aiheuta kustannuksia, joten perinteisen lujuusmittauksen huonoimmat puolet vältetään.

2.2.2 Mittausjärjestelmä

Tutkittavaksi valitun 8-pyöräisen Ponsse Fox -hakkuukoneen ajovoimansiirron tehonmittausta varten siihen liitettiin paineanturi CAN-väylän kautta saatavaa mittaustietoa täydentämään. Ajovoimansiirron tilavuusvirtaa estimoititiin seuraamalla CAN-väylästä ajovoimansiirron hydraulipumpun ohjausvirtaa. Lisäksi seurattiin moottorinohjauksen ilmoittamaa hetkellistä moottoritehoa sekä voimansiirron pyörintänopeutta. Seurattavat suureet tallennettiin CAN-väylästä ja paineanturilta Creanex Oy:n toimesta erillisellä tallennuslaitteella. GPS-paikannuksen epävarmuuden välttämiseksi hakkuukoneen ajonopeutta ja kiihtyvyyttä mitattiin siihen kiinnitetyllä sähköisesti anturoidulla lankamittalaitteella. Hakkuukone varustettiin lisäksi raiteensyvyyttä ja pyörien uppoamaa mittaavilla ultraääniantureilla (Kuva 6). 8-pyöräisellä Ponsse Wisent -kuormatraktorilla selvitettiin hakkuukoneella mitatun kulkukelpoisuuden ennustearvoa. Kokeissa selvitettiin kuormatraktorin pyörien uppoamaa ja raiteensyvyyttä, joten siihen asennettiin ainoastaan ultraäänimittauslaitteisto sekä anturoitu lankamittalaite.



Kuva 6. Ponsse Fox ulomman testiradan pehmeimmällä osuudella. Pyörien uppoamaa ja raiteensyvyyttä mittaavat ultraäänianturit kiinnitettiin hakkuukoneen takana ja telien välissä näkyviin puurakenteisiin telineisiin. (Kuva: Jari Ala-Illomäki/Metla)

2.2.3 Koejärjestelyt

Kaksi noin 180 m pituisia vierekkäistä ja samankeskeistä testirataa ulottuivat kantavalta kivennäis- maalta turvemaalle. Hakkuukonepohjaisen mittausjärjestelmän tulosten validoimiseksi maaperän leikkausmoduuli mitattiin ajourien vasemmasta ja oikeasta laidasta 4 m välein manuaalisesti Ala-Illomäen (2013) kehittämällä isolla piikkisiipikairalla. Turvekerroksen paksuus mitattiin samoista mittauspisteistä rassilla. Raiteensyvyys mitattiin myös manuaalisesti jokaisen ajokerran jälkeen 4 m välein turvemaan pinnan lujuuden mittauskohdista.

Miestyönä hakatulla uran osuudella voitiin hakkuukonepohjaista mittausjärjestelmää testata keskeytyksettömällä ajolla, kun taas hakkuukonehakuun yhteydessä saatiin kuva mahdollisuuksista mitata maaperän lujuuskäyttäytymistä hakkuukoneen liikkeellelähdessä. Sähköisten mittaus tulosten perusteella voitiin laskea ulkopuolisista häiriötekijöistä, kuten maanpinnan kaltevuus ja ajoneuvon kiihtyvyys, suodatettu hakkuukoneen kulkuvastusarvo ja edelleen nettovetovoima, jota käytettiin kuvaamaan ajoneuvon liikkuvuutta.

Sisemmällä uralla ajettiin hakkuukoneen jälkeen kuormatraktorilla, jonka kuljettaja sai päättää kuorman koon ja ajoreitin pituuden niin, että kiinnijuuttumisen riski olisi vähäinen. Kuorman paino oli ainoastaan 20,5 kN, millä ei kuitenkaan ole tutkimuksen tarkoitusta eli kulkukelpoisuuskartan muodostamista ja validointia ajatellen suurta merkitystä. Sekä hakkuukone että kuormatraktori oli varustettu turvemaaloihin soveltuvilla kantavilla Olofsfors Eco Magnum –teloilla, joiden leveys hakkuukoneessa edessä oli 1023 mm ja takana 916 mm sekä kuormatraktorissa 916 mm edessä ja takana.

Suurimman saavutettavissa olevan vetovoiman ja turvemaan pinnan lujuuden selvittämiseksi turvemaan pinnan leikkauslujuuden mittauksia tehtiin vielä ulommalla testiradalla pienemmällä piikkisiipikairalla (Ala-Illomäki 2013).

2.2.4 Kulkukelpoisuuden laskenta

Kulkukelpoisuuden määrittämiseksi hakkuukoneen voimansiirron ja/tai moottorin teho muutettiin ajonopeudella jakamalla kulkusuunnassa vaikuttavaksi voimaksi. Kulkusuunnassa vaikuttavasta voimasta vähennettiin rinnevastus sekä nopeuden derivoiminnin avulla saatu kiihtyvyydestä aiheutuva hitausvoima, jolloin jäljelle jäi kulkuvastuksen voittamiseen käytetty voima. Tarkasteltavia liikkeen suuntaisia ja sitä vastustavia voimia on tarkasteltu kertoimina jakamalla ne ajoneuvon painolla. Suurin saavutettavissa oleva vetovoima mallinnettiin turvemaan pinnan mitattua leikkauslujuutta sekä maastokokeiden aikana tehtyjä havaintoja hyväksi käyttäen.

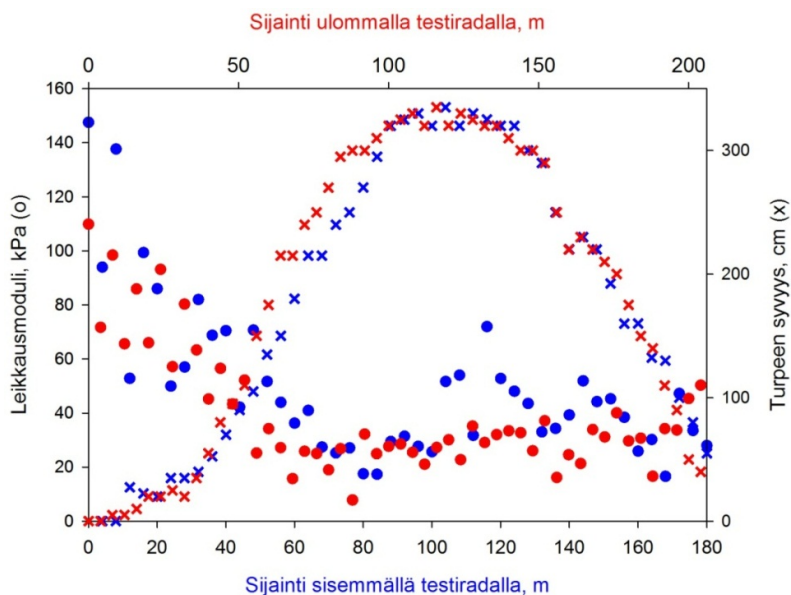
Kun suurimmasta saavutettavissa olevasta vetovoimasta vähennetään kulkuvastuksen voittamiseen käytetty voima, saadaan kiihdytykseen ja rinteeseen nousuun käytettävissä oleva nettovetovoima. Tutkitun tyyppisillä ajoneuvoilla tyydyttävä varmuus kulkukelpoisuudesta saavutetaan nettovetovoimakerroimen arvolla 0,2...0,4 muun muassa pinnan epätasaisuudesta ja rinnekaltevuudesta riippuen.

Mitatuille kulkukelpoisuutta kuvaaville tunnuksille oli ominaista voimakas vaihtelu, minkä johdosta niistä käytettiin liukuvia keskiarvoja. Hakkuukoneen keskiarvoistavassa mittajärjestelmässä arvioitiin olevan noin 0,7 s viive, joka otettiin huomioon eri järjestelmistä saatuja tietoja yhdistettäessä. Osin pintakasvillisuudesta heijastunut ultraäänietäisyysmittaus johtaa mitatun etäisyyden aliarvion ja edelleen raiteen syvyyden sekä pyörän uppoaman yliarvion. Tämän johdosta ultraääniantureilla mitatuista etäisyyksistä käytettiin liukuvia minimiarvoja.

2.2.5 Tulokset

Testiratojen ominaisuudet

Ratojen soveltuvuus kokeen tarkoitukseen oli erinomainen (kuva 7). Maksimivetovoimalaskelmissa käytetty turpeen pinnan leikkauslujuus ulommalla radalla vaihteli välillä 22...38 kPa. Testiradat olivat valtaosaltaan tasaisia. Kivennäismaan rajalla kaltevuus vaihteli -1 % ja 2 % välillä.



Kuva 7. Leikkausmoduuli (●) ja turpeen syvyys (x) sisemällä (sininen) ja ulommalla (punainen) testiradalla.

Mittausjärjestelmän toimivuus

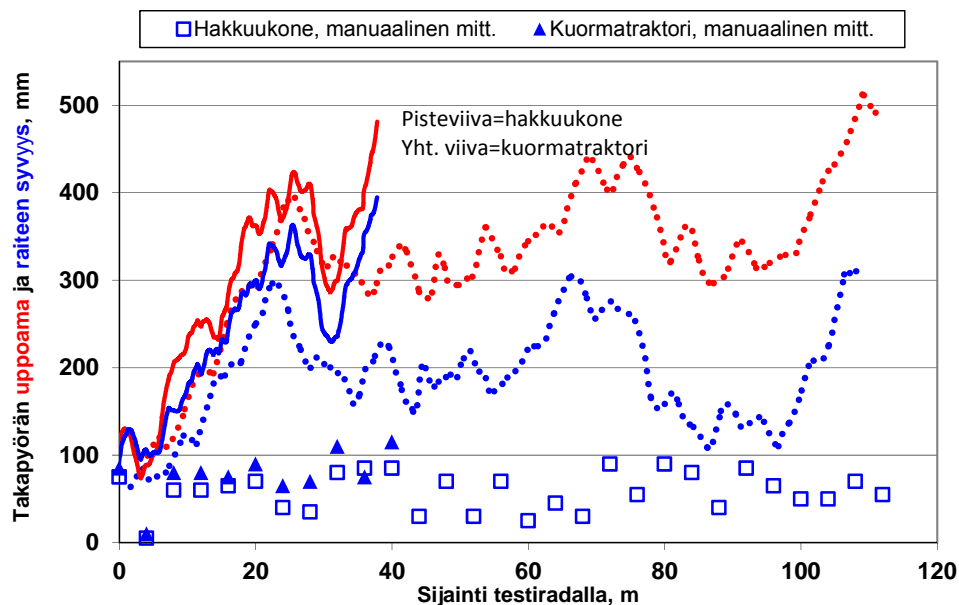
CAN-väylästä sekä hakkuukoneen hydraulikasta tehdyissä mittauksissa oli joidenkin tunnusten kohdalla ongelmia. Selvimmillään ne johtuivat anturiviasta, mutta voimansiirron paineen tallennusongelmien syy ei selvinnyt. Ajomoottorin pyörintänopeuden joko resoluutioltaan tai mittaustaajuudeltaan alhainen mittausta rajoitti luiston määrittämisen tarkkuutta. Metsäkoneisiin kiinnitetyt ulkopuoliset anturit olivat metsäajossa alttiita siirtymään paikaltaan. Ultraääniantureiden toiminta sadessaällä oli epävarmaa. Antureiden lähetyksen/vastaanottopinnan puhtaus ja kuivuus oli varmistettava ennen mittauksia.

Liikkuvuustunnukset

Pyörien uppoama ja raiteensyvyys

Hakkuukoneen liikkuvuustunnusten käyttö ajouran kulkukelpoisuuden ennustamiseen kuormatraktorille edellyttää mm. näiden raiteen syvyyksien riippuvuutta. Hakkuukoneen raiteen syvyys selitti lineaarisella regressiomallilla kuormatraktorin raiteen syvyyden vaihtelusta ensimmäisellä ajokerralla 74 % regressiokertoimen ollessa 1,17. Piikkisiipikairalla mitattu leikkausmoduuli oli lupaava raiteen syvyyden selittäjä, esim. ulommalla radalla se selitti 42 % hakkuukoneen raiteen syvyyden vaihtelusta.

Hakkuukoneen manuaalisesti mitattu raiteen syvyys oli koko tarkasteltavalla jatkuvan ajon alueella alle 100 mm (kuva 8). Kuormatraktorin manuaalisesti mitattu raiteen syvyys ei ylittänyt 115 mm. Ultraääniantureilla mitattu pyörien uppoama ja raiteen syvyys olivat huomattavan suuret verrattuna manuaalisesti mitattuun raiteen syvyyteen. Hakkuukoneen ultraääniantureilla mitatun pyörien uppoaman ja raiteen syvyyden ero on selvästi kuormatraktorin vastaavaa suurempi.

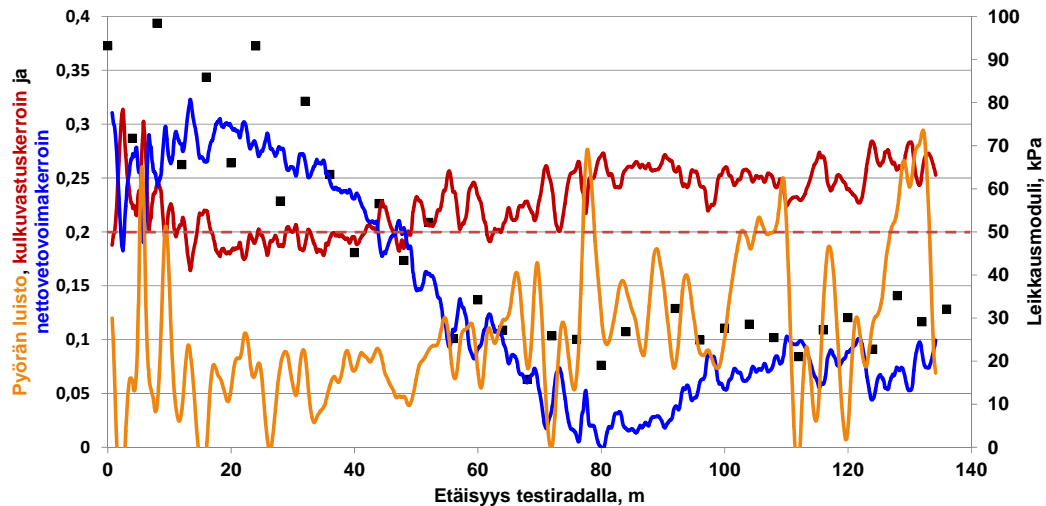


Kuva 8. Hakkuukoneen ja kuormatraktorin takapyörän uppoama ja raiteen syvyys eri menetelmin mitattuna sisemmän testiradan alun jatkuvan ajon osuudella.

Luisto, kulkuvastus, nettovetovoima ja kulkukelpoisuus

Nettovetovoiman laskentaa varten tarvittava suurin saavutettavissa oleva vetovoimakerroin oli muodostetun mallin mukaan: suurin vetovoimakerroin = $0,16 \cdot \ln(\text{leikkausmoduuli}) - 0,21$. Kantavalla kivennäismaalla vetovoimakertoimeksi on oletettu 0,6.

Kuvassa 9 on esitetty tärkeimmät hakkuukoneen liikkuvuutta kuvaavat tunnuksat. Kuvasta havaitaan kulkuvastuksen ja luiston kasvavan siirryttäessä radan pintakerroksen suhteen lujuudeltaan heikomalle alueelle. Havaittavissa on myös Suvisen ja Saarilahden (2006) sekä Ringdahl ym. (2012) havaitsema tunnusten epävakaisuus liikkeen alussa. Alun epävakauden jälkeen luisto tasaantuu n. 15 % tasolle, mikä on sopusuunnassa Ringdahl ym. (2012) metsämaalla tekemien mittausten kanssa. Turpeen pinnan lujuuden alentuessa luiston taso ja sen vaihtelu kasvavat. Kulkuvastuksen käyttäytyminen on samankaltainen. Liikkuvuutta ja kulkukelpoisuutta parhaiten kuvaava nettovetovoima laskee voimakkaasti maan pinnan lujuuden alentuessa. Mikäli kulkukelpoisuuden alarajana tasaisella suolla pidetään aiemmin mainittua nettovetovoimakertoimen arvoa 0,2, olisi testirata ollut kuormatraktorin kuljettajalle välitettävässä tiedossa kuvassa 8 tarkasteltavalta osuudelta kulkukelvoton noin pituudesta 50 m eteenpäin.



Kuva 9. Tärkeimmät hakkuukoneen liikkuvuutta kuvaavat tunnuksat ulomman testiradan jatkuvan ajon osuudella. Kuormatraktorin kulkukelpoisuuden turvalliseksi alarajaksi oletettu nettovetovoimakertoimen 0,2 arvo on merkitty kuvaan punaisella katkoviivalla.

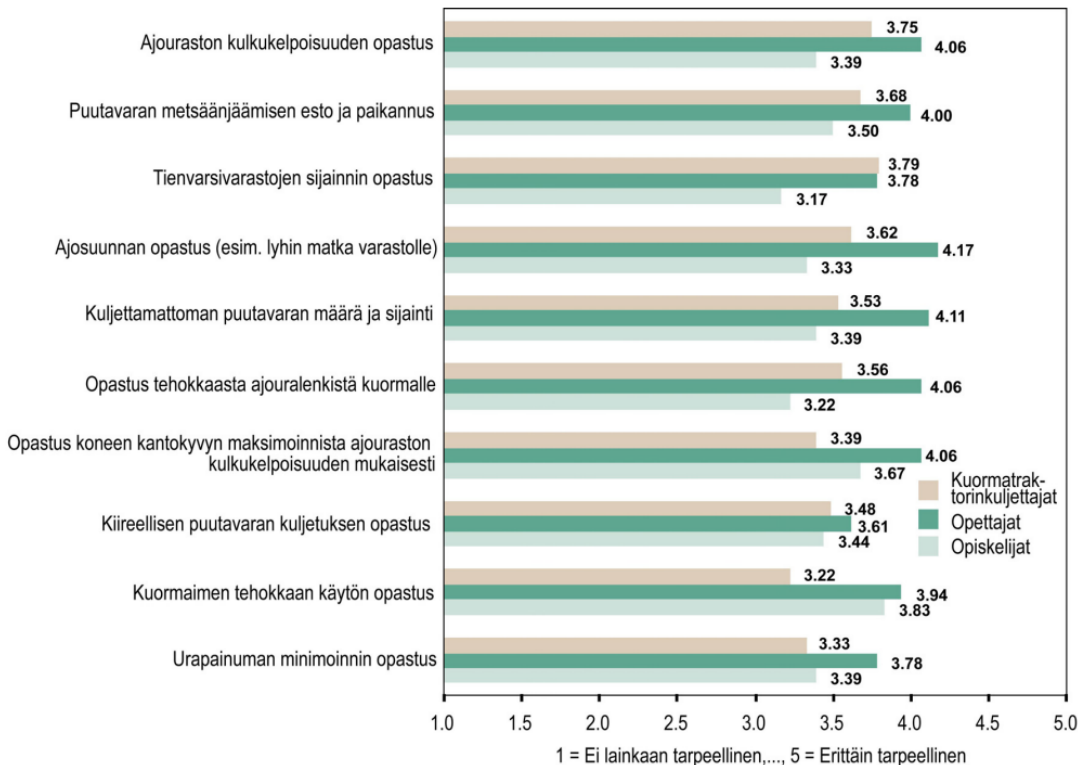
Mittausten mukaan pyörien luisto liikkeelle lähdössä on lyhytaikaisesti yli 40 %. CAN-väylästä saatavan voimansiirron pyörintänopeuden alhainen tarkkuus ja/tai keskiarvoistaminen vaikeutti vetovoimakertoimen ja pyörien luiston riippuvuuden määrittämistä liikkeellelähdössä, joten niitä on pidettävä lähinnä suuntaa antavina. Käyrien perusmuoto oli kuitenkin oikean suuntainen.

2.3 Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat kuljetustavat ja tarve opastukselle

2.3.1 Lähtökohta ja tavoite

Puutavaran metsäkuljetuksen tuottavuudessa on todettu olevan jopa kolminkertaisia eroja kuljettajien välillä (Ylimäki ym. 2012). Erojen on havaittu aiheutuvan pääosin kuljettajan työtekniikkavalinnoista ja työtavoista kuljettaa puutavaralajit korjuukohteelta tienvarsivarastolle. Tilanne on tiedostettu jo pitkään, mutta tehokkaita toimintamalleja saati opastavia järjestelmiä puutavaran metsäkuljetuksen reititykselle ei ole ollut käytössä. Korjuukohteilla, joissa puutavaralajien määrä on suuri ja puutavaralajien suhteet vaihtelevat korjuukohteen eri osissa, puutavaran tehokas kuljettaminen on hankalaa. Haastetta metsäkuljetukseen lisää entisestään se, jos korjuukohteella on kulkukelpoisuusrajoitteita, kuten jyrkkiä tai pehmeitä maaston kohtia.

Hankkeessa toteutetussa Ylimäen ym. (2012) tutkimuksessa, jossa selvitettiin metsäkoneenkuljettajien näkemyksiä opastavien järjestelmien tarpeesta puunkorjuun tukena, erityisesti korjuukohteen kulkukelpoisuustieto sekä puutavaran sijaintitieto saivat suurimman merkityksen kuormatraktorin kuljettajien keskuudessa (kuva 10). Tällä hetkellä osalla metsäkonevalmistajista on tarjolla jonkinasteista karttapohjalla esitettävää paikkatietoa puutavaralajeista, mutta järjestelmien käyttö on hyvin vähäistä. Paikkatiedon tarkkuuden paraneminen ja tarkkojen paikannuslaitteiden investointikustannusten pieneneminen on ensiedellytys toimivan ja käyttäjäystävällisemmän karttaopastussovelluksen kehittämiseksi puutavaran metsäkuljetukseen.



Kuva 10. Opastuksen tarve lähikuljetuksessa eri vastaajaryhmillä, kymmenen tarpeellisinta kohtaa. Vastaajaryhmien keskiarvot (Ylimäki ym. 2012).

Puutavaran metsäkuljetus on reittioptimoinnin suhteen äärimmäisen haastava ympäristö ja se poikkeaa merkittävästi perinteisestä tavarankuljetuksesta. Puutavaran metsäkuljetuksen optimaalisia reititysratkaisuja on tutkittu ensimmäisen kerran vuonna 1999 ruotsalaisten toimesta. Puutavaran metsäkuljetuksen reittioptimointia selvittävässä tutkimuksessa optimoinnin avulla saatavat hyödyt ovat olleet noin 10 % ajanmenekin ja kokonaisajomatkan säästönä (Arvidsson ym. 1999, Carlsson ym. 1999, Flisberg ym. 2007). Edelleenkin puutavaran lähikuljetuksen reittioptimointia ei ole onnistuttu tuotteistamaan käytännön kuormatraktorityöhön. Selvittämättä on vielä useita adaptiiviseen reittioptimointiin olennaisesti liittyviä tekijöitä metsäkuljetuksesta.

EffFibren WP3-hankkeen Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat työtavat ja tarve opastukselle - osatutkimuksessa selvitettiin metsäkuljetuksen opastamiseen kehitettävän järjestelmän potentiaalia. Tutkimuksessa selvitettiin myös tehokkaita puutavaran kuljetustapoja sekä tieto- ja paikannustekniikan tuomia mahdollisuuksia opastuksen kehittämiseksi.

2.2.2 Avaintulokset

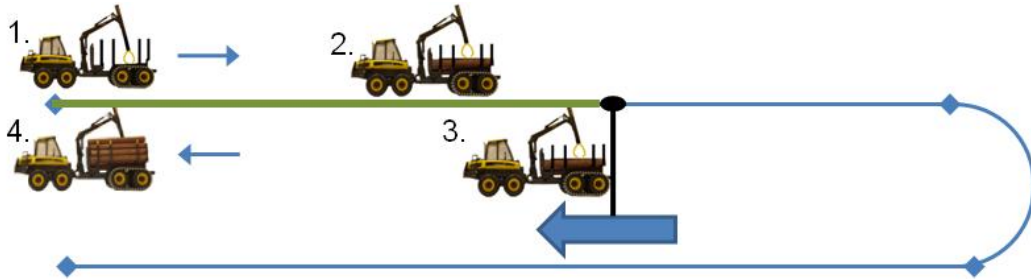
Jotta jälkilaskennat ja analyysit metsäkuljetuksen reitityksen tuomista hyödyistä voitiin tehdä, tutkimuksen perusaineistoksi kerättiin laaja ja monilähteinen työntutkimus- ja olosuhdetietoaineisto kolmelta toisen harvennusvaiheen hakkuukohteelta. Tutkimuksen kuormatraktorinkuljettaja kuljetti yhteensä 35 kuormaa. Kerätty työntutkimusaineisto sisälsi perinteisen aikaturkimuksen jatkuva-aikamittauksella, automaattisen konetoimintojen ja polttoainekulutuksen tallennuksen Ponssen konemonitorintisovelluksella, ajouraverkoston reittitallennuksen, kuljetustuotoksen seurannan sekä kuutiometreissä että tonneissa ja paikkaan sidotun puutavaralajikasatietojen keruun. Tutkimuskuljettaja kuljetti puutavarat tutkimuskohteilta pääosin monilajikuormina ja ajomallilla, jossa kukin ajouralengki tyhjennettiin järjestelmällisesti. Kokeneella ja taitavalla kuljettajalla monilajikuorman kuormaus ja purku oli hallittua ja tehokasta.

Kuormatraktorin kuljettajan kuljetussuoritusta verrattiin ArcGis-sovelluksen VRP-optimointilisäosalla generoituun kuljetusmatkaa minimoivaan laskentatulokseen. VRP (vehicle routing problem) -optimointi laskee annettujen lähtötietojen turvin lyhyimmän kokonaisajomatkan sekä esittää kuljetusreitit kullekin kuormalle. Koska laskenta antaa teoreettisen minimin kuljetusmatkalle ja kuormakohtaisille kuljetusreiteille, osa reiteistä poikkeaa yleisesti käytössä olevista kuljetusratkaisuista. Laskennan onnistumisen edellytyksenä oli sijainti- ja määrätarkka tieto kaikista puutavaralajikasoista, tienvarsivarastojen puutavarapinoista ja ajouraverkostosta. Lisäksi jokaiselle kuormalle oli määritettävä laskennallinen kuormakoko, joka perustui kuormattujen pölliin poikkipinta-alaan sekä kuormatiiviskertoimeen. Kuormakoon määräävänä tekijänä käytettiin kuormatilan poikkipinta-alaan, sillä kuorman massa ei ylittänyt millään laskentakombinaatiolla kuormatraktorille määritettyä 13 000 kilogramman kantavuusrajoitetta.

Tutkimustehtävässä selvitettiin samanaikaisesti tehokasta, käytäntöön sovellettavaa kuormanhakutekniikkaa kun hyvän metsäkuljetuksen kriteereinä pidettiin ajourapainaumien minimointia, polttoainekulutuksen minimointia, metsäkuljetuksen tuottavuuden lisäämistä sekä koneen kuormituksen minimointia. Erityisesti harvennuksille kehitetyn puutavaran kuljetusmallin tehokkaan hyödyntämisen edellytyksenä on puutavaralajien sijainnin esittäminen karttapohjalla sekä paikkatiedon päivittyminen metsäkuljetuksen edessä (ts. kuljetetut puutavaralajikat poistuvat karttanäytöltä).

Tutkimuksessa laadittu kuljetusmatkaa minimoiva kuormanhakutekniikka on esitetty kuvassa 11 ja se vastaa hyvin läheisesti kokonaiskuljetusmatkaa minimoivan VRP-optimoinnilla saatavaa kuljetusreitiratkaisua. Työtekniikka perustuu ns. monilajikuormien hakuun eli toisin sanoen samaan kuormaan lastataan useita puutavaralajeja hallitusti siten, että kuorman purkaminen ei hidastu merkittävästi. Kuorman muodostamisessa otetaan samalla huomioon purkupaikalle toteutettava puutavarala-

jipinojen optimaalinen sijoittelu. Kyseisellä työtekniikalla säästetään merkittävästi palstalla kuljetusmatkassa, mutta vastaavasti purkupaikalla purkamisen ajanmenekki kasvaa.



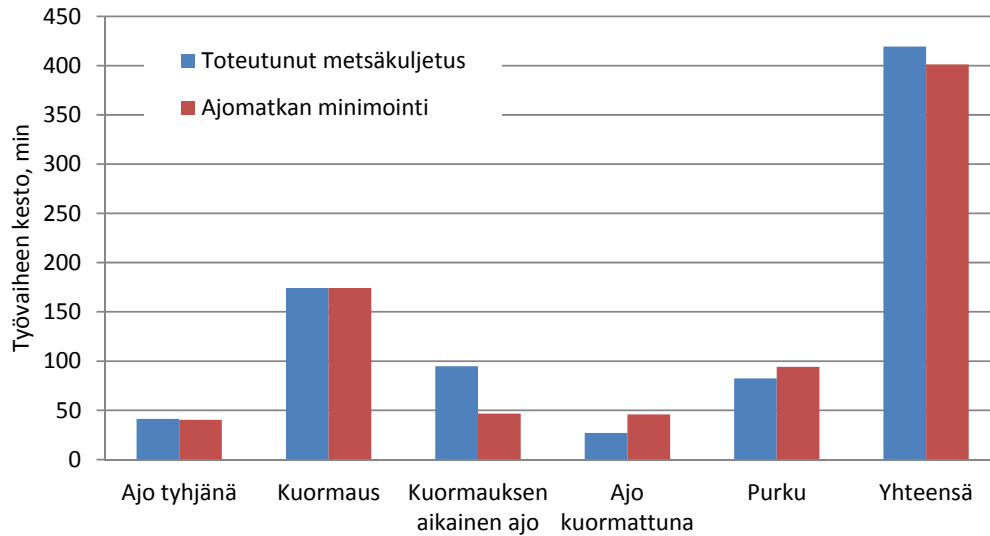
Kuva 11. Kuljetusmatkaa minimoivan työtekniikan vaiheet: 1. Kuormaus aloitetaan peruuttamalla kuormatraktorilla ajouraa pitkin samalla kuormaten vähemmistöpuutavaralajeja kuormatilaan. 2. Vähemmistöpuutavaralajien kuormauksesta jatketaan edelleen kohtaan 3., jossa ajosuuntaa vaihdetaan ja palatessaan kuormataan loput puutavaralajit kyytiin. Kyseisestä kohdasta palatessa takaisin saadaan kuormatila täyteen ja ajouralenkin osa tyhjäksi puutavaralajeista. 4. Kuormatila on täynnä, jonka jälkeen ajetaan kuormattuna tienvarsivarastolle. Vähemmistö- ja enemmistöpuutavaralajit erotetaan toisistaan poikittain asetetulla välipuulla tai porrasteisella kuormatilan täytöllä.

VRP-optimointi toteutettiin tutkimuksen kolmannen harvennuskohteen kuljetussuoritteelle, joka koostui 13 kuormasta ja 151 kuutiometristä. VRP-optimoinnin tuloksen jokaiselle kuormareitille laskettiin ajanmenekit tutkimuskuljettajan ajosuorituksen ajanmenekkitietojen pohjalta. Kokonaisajomäärää ja monilajikuormauksesta noudattava ajoreittioptimointi toi parannuksia kaikkiin tarkastelussa mukana olleisiin kriteereihin (taulukko 2).

Taulukko 2. Toteutuneen puutavaran metsäkuljetuksen ja ajomäärää minimoivan metsäkuljetuksen (VRP-optimointi) ero eri tutkimuksen kriteereissä (kuljetettu puumäärä 151 m³).

	Toteutunut kuljetussuorite	Ajomatkan minimointi	Ero, %
Metsäkuljetuksen ajanmenekki, min/tonni	3,22	3,08	-4,4
Puutavaralajeja kuormassa (keskim.), kpl	3,5	3+3, 3+4	-
Kokonaisajomatka, m	9000	7502	-16,6
Kokonaisajosuorite, bruttotonnikilometriä	213,1	184,7	-13,3
Polttoaineenkulutus, l/m ³	0,613	0,568	-7,3

Suurimmat erot toteutuneen metsäkuljetuksen ja kokonaiskuljetusmatkaa minimoivan työtekniikan välillä tulivat juuri kokonaiskuljetusmatkassa että kuljetussuoritteessa ajettua bruttotonnikilometriä kohden. Myös polttoainesäästöpotentiaali on merkittävä, yli 7 % toteutuneeseen nähden. Suhteellisesti vähäisimmät hyödyt ovat saavutettavissa tuottavuudessa, joka tässä esimerkkitapauksessa tarjosi 4,4 prosentin tuottavuushyödyn. Sama suhteellisen ero voidaan todeta kuvan 12 kokonaisajamenekistä. Työvaiheittain suurin vähennys ajanmenekissä tulee *kuormauksen aikaisessa ajossa*, kun taas ajanmenekki kasvaa hieman *ajo kuormattuna* sekä *kuorman purku* työvaiheissa.



Kuva 12. Metsäkuljetuksen työvaiheiden kokonaiskesto eri ajotavoilla (toteutunut metsäkuljetus, ajomatkan minimointi). Kuljetettu puumäärä 151 m³.

Ajomäärää minimoivaa ajotekniikkaa on käytetty myös käytännön puunkorjuussa esimerkiksi kerätessä puutavaraa pistourilta. Kuormanhakutapa on onnistuessaan hyvin tehokas, mutta työtekniikan tarjoaman hyödyn maksimoiminen edellyttää tarkan paikkaan sidotun ennakkotiedon puutavaralajikasoista- ja määrästä ajourilla, laskentarutiinin esitettävistä ajoura-etenemisistä, joista puutavara kerätään kuormatilaan sekä työtapaan opitusta työskentelyrutiinista. Työtavassa tulee osata hallita monilajikuormien ajoa ja erityisen merkittävässä roolissa on tienvarsivaraston puutavaralajipinojen sijoittaminen siten, että siirtymiset purkamisen aikana eivät tule pitkiksi. Monilajikuormaukseen perustuva tekniikka soveltuu erityisen hyvin kohteille, joissa kuorman purkaminen voidaan toteuttaa purku-uran molemmille puolin.

Tänä päivänä kuormatraktorin kuljettaja voi saada käyttöön hakkuun ja korjuusuunnitelman tietoja puutavaralajimääristä ja niiden suhteista kohteella. Tätä tiedonsiirtoa ei tapahdu kaikkien korjuuyrittäjien korjuutoiminnassa. Korjuukertymän yleistiedolla on vielä hyvin vaikeaa suunnitella tehokasta puutavaran ajoa. Usein ajetaan lenkkikohtaisesti ja ensimmäisellä kuormakerroksella tutustutaan ajouralengkiin; mitä puutavaralajeja, kuinka paljon ja missä kohdin ne sijaitsevat. Karttaan päivittyvä paikkatieto puutavaralajien sijainnista auttaa erityisesti kahdessa vuorossa ajavia, sillä seuraavan vuoron kuljettaja näkee reaalisen tilanteen ajettavasta alueesta heti ensimmäisen kuorman alussa. On arvioitu, että kahden työvuoron toiminnassa vuoron viimeisillä tunneilla metsäkuljetus on keskimääräistä tehottomampaa, sillä kyseinen aika voi mennä työjälkien siistimiseen ja vajaiden urien keräilyyn, jotta seuraavan vuoron kuljettajalla työskentelytehokkuus ei kärsisi vuoron alussa.

Jotta metsäkuljetuksen tuottavuutta voitaisiin parantaa opastavilla järjestelmillä ja tehokkaammilla kuormanhakutekniikoilla, käytännön puunkorjuussa korjuuketjun työskentelyn toimintamalleihin tulisi myös puuttua. Korjuukohteilla, joissa puutavaran ajo seuraa lähellä hakkuurintamaa, valmiiksi hakattua ja ajettavaa puutavaraa voi olla hyvin niukalti valmiina. Tällaisilla kohteilla metsäkuljetus on usein tyhjäkäynnillä ja kohteen tuottavuuspotentiaali jää käyttämättä. Uudessa tehokkaassa toimintamallissa metsäkuljetuksesta saa tehoja enemmän irti, jos kohde on jo kokonaan tai pääosin hakattu. Talvikorjuussa tulee kuitenkin ottaa huomioon lumisateen aiheuttamat ongelmat kasojen peityessä lumen alle.

3 Johtopäätökset ja tulosten hyödyntäminen

3.1 Tarkkaan maastomalliin perustuva karttaopaste hakkuukoneenkuljettajan tukena

Laserkeilauksen perusteella tuotettujen uudentyyppisten karttatasojen hyödyntämisessä on suuri potentiaali puunkorjuussa. LoggingMap-konseptin demonstraatiot käytännön puunkorjuukohteilla ja niiden aikana kerätty käyttäjäpalautte vahvisti ennakkokäsitykset ja antoi tukea Ylimäen ym. (2012) havainnolle, jossa metsäkoneenkuljettajat kaipasivat tarkempaa karttatietoa puunkorjuuseen.

Tarkemmassa karttainformaatiossa on paljon hyötypotentiaalia puunhankinnan ja -korjuun eri työvaiheissa. Puustoinformaation tulkinta mahdollistaa hakkuukohteiden ennakkorajauksen tekemisen etätöyänä. Rajauksessa voidaan käyttää ilmakuvaa tarkempia laserkeilattuja puustotunnuksia ja erikäisten metsän osien rajaaminen on helpompaa. Laserkeilausaineiston perusteella on mahdollista myös selvittää kohteen harvennustarvetta ja näin rajata hakkuukohteesta osia, joissa ei harvennustarvetta ilmene. Ennakkosuunnitteluun kuuluva tienvarsivarastojen sijoittaminen puutavaran metsäkuljetuksen kannalta edullisiin kohtiin helpottuu tarkemman informaation takia. Tienvarsivarastojen sijoittamisessa on mahdollista hyödyntää hakkuukohteen ennustettua kertymää ja sen painopistettä, jolloin puutavaran metsäkuljetuksen tuottavuuteen merkittävästi vaikuttavaa metsäkuljetusmatkaa on mahdollista lyhentää.

Puunkorjuun kannalta Suomessa ei ole laajoja vuoristo-olosuhteisiin verrattavia rinnealueita. Kuitenkin monella hakkuukohteella on pienialaisia jyrkänkeitä, jotka eivät näy nykyisissä peruskartoissa, mutta haittaavat tai estävät ajouran sijoittamisen näihin kohtiin. Pienialaiset jyrkänkeet tai laajemmat rinteet vaikuttavat merkittävästi hakkuukoneenkuljettajan ajouraverkoston suunnitteluun ja tätä kautta myös metsäkuljetuksen tuottavuuteen. Liian myöhään havaittavat ajouraverkoston toteuttamista haittaavat maastonmuodot aiheuttavat äkillisiä ajouraverkon suunnanmuutoksia, joilla voi olla suurta vaikutusta metsäkuljetuksen tuottavuuteen sekä syntyviin maasto- ja puustovaurioihin. Laserkeilaukseen perustuvien karttojen hyöty tulee esiin tilanteissa, jotka tulevat yllättävinä ja ennakoimattomina peruskartan perusteella toimittaessa. Tarkan karttainformaation hyödyt korostuvat toimitaessa kohteilla, joissa on paljon korkeusvaihtelua, tiheä puusto, säätila tai pimeys haittaavat näkyvyyttä.

Maanmittauslaitoksen ja Suomen metsäkeskuksen yhteishankkeen tavoitteena on saada aikaan valtakunnan kattava laserkeilausaineisto vuoden 2019 loppuun mennessä. Tällä hetkellä valmistettu korkeusmalliaineistoa on saatavilla noin kolmasosasta maata. Laserkeilausaineistoihin perustuvien karttatasojen tuotantoon ja hyötykäyttöön näillä alueilla ei ole mitään esteitä. Karttatasojen tuotanto on varsin yksinkertaista ja monin osin vakiintunutta eri paikkatietosovelluksissa. Puunhankintaorganisaatioiden tietojärjestelmät ja erityisesti metsäkoneiden karttasovellukset voivat vaatia päivitystä, jotta ne pystyisivät hyödyntämään uusia karttatasoja.

3.2 Uudet tekniset menetelmät maaston kulkukelpoisuuden ennustamiseen ja hakkuun suunnitteluun

Tutkimus edusti uutta lähestymistapaa ajouraverkon kulkukelpoisuuden määrittämisessä. Se oli jatkumo Suvisen (2006), Suvisen ja Saarilahden (2006) ja Ringdahl ym. (2012) tutkimuksille. Yhtenä tarkoituksena oli vastata niissä esitettyihin tutkimustarpeisiin. Joistain epävarmuustekijöistä huolimatta tutkittu järjestelmä osoittautui lupaavaksi.

Hakkuukone liikkui radalla pyörän uppoama- ja raiteen syvyysmittausten perusteella turvallisella liikkuvuusmarginaalilla, mutta kuormatraktorilla maanpinnan murtuminen oli selvästi lähempänä. Hakkuukoneen turvemaan pintaan kohdistama kuormitus oli niin vähäinen, että manuaalisesti mitattu raiteen syvyys ei juuri vaihdellut maan lujuuden mukaan. Ylipäättään etenkin tutkitun kaltaisen, turvemaaoiloihin soveltuvan hakkuukoneen raiteen syvyyden perusteella ei kulkukelpoisuutta voida kovin tarkasti arvioida.

Nettovetovoima käyttäytyi kulkukelpoisuuskartan muodostamista ajatellen loogisesti ja reagoi voimakkaasti maan pinnan lujuuden muutoksiin. Kuljettajan päätös kääntyä pois 50 metrin kohdalta testirataa sopii hyvin mittausjärjestelmällä arvioituun kulkukelpoisuuteen kyseisessä kohdassa.

Järjestelmän tarkkuutta voitaisiin parantaa nostamalla näytteenottotaajuutta CAN-väylästä sekä käyttämällä reaaliaikaisia keskiarvoistamattomia tietoja. Lisäksi ajovoimansiirron tilavuusvirran ennustaminen seuraamalla ajovoimansiirron hydraulipumpun ohjausvirtaa CAN-väylästä sisältää virhemahdollisuuden. Pelkästään moottoritiehen perustuva laskenta havaittiin tutkimuksessa epäluotettavaksi.

Puunkorjuun tehostamiseksi ja maaperävaurioiden vähentämiseksi olisi tärkeää varustaa lähitulevaisuuden korjuukoneet kulkukelpoisuustiedon keräämiseen ja sen esittämiseen kartalla. Tiedonkeruun tuloksena nyt lähes olematon mittaustieto maaston kulkukelpoisuudesta täydentyisi nopeasti. Tavoitteen saavuttamiseksi tulisi tutkimuspanosta kohdentaa nyt havaittuihin, vielä kehittämistä vaativiin osa-alueisiin. Raiteensyvyuden ja uppoaman jatkuva mittaus on myös mahdollista toteuttaa. Käyttökelpoisin mittausmenetelmä voisi olla laserskanneri tai tutka. Samat menetelmät voisivat soveltua myös ajonopeuden määrittämiseen, mikäli paikannustekniikan kehitys ei tarjoa tähän ratkaisua. Vetovoiman ja luiston mittausta työskentelyn aikana tulisi vielä tutkia ja kehittää. Saavutettavissa olevan vetovoiman mittaus täysikokoisella metsäkoneella tulisi toteuttaa vaihtelevissa maasto-oloissa.

3.3 Puutavaran metsäkuljetuksen tehokkaat kuljetustavat ja tarve opastukselle

Kuljetusmatkaa minimoivaa metsäkuljetustekniikkaa opastavan reititysjärjestelmän potentiaali suomalaisessa puutavaran metsäkuljetuksessa voidaan olettaa olevan selvästi suurempi kuin mitä todettu ero oli tutkimuksessa, jossa vertailukohtana käytettiin taitavan kuljettajan suoritusta. Voidaan arvioida, että tehokkaiisiin työmalleihin perustuva reititysjärjestelmä voisi tuoda jopa 10...20 %:n tuottavuuslisän, kun vertailua tehdään tuottavuuden suhteen keskitasolla oleviin kuljettajiin. Valtakunnan tasolla puutavaran metsäkuljetuksen vuotuinen kustannussäästöpotentiaali olisi siten yli 10 miljoonaa euroa. Lisäksi jos Suomen kaikilla harvennushakkuukohteilla käytettäisiin reititysoptimointia uutta ajomäärää minimoivaa ajotekniikkaa hyödyntäen, metsäkuljetuksen vuotuinen polttoainesäästö olisi 0,8...1,6 miljoonaa litraa.

Hakkuukoneen tuottama puutavaralajeittainen määrä- ja sijaintitieto antavat merkittäviä mahdollisuuksia metsäkuljetuksen tehostamiseen. Vaikka tällä hetkellä hakkuukoneiden tuottama sijaintitieto ei ehkä riitä kasojen tarkkaan paikantamiseen, metsäkuljetusta ajatellen riittävän tarkkaa tietoa on saatavissa ajourien puutavaralajeittaisista määristä. Kone voisi vastata kuljettajan kysymykseen siitä, miltä väliltä haluttu määrä tiettyä puutavaralajia löytyisi tai mitä puutavaralajeja tietty urapätkä sisältää. Tälläkin tasolla oleva tieto antaisi kuljettajalle lisämahdollisuuksia työn suunnitteluun ja tehokkaiden kuljetustekniikoiden käyttöön.

Kun hakkuukoneen paikannustarkkuus saadaan riittävän luotettavalle tasolle, se mahdollistaa samalla kasojen tarkan paikantamisen. Tämä tuo kuljettajaopastukseen uusia mahdollisuuksia. Tuolloin voidaan edetä kahta reittiä. Kun kuljettaja tuntee parhaat työtekniikat ja puutavaran monilajikuormina kuljettamisen vaikutukset ajanmenekkiin niin *kuormauksen aikainen ajo* kuin *kuorman purku* -työvaiheissa, kuormatraktori voi esittää ehdotuksia vaihtoehtoisista, tehokkaista toimintamalleista. Pisimmälle viedyssä ratkaisussa kohteelle voitaisiin tuottaa reittioptimointiin perustuva opastusjärjestelmä, jonka pohjalla olisi kunkin kuljettajan omaan taitotasoon perustuvat työvaiheiden ajanmenekkimallit.

Metsäkuljetuksen kuljettajaopastuksella voidaan vaikuttaa tuottavuuden osalta merkittävästi myös maaperävaurioiden määrään. Tehdyissä kokeissa on todettu selkeä yhteys hakkuukoneen raiteenmuodostuksen ja kuormatraktorin raiteenmuodostuksen välillä. Sekä kivennäis- että turvemaille voidaan hakkuukoneen raiteenmuodostuksen pohjalta laskea ennusteita metsäkuljetuksen raiteenmuodostukselle erilaisilla kuormituksilla. On mahdollista laskea ennuste uralle tai uran osalle, millaisella kuormituksella raiteen syvyys ylittää 10 cm, jonka ylittävälle raiteen syvyydelle on metsänhoitosuosituksissa (Hyvän... 2006) asetettu sallittu enimmäisosuus urien kokonaispituudesta. Tämän ennusteen pohjalta voidaan asettaa ajokertarajoitteita urille tai urien osille, jotka voidaan ottaa huomioon työn suunnittelussa ja opastuksessa. Oikealla ajotekniikalla rajoitteiden noudattaminen ei välttämättä merkittävästi vaikuta tuottavuuteen. Tämän hankkeen tulokset, jossa hakkuukoneesta saatavien tietojen perusteella ennustetaan ajouraverkoston kulkukelpoisuuskartta, ovat lupaavia. Alkuvaiheessa voitaisiin kuitenkin ajatella myös järjestelmää, jossa hakkuukoneen kuljettaja merkitsisi raiteenmuodostuksen riskialueet ja ajokertarajoitteet ajouraverkostoon.

Metsäkuljetuksen tuottavuuteen voidaan olellisesti vielä vaikuttaa, jos ratkaistaan ”puuttuvat palaset” erityisesti kuormaukseen, kuormauksen aikaiseen ajoon ja kuorman purkuun yhteisesti ja erikseen vaikuttavat tekijät ja niiden merkitykset. Puutavaralajeittainen määrätieto ja tieto ajotekniikasta antavat mahdollisuuksia suunnitella varasto siten, että kasojen välillä ajelu purkuvaiheessa voidaan minimoida. Jos kohteella on useampia vaihtoehtoisia varastopaikkoja, mahdollisuudet puutavaran kuljetuksen optimointiin lisääntyvät entisestään. Tietoa puumääristä ja työhön käytetystä ajasta voidaan käyttää myös koneiden siirtojen suunnitteluun. Jonkinlainen ajatun puutavaran tiedon kuittaminen tarvitaan, erityisesti useammassa vuorossa ajettaessa.

Paikkatiedon hyödyntämiseen perustuvalla kuljettajaopastuksella on merkittävä potentiaali. Järjestelmät ovat kuitenkin yhtä hyviä kuin niiden pohjalla oleva tietotaso. Jotta voisimme kehittää parhaat käytännöt ja välittää ne kuljettajille, tarvitsisimme vielä nykyistä tarkempaa ja parempaa tietoa metsäkuljetuksen tuottavuustekijöistä. Työtekniikka, joka on paras huippukuljettajalle, ei välttämättä ole paras opetteluvaiheessa olevalle. Koneiden tiedonkeruujärjestelmät mahdollistavat tehokkaan kuljettajakohtaisen tiedonkeruun, mutta sen lisäksi tarvitaan perinteistä, kohdennettua aikaturkimusta. Tärkeintä on kuitenkin, että niin kokeneet kuljettajat kuin opiskelijatkin saadaan tietoisiksi eri tekijöiden vaikutuksista metsäkuljetuksen tuottavuuteen ja tähän liittyvistä työn tuottavuuden ja laadun parantamismahdollisuuksista. Asiaa voidaan lähestyä myös toisinkin päin esimerkiksi puutavaralajien määrän optimoinnin kautta, kuinka pieniä määriä tiettyä puutavaralajia kannattaa kultakin kohteelta korjata.

Kirjallisuus

- Ala-Ilomäki, J. 2013. Spiked shear vane – a new tool for measuring peatland top layer strength (Piikkisiipikaira – uusi väline turvemaan pintakerroksen lujuuden mittaukseen). Suo –Mires and Peat. Hyväksytty.
- Arvidsson, P.-Å., Eriksson, I., Erisson, P., Rönnqvist, M., Westerlund, A. & Igeklint, P. 1999. Smartare vägval i skotningen - bra för både ekonomi och miljö. SkogForsk. Uppsala. Sweden. Resultat 22.
- Carlsson, D., Rönnqvist, M. & Westerlund .A. 1999. Extraction of logs in forestry using operations reach and geographical information systems. In: Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 5-8 January 1999, Maui, Hawaii. IEEE Computer Society.
- Flisberg, P., Forsberg, M. & Rönnqvist, M. 2007. Optimization based planning tools for routing of forwarders at harvest areas. Can. J. For. Res. 37: 2153–2163.
- Hagström-Näsi, C., Gädda, L. & Tukiainen, P. 2010. Value through Intensive and Efficient Fibre supply (EffFibre). Program Plan, Forestcluster. 67 s.
- Hyvän metsänhoidon suosituksheet 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 59 s.
- Purfürst, F.T. 2010. Learning Curves of Harvester Operators. Croatian Journal of Forest Engineering. 31(2010)2: 89–97.
- Ringdahl, O., Hellström, T., Wästerlund, I. ja Lindroos, O. 2012. Estimating wheel slip for a forest machine using RTK-DGPS. Journal of Terramechanics 49 (2012), s. 271-279.
- Sandström, M. 2013. Puunkorjuu ja kaukukuljetus vuonna 2012. Metsätehon Katsaus 43. 4 s.
- Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Mäkinen H., Lamminen, S. & Mikkola, T. 2013a. Harvesting damage caused by thinning of Norway spruce in unfrozen soil. International Journal of Forest Engineering 24(1): 60-75
- Sirén, M., Hytönen, J., Ala-Ilomäki, J., Neuvonen, T., Takalo, T., Salo, E., Aaltio, H. & Lehtonen, M. 2013b. Integroitu aines- ja energiapuun korjuu turvemaalla sulan maan aikana - korjuujälki ja ravinnetalous. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 256. 24 s.
- Suvinen, A. 2006. A GIS-based simulation model for terrain tractability. Journal of Terramechanics 43 (2006), s. 427-449.
- Suvinen, A. ja Saarilahti, M. 2006. Measuring the mobility parameters of forwarders using GPS and CAN bus techniques. Journal of Terramechanics 43 (2006), s. 237-252.
- Väättäin, K., Ikonen, T., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M., Lamminen, S. & Asikainen, A. 2012. Kuljettajaa opastavat älykkäät järjestelmät ja niiden käyttö koneellisessa puunkorjuussa. Metlan työraportteja 223. 40 s.
- Ylimäki, R., Väättäin, K., Lamminen, S., Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Ovaskainen, H. & Asikainen, A. 2012. Kuljettajaa opastavien järjestelmien tarve ja hyötypotentiaali koneellisessa puunkorjuussa. Metlan työraportteja 224. 70 s.