

Latvusmassan ja kantopuun määrän arviointi hakkuukonemittauksessa

Jaakko Repola, Jari Lindblad ja Juha Laitila

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 2102
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

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

Tekijät Repola, Jaakko, Lindblad, Jari ja Laitila, Juha			
Nimeke Latvusmassan ja kantopuun määrän arvionti hakkuukonemittauksessa			
Vuosi 2011	Sivumäärä 21	ISBN 978-951-40-2337-8 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuu / Bioenergiaa metsistä -tutkimus- ja kehittämissuunnitelma (BIO)			
Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, BIO-tutkimusohjelman johtaja, 30.11.2011			
Tiivistelmä <p>Harvesterihakkuussa tuotetaan automaattisesti runkokohtaista mittaustietoa. Hakkuun aikana mitataan ja tallennetaan niitä läpimitta- ja pituustietoja, joita tarvitaan lähtötietoina biomassamalleissa. Käytettävissä olevista biomassamalleista Repolan ym. (2007) esittämät mallit muodostavat kattavan kokonaisuuden sekä ositteiden että puulajien suhteen ja ovat sovellettavissa maantieteellisen käyttöalueen perusteella Suomessa. Malleilla pystytään laskemaan energiapuiksi korjattavan latvusmassan ja kantopuun biomassan määräarvot rungoittain ja metsiköittäin.</p> <p>Tässä tutkimuksessa koottiin ja osin kehitettiin ne latvusmassan ja kantopuun määräarvioinnissa käytettävät biomassamallit, joita voidaan käyttää perustana hakkuukonesovelluksen jatkokehittämisessä. Lisäksi tutkittiin tapaustutkimuksena hakkuukoneella määritettävien puun läpimittojen ja pituusennusteiden paikkansapitävyyttä pystymittauksella määritettyihin vertailuarvoihin nähden. Yhtenä edellytyksenä biomassamallien soveltamiselle hakkuukonemittauksessa on, että biomassamallien syöttötietoina käytettävät puukohtaiset läpimitta- ja pituustiedot pystytään määrittämään riittävän luotettavasti.</p> <p>Läpimitan mittauksessa ei havaittu systemaattista eroa hakkuukoneen ja pystymittauksen välillä. Hakkuukoneella puun pituusennuste laadittiin käyttöosan pituuden mittauksen ja latvaosan laskennallisen pituusennusteen perusteella. Pituuden määrittämisessä hakkuukoneen ennustemallilla saatiin useammin pienempiä tuloksia pystymittaukseen verrattuna. Sekä pituuden että läpimitan määrittämisessä satunnainen vaihtelu oli verraten pientä. Hakkuukonemittaus tuotti noin 5 % alhaisemman runkobiomassan ja vajaa 4 % korkeamman latvusbiomassan pystymittaukseen verrattuna. Kantopuun määräarvot hakkuukonemittauksen ja pystymittauksen välillä olivat lähellä toisiaan.</p> <p>Biomassamalleilla voidaan tuottaa arvio siitä latvusmassan ja kantopuun määrästä, joka on metsikössä hakkuuajankohtana. Metsikkökohtaisen arvion tarkkuutta heikentää biomassan määrän satunnainen vaihtelu metsiköiden välillä. Lisäksi latvusmassaa ja kantoja pyritään jättämään korjuualalle korjuusuositusten mukaisesti. Käytännössä tämä talteensaanto vaihtelee myös korjuuolosuhteiden mukaisesti. Menetelmällä on kuitenkin saatavissa nykyistä tarkempi määräarvio latvusmassan ja kantopuun kokonaismäärästä. Menetelmällä on käyttömahdollisuuksia puunhankinnan ja logistiikan suunnittelussa ja energiapuun mittauksessa.</p>			
Asiasanat hakkuukoneet, energiapuu, hakkuutähteet, kantopuu, biomassa, mallit, mittaus, mittaustekniikka			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp215.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Jari Lindblad, Metsäntutkimuslaitos, Itä-Suomen alueyksikkö, Yliopistokatu 6, PL 68, 80101 Joensuu Sähköposti: jari.lindblad@metla.fi			
Muita tietoja			

Sisällys

1 Johdanto.....	5
2 Aineisto ja menetelmät.....	6
2.1 Koeleimikon ja -puuston pystymittaus ja hakkuu.....	6
2.2 Biomassamallit.....	7
2.2.1 Yleistä biomassamalleista.....	8
2.2.2 Luettelo biomassamalleista.....	8
2.2.3 Biomassamallien soveltaminen latvusmassan ja kantopuun määrän arvioinnissa	12
2.3 Laskentamenetelmä	13
3 Tulokset.....	14
3.1 Koepuiden mittaukset pystymittauksella ja hakkuukoneella	14
3.2 Biomassat pystymittauksessa ja hakkuukonemittauksessa.....	16
4 Johtopäätökset.....	19
Lähteet.....	21

1 Johdanto

Latvusmassan ja kantopuun mittausta tarvitaan kauppahintojen (luovutusmittaus) ja korjuutoiminnan työsuoritteiden (työmitta) määrittämiseksi. Näiden lisäksi energiapuun määrätieto hyödyttää energiapuun hankintaketjun työsuoritteiden ja kuljetusten suunnittelua sekä varastojen hallintaa. Tietyissä tilanteissa luotettava arvio latvusmassan ja kantopuun määrästä edesauttaa kannattavan latvusmassan ja kantopuun korjuukohteen tunnistamista ja siten ylipäänsä energiapuukaupan syntymistä.

Latvusmassan ja kantopuun mittauksessa ja määrän arvioinnissa menetelminä on käytetty pinta-alaan perustuvaa määrittämistä, runko- tai ainespuun määrään perustuvaa määrittämistä, kuorman keskikokoon ja kuormien lukumäärään perustuvaa mittausta, tienvarsimittausta ja hakkeen tai murskeen mittausta kaukokuljetuksen yhteydessä. Viime vuosina tärkeäksi on tullut energiapuun massan mittausta ja siihen perustuvat menetelmät. Menetelmän käytön mahdollistavia silta-vaakoja on käytössä suurilla käyttöpaikoilla ja terminaaleissa. Kuormainvaakojen käyttöönotto ja yleistyminen mahdollistavat eri energiapuutavaralajien massan mittauksen myös metsässä tai kaukokuljetuksen yhteydessä. Massan mittaukseen perustuvat mittausten menetelmät näyttävät muodostuvan tärkeimmäksi energiapuun mittausten menetelmäksi ja myös tärkeimmäksi mittauksen kehittämiskohteeksi.

Energiapuun mittaustoiminnalle on tyypillistä, että se ei voi perustua yhden mittausmenetelmän kehittämiseen ja käytölle jo pelkästään korjuussa ja materiaalin toimituksessa loppukäyttäjälle olevan aikaviiveen vuoksi. Käytettävissä olevien mittausten menetelmien tulisi kattaa hankintaketjun eri toimijoiden mittaustarpeet ja siitä tulisi selviytyä vähällä työllä, mahdollisimman vähäisin kustannuksin ilman merkittävää aikaviivettä (Hakkila 2006). Latvusmassan ja kantopuun määrän johtaminen hakkuukonemittauksesta päätehakkuualoilla on kehittämiskohteena tarpeellinen ajatellen sekä määrääarvioiden tuottamista että perusmittauksen tarpeita. Arviointimenetelmän lähtökohtana pidetään sitä, että se pohjautuu saatavilla olevaan mittaustietoon, eikä vaadi muutoksia hakkuukoneeseen lukuun ottamatta pieniä lisäyksiä hakkuukoneen tietokoneen mittaushjelmistoon (Harstela ja Kiljunen 2001). Mittaustavan käyttömahdollisuudet määräytyvät lopulta menetelmän käytettävyyden ja tarkkuuden mukaisesti.

Uudistusaloilta korjattava latvusmassa koostuu oksista, neulasista ja runkojen latvaosista, ja vastaavasti kantopuu kannoista ja juurista. Näiden energiapuutavaralajien ositteiden määrän laskennalliseen määrittämiseen on käytettävissä useissa tutkimuksissa esitettyjä biomassamalleja (mm. Repola 2007, Hakkila 1979 ja 1991, Marklund 1988, Petersson 1999 ja 2006). Puutason malleissa käytetään selittäjinä runkojen läpimittoja (kanto- ja rinnankorkeusläpimitto) ja pituuksia (puun pituus, latvuksen korkeus) ja näiden erilaisia yhdistelmiä. Tuloksena saadaan ositteen kuiva-aineen massa. Biomassamalleja sinänsä ja niillä saatuja määräärvioita on verrattu Kärkäisen (2005) väitöskirjatutkimuksessa.

Käytettävissä olevista biomassamalleista Repolan (2007) esittämät mallit muodostavat kattavan kokonaisuuden sekä ositteiden että puulajien suhteen ja ovat sovellettavissa maantieteellisen käyttöalueen perusteella Suomessa. Yksinkertaisissa biomassamalleissa selittäjinä käytetään rungon rinnankorkeusläpimittoa ja pituutta. Useamman selittäjän malleissa käytetään lisäksi rungon latvussuhdetta.

Harvesterihakkuussa tuotetaan automaattisesti runkokohtaista mittaustietoa. Jokaisesta hakattavasta rungosta mitataan pätkittäin suuri määrä läpimittoja. Näistä muodostuu verraten tarkka runkoprofiili kaatosahauksen ja rungon ylimmän katkaisukohdan välillä. Tiedot tallentuvat hakukoneen tiedonsiirtostandardin mukaisesti stm-tiedostoihin. Siten hakukonemittauksessa jo nykyisen menetelmän ja käytännön mukaisesti tuotetaan ja tallennetaan niitä läpimitta- ja pituustietoja, joita tarvitaan lähtötietoina biomassamalleissa. Tämä antaa hyvän lähtökohdan hakukonemittauksen ja biomassamallien käyttöön perustuvan sovelluksen kehittämiseen.

Tämän tapaustutkimuksen tavoitteena oli

- a) koota ja osin kehittää latvusmassan ja kantopuun määräarvioinnissa käytettävien biomassamallien luettelo, jota voidaan käyttää perustana sovelluksen jatkokehittämisessä.
- b) tutkia hakukonemittauksella määritettävien ja biomassamallien selittäjinä käytettävien tunnusten tarkkuutta.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Koeleimikon ja -puuston pystymittaus ja hakkuu

Tutkimuksen kenttäkoeaineisto kerättiin yhteistyössä UPM Metsän ja Ponsse Oyj:n kanssa Kangaslammella (Varkaus) Pohjois-Savossa sijaitsevalta koeleimikolta. Koeleimikko oli tyypillinen mustikkatyyppin kuusivaltainen uudistushakkuukohde, josta korjattiin ainespuun ohella myös latvusmassaa ja kantopuuta. Puusto oli iältään ja järeydeltään suhteellisen tasalaatuista hoidettua talousmetsää. Oksaisuudeltaan ja runkojen karsiutumiseltaan puusto edusti keskimääräistä tasoa.

Koeleimikolla tehtiin pystypuuston ennakkomittaus linjoittaisella koealamittauksella. Koeleimikon kattavassa koealaverkossa linja- ja koealaväli oli 30 metriä. Yksittäisen ympyräkoealan pinta-ala oli 100 neliometriä. Koealoilta valittiin koepuiksi kaikki rinnankorkeusläpimitaltaan yli 10 senttimetrin kuusi-, mänty- ja koivurungot. Kaikkiaan koeleimikolta mitattiin 16 koealaa ja 100 koepuuta, joista kuusia oli 91, mäntyjä seitsemän ja koivuja kaksi. Yhdellä koealalla oli 3–10 koepuuta.

Koepuista mitattiin rinnankorkeusläpimitta (1,3 metriä maanpinnan tasasta) siten, että mittausuunta oli koealan keskipistettä kohti. Lisäksi koepuista mitattiin pituus ja elävän latvuksen alkamiskorkeus. Puun pituuksien ja latvusrajan korkeuksien mittauksissa käytettiin Vertex-korkeudenmittauslaitetta.

Koealat merkittiin keskipistepaaluilla ja numeroitiin juoksevasti. Koepuut merkittiin kuitunauhoilla ja numeroitiin juoksevasti koealoittain (kuva 1). Koepuiden numerot maalattiin runkoihin siten, että ne olivat helposti tunnistettavissa hakukoneen ohjaamosta koehakkuun yhteydessä.

Pystymittauksen jälkeen koeleimikko hakattiin Ponsse Ergo -hakukoneella (kuvat 2 ja 3). Aluksi tehtiin normaali hakkuu koealojen ulkopuolisilta alueilta kokonaisuudessaan ja koepuut jätettiin pystyyn. Tämän jälkeen koepuut hakattiin numerojärjestyksessä omana eränään. Hakkuujärjestyksen perusteella hakukoneen runkokohtaiset mittaustiedot (stm-tiedostot) olivat tunnistettavissa ja kohdennettavissa manuaalisen pystymittauksen tietoihin.



Kuva 1. Koealojen koepuut mitattiin, merkittiin ja numeroitiin. Valokuvat Jari Lindblad / Metla.



Kuvat 2 ja 3. Koepuut hakattiin koealoilta numerojärjestyksessä Ponsse Ergo hakkuukoneella. Valokuvat Jari Lindblad / Metla.

2.2 Biomassamallit

2.2.1 Yleistä biomassamalleista

Tutkimuksessa käytettiin Repolan ym. (2007) biomassamalleja. Männyn, kuusen ja koivun biomassamalleilla voidaan ennustaa runkokohtaisesti puun eri osien biomassat (kuivamassat, kg) seuraaville ositteille:

- rungon puuaine
- rungon kuori
- elävät oksat (ei neulasia)
- neulaset / lehdet
- kuolleet oksat
- kanto
- juuret (> 1 cm)

Yksinkertaisimmassa biomassamallissa selittäjinä ovat puun läpimitta ja pituus (kaavat 2–19). Yksityiskohtaisemmat biomassamallit perustuvat pituuden ja läpimitan lisäksi muihin yleisesti metsäninventoinnissa mitattuihin muuttujiin (latvusbiomassat kaavat 20–25). Yleisperiaatteena biomassamallien soveltamiselle on, että aina tulisi käyttää malleja, jotka perustuvat pituuden ja läpimitan lisäksi muihin yleisesti metsien inventoinneissa käytettyihin muuttujiin. Näin voidaan paremmin ottaa huomioon eri tekijöiden vaikutus puun biomassaan tai puun eri osien välisiin biomassasuhteisiin ja pienentää metsiköiden välistä vaihtelua. Useimmiten kuitenkin vain puun läpimitta ja pituus on tiedossa, jolloin ainoastaan yksinkertaisimmat biomassamallit ovat sen vuoksi soveltamiskelpoisia.

2.2.2 Luettelo biomassamalleista

Hakkuukoneen mittaustiedot mahdollistavat puun biomassan ennustamisen käyttämällä läpimitaan ja pituuteen perustuvia malleja (kaavat 2–19 ja taulukot 1, 2 ja 3). Mikäli puusta on mitattu myös elävän latvusrajan korkeus, voidaan puun latvusmassa ennustaa tarkemmin soveltamalla kaavoja 20–25 (taulukko 4). Yhtälöiden soveltamisessa on huomioitava, että biomassamallit ovat logaritmuotoisia. Mallien ennusteet muutetaan aritmeettiseen skaalaan eksponentti yhtälön (exp) avulla. Lisäksi on huomioitava, että logaritmiseen ennusteeseen pitää lisätä jäännösvarianssien puolikas eli

$$\frac{\text{var}(u_k) + \text{var}(e_{ki})}{2}.$$

Esimerkiksi mallin 2 (rungon puuaine) soveltaminen on muotoa:

$$y_{ki} = \exp\left(-3.788 + 8.294 \frac{d_{ski}}{(d_{ski} + 14)} + 4.949 \frac{h_{ski}}{(h_{ski} + 12)} + \frac{(0.002 + 0.008)}{2}\right) \quad (1)$$

Läpimitaan ja pituuteen perustavat biomassamallit

Mänty

$$\text{Rungon puuaine: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 14)} + b_2 \frac{h_{Ski}}{(h_{Ski} + 12)} \quad (2)$$

$$\text{Rungon kuori: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} + b_2 \ln(h_{ki}) \quad (3)$$

$$\text{Elävät oksat: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 12)} \quad (4)$$

$$\text{Neulaset: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 6)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 1)} \quad (5)$$

$$\text{Kanto: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} \quad (6)$$

$$\text{Juuret } > 1 \text{ cm: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 8)} \quad (7)$$

y_{ki} = biomassa, kg
 $d_{Ski} = 2 + 1.25 d_{ki}$ (d_{ki} = rinnankorkeusläpimitta), cm
 h_{ki} = puun pituus, m

Taulukko 1. Männyn biomassamallien parametrit (kaavat 2–7).

	Rungon puuaine kaava 2	Rungon kuori kaava 3	Elävät oksat kaava 4	Neulaset kaava 5	Kanto kaava 6	Juuret > 1 cm kaava 7
Fixed	N = 626	N = 311	N = 892	N = 892	N = 36	N = 35
b_0	-3.778	-4.756	-6.024	-5.007	-6.739	-9.601
b_1	8.294	8.616	15.289	15.066	12.658	15.931
b_2	4.949	0.277	-3.202	-5.896		
Random						
$\text{var}(u_k)$	0.002	0.013	0.033	0.097	0.009	0.000
$\text{var}(e_{ki})$	0.008	0.054	0.096	0.123	0.044	0.065

Kuusi

$$\text{Rungon puuaine: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 14)} + b_2 \ln(h_{ki}) + b_3 h_{ki} \quad (8)$$

$$\text{Rungon kuori: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 18)} + b_2 \ln(h_{ki}) \quad (9)$$

$$\text{Elävät oksat: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 13)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 5)} \quad (10)$$

$$\text{Neulaset: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 10)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 1)} \quad (11)$$

$$\text{Kanto: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 26)} \quad (12)$$

$$\text{Juuret } > 1 \text{ cm: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 24)} \quad (13)$$

y_{ki} = biomassa, kg
 $d_{Ski} = 2 + 1.25 d_{ki}$ (d_{ki} = rinnankorkeusläpimitta), cm
 h_{ki} = puun pituus, m

Taulukko 2. Kuusen biomassamallien parametrit (kaavat 8–13).

	Rungon puuaine kaava 8	Rungon kuori kaava 9	Elävät oksat kaava 10	Neulas kaava 11	Kanto kaava 12	Juuret > 1 cm kaava 13
Fixed						
b_0	-3.655	-4.349	-3.914	-2.394	-3.962	-2.295
b_1	7.942	9.879	15.220	12.752	11.725	10.649
b_2	0.907	0.274	-4.350	-4.470		
b_3	0.018	-	-	-		
Random						
$\text{var}(u_k)$	0.006	0.016	0.022	0.103	0.065	0.105
$\text{var}(e_{ki})$	0.008	0.036	0.089	0.107	0.058	0.114

Koivu

$$\text{Rungon puuaine: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} + b_2 \ln(h_{ki}) \quad (14)$$

$$\text{Rungon kuori: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 20)} \quad (15)$$

$$\text{Elävät oksat: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 16)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 10)} \quad (16)$$

$$\text{Lehdet: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 2)} \quad (17)$$

$$\text{Kanto: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 26)} \quad (18)$$

$$\text{Juuret } > 1 \text{ cm: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 22)} + \ln(h_{ki}) \quad (19)$$

y_{ki} = biomassa, kg
 $d_{Ski} = 2 + 1.25 d_{ki}$ (d_{ki} = rinnankorkeusläpimitta), cm
 h_{ki} = puun pituus, m

Taulukko 3. Koivun biomassamallien parametrit (kaavat 14–19).

	Rungon puuaine kaava 14	Rungon kuori kaava 15	Elävät oksat kaava 16	lehdet kaava 17	Kanto kaava 18	Juuret > 1 cm kaava 19
Fixed						
b_0	-5.001	-5.449	-4.279	-29.566	-3.677	-3.183
b_1	9.284	9.967	14.731	33.372	11.537	7.204
b_2	1.143	2.894	-3.139	-	-	0.892
Random						
$\text{var}(u_k)$	0.003	0.011	0.035	0	0.021	0.047
$\text{var}(e_{ki})$	0.005	0.044	0.071	0.077	0.046	0.027

Läpimitaan, pituuteen ja latvussuhteeseen perustuvat mallit puun latvusbiomassakomponenteille

Mänty

$$\text{Elävät oksat: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 8)} + b_3 \ln(cl_{ki}) \quad (20)$$

$$\text{Neulaset: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 4)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 1)} + b_3 \ln(cl_{ki}) \quad (21)$$

Kuusi

$$\text{Elävät oksat: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 14)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 5)} + b_3 \ln(cl_{ki}) \quad (22)$$

$$\text{Neulaset: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 4)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 1)} + b_3 \ln(cl_{ki}) \quad (23)$$

Koivu

$$\text{Elävät oksat: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 12)} + b_2 \frac{h_{ki}}{(h_{ki} + 12)} + b_3 cl_{ki} \quad (24)$$

$$\text{Lehdet: } \ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \frac{d_{Ski}}{(d_{Ski} + 2)} + b_2 cr_{ki} \quad (25)$$

jossa:

- y_{ki} = biomassa, kg
- $d_{Ski} = 2 + 1.25 d_{ki}$ (d_{ki} = rinnakorkeusläpimitta), cm
- h_{ki} = puun pituus, m
- cl_{ki} = elävän latvuksen pituus, m
- cr_{ki} = latvussuhde, 0–1

Taulukko 4. Läpimittaan, pituuteen ja latvussuhteeseen perustuvien mallien parametrit (kaavat 20–25).

	Mänty elävät oksat kaava 20	Mänty neulaset kaava 21	Kuusi elävät oksat kaava 22	Kuusi neulaset kaava 23	Koivu Elävät oksat kaava 24	Koivu Lehdet kaava 25
Fixed						
b_0	-5.224	-2.385	-2.945	0.286	-4.837	-20.856
b_1	13.022	15.022	12.698	16.286	13.222	22.320
b_2	-4.867	-11.979	-6.183	-15.576	-4.639	2.819
b_3	1.058	1.116	0.959	1.170	0.135	
Random						
$\text{var}(u_k)$	0.020	0.034	0.013	0.021	0.013	0.011
$\text{var}(e_{ki})$	0.067	0.095	0.072	0.090	0.054	0.044

2.2.3 Biomassamallien soveltaminen latvusmassan ja kantopuun määrän arvioinnissa

Biomassamalleilla voidaan tuottaa suoraan latvusmassan määrän arvioinnissa tarvittavat oksa- ja neulasbiomassat. PäätehakkUILTA korjattava latvusmassa sisältää elävien oksien ja neulasten lisäksi rungon latvakappaleen (nk. latvakartio). Rungon latvakappaleen biomassan arvioinnissa voidaan käyttää biomassamalleja sekä rungon ja latvakappaleen tilavuustietoa. Koko rungon biomassa saadaan rungon puuaine- ja kuorimallien summana (mallit 2, 3, 8, 9, 14 ja 15). Männylle määritettiin lisäksi puuaineen tiheydestä (puuaineen kuivatuoretiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa) johtuva korjauskerroin ($c = 0,88$). Rungon latvakappaleen biomassa (Bio_{LATVA}) saadaan kaavalla:

$$Bio_{LATVA} = \frac{V_{LATVA}}{V_{RUNKO}} \times (Bio_{PUUAINNE} + Bio_{KUORI}) \times c \quad (26)$$

Bio_{LATVA} = latvakappaleen biomassa, kg

V_{LATVA} = latvakappaleen tilavuus

V_{RUNKO} = rungon tilavuus

$Bio_{PUUAINNE}$ = rungon puuaineen biomassa, kg (mallit 2, 8, 14)

Bio_{KUORI} = rungon kuoren biomassa, kg (mallit 3, 9, 15)

c = korjauskerroin männylle (0,88)

Kantopuun korjuussa saadaan talteen kanto kokonaisuudessaan ja osa juuribiomassasta. Kantopuun biomassa voidaan määrittää käyttämällä kanto- ja juuribiomassamalleja (mallit 6, 7, 12, 13, 18 ja 19). Tuloksena saadaan kantopuun biomassasuunnuste, johon sisältyvät kantopuu ja kaikki läpimitaltaan yli yhden senttimetrin juuret.

$$Bio_{TOTAL} = (Bio_{KANTO} + Bio_{JUURET}) \quad (27)$$

Bio_{TOTAL} = kannon ja juurten biomassa, kg

Bio_{KANTO} = kannon biomassa, kg (mallit 6, 12, 18)

Bio_{JUURET} = juurten biomassa, kg (mallit 7, 13, 19)

Käytännön korjuutoiminnassa ohuimmat juurenosat jäävät kantojen nostossa maahan. Oletuksena voidaan pitää, että läpimitaltaan 3–5 senttimetriä ohuimmat juurenosat eivät ole mukana korjuukelpoisen kantopuun määräärviossa. Puulajeittain määritettiin talteensaantokerroin, jolla muunnettiin biomassamalleilla määritettyä kannon ja juurten kokonaismäärän ennustetta. Talteensaantokertoimeksi määritettiin kuuselle 0,79 ja mänylle ja koivulle 0,74. Kantojen nostossa talteensaattava biomassa voidaan määrittää puukohtaisesti yhtälöllä:

$$Bio_{SAANTO} = (Bio_{KANTO} + Bio_{JUURET}) \times k \quad (28)$$

Bio_{SAANTO} = kantojen nostossa saatava biomassa, kg

Bio_{KANTO} = kannon biomassa, kg (mallit 6, 12, 18)

Bio_{JUURET} = juurten biomassa, kg (mallit 7, 13, 19)

k = talteensaantokerroin (kuusi = 0,79, mänty = 0,74, koivu = 0,74)

2.3 Laskentamenetelmä

Tässä tutkimuksessa tutkittiin hakkuukoneen tuottamien tunnusten käyttämistä biomassamallien syöttötietoina, ja saatujen ennusteiden käyttökelpoisuutta erityisesti latvusmassan ja kantopuun määrän arvioinnissa. Latvusmassan, kantopuun ja runkopuun biomassat määritettiin koepuille sekä pystymittauksen että hakkuukonemittauksen perusteella. Pystymittausaineistossa mallien syöttötietoina käytettiin puukohtaisesti mitattua läpimittaa ja pituutta. Hakkuukonemittaustietojen soveltamista varten konevalmistaja laati menetelmän, jolla stm-tiedostojen runkokohtaisista läpimitan mittaustiedoista poimittiin rinnankorkeusläpimitta. Hakkuukoneen mittalaitteella saadaan mitattua pituus vain rungon karsitulle käyttöosalle katkaisulatväläpimittaan asti, minkä vuoksi konevalmistaja laati menetelmän karsimattoman latvakappaleen pituuden ennustamiseen. Tällä tavoin pystyttiin määrittämään puun kokonaispituus ja hyödyntämään biomassamalleja. Latvakappaleen pituuden ennustamisen ohella laadittiin menetelmä puun latvakappaleen tilavuuden laskentaan.

Puun elävä latvusmassa (pl. latvojen runkopuu) määritettiin oksa- ja neulasbiomassamallien summana (kaavat 4, 5, 10, 11, 16 ja 17). Kuolleiden oksien osuus kokonaislatvusbiomassasta on pieni ja lisäksi niiden talteensaanto käytännön korjuutoiminnassa on vähäistä, minkä vuoksi ne jätettiin huomioimatta tässä tarkastelussa. Kantopuun biomassa määritettiin käyttämällä kanto- ja juuribiomassamalleja (kaavat 6, 7, 12, 13, 18 ja 19). Tuloksiin sisällytettiin kaikki läpimitaltaan yli yhden senttimetrin juuret. Runkobiomassa laskettiin rungon puuaineen ja kuoren biomassamalleilla (kaavat 2, 3, 8, 9, 14 ja 15).

3 Tulokset

3.1 Koepuiden mittaukset pystymittauksella ja hakkuukoneella

Taulukossa 5 on esitetty pystymittauksen ja hakkuukonemittauksen rinnankorkeusläpimitan ja pituuden määrittämisen mittauksen tilastolliset tunnusluvut. Mittaero on määritetty hakkuukonemittauksen ja pystymittauksen tulosten erotuksena, jolloin mittauksen etumerkki osoittaa hakkuukonemittauksen poikkeaman suunnan pystymittaukseen verrattuna.

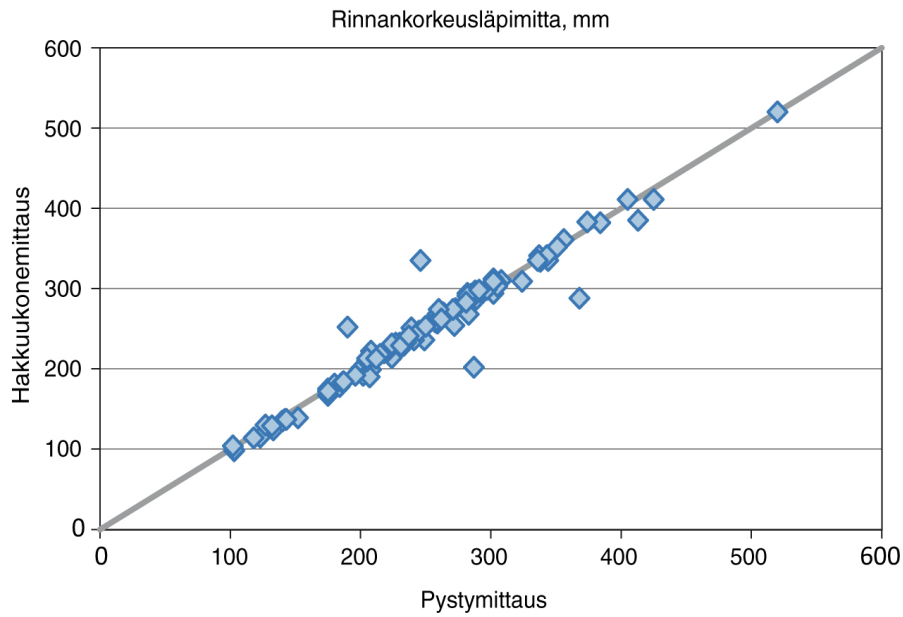
Pystymittauksella mitattu koepuiden rinnankorkeusläpimitan keskiarvo oli 250 mm. Hakkuukoneella mitattu rinnankorkeusläpimitan keskiarvo oli lähes sama, suhteellinen mittauksen keskiarvo oli -0,3 %. Yksittäisten puiden kohdalla läpimitan ero hakkuukoneen ja pystymittauksen välillä oli suuri, mutta pääsääntöisesti mittauksen satunnaisvaihtelu oli verrattain pientä (kuvat 4 ja 5). Läpimitan suhteellisen mittauksen keskihajonta oli 6,8 prosenttia. Pystymittaukseen verrattuna hakkuukoneella tehtävän rinnankorkeusläpimitan mittauksen mittausepävarmuus (kattavuuskerroin $k=2$) oli 13,7 prosenttia.

Pystymittauksella mitattu koepuiden pituuden keskiarvo oli 21,9 metriä. Hakkuukoneella määritetty pituusennusteen keskiarvo oli alempi eli 20,8 metriä. Pystymittauksen ja hakkuukonemittauksen ero pituuden määrittämisessä oli luonteeltaan systemaattinen (eron keskiarvo -5,3 prosenttia), eli hakkuukoneella saatiin tavallisemmin pienempiä pituuksia pystymittaukseen nähden (kuvat 6 ja 7). Ero oli myös tilastollisesti merkitsevä.

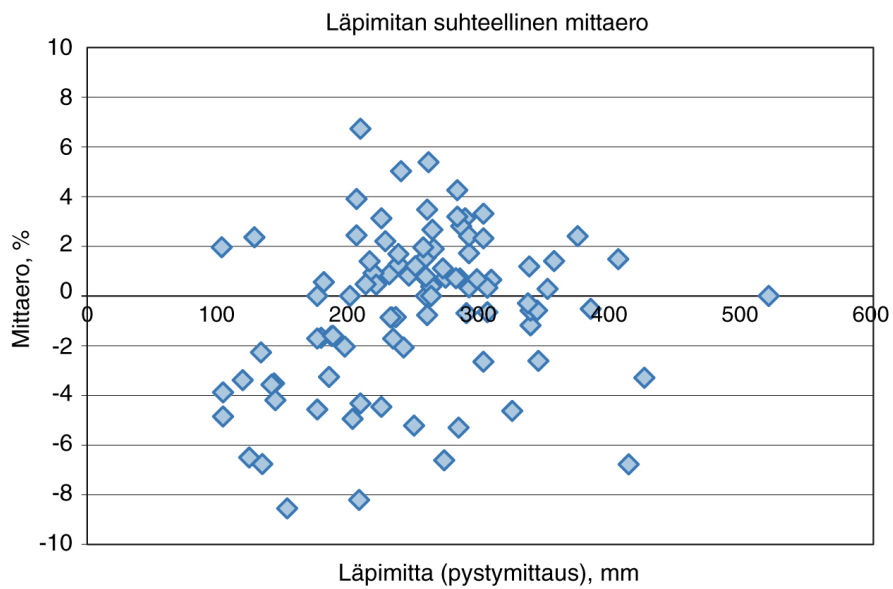
Pituuden suhteellisen mittauksen keskihajonta oli 5,6 prosenttia. Pystymittaukseen verrattuna hakkuukoneella tehtävän pituusennusteen mittausepävarmuus (kattavuuskerroin $k=2$) oli 11,8 prosenttia.

Taulukko 5. Rinnankorkeusläpimitan ja pituusennusteen absoluuttiset ja suhteelliset mittauksen tunnusluvut hakkuukonemittauksen ja pystymittauksen erotuksena.

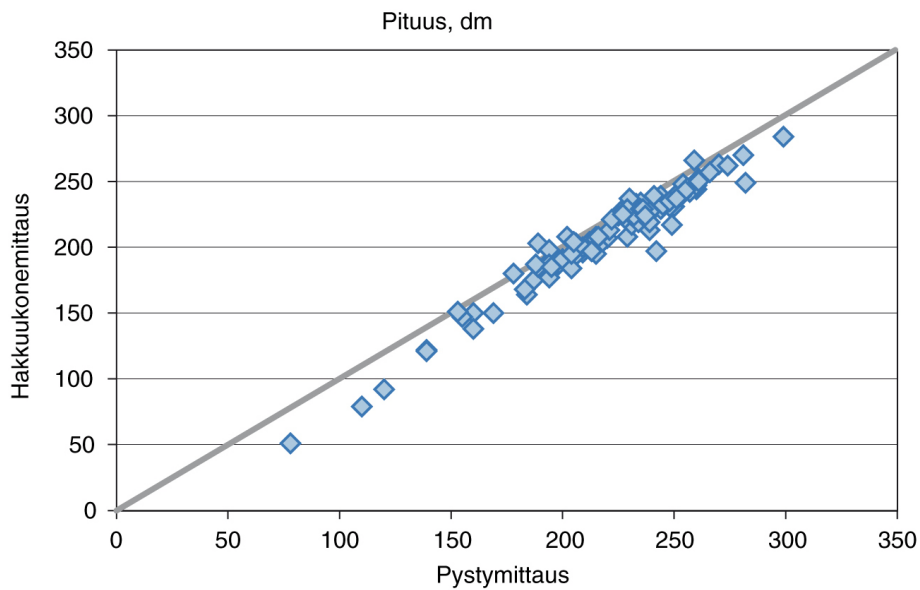
	Läpimita ero, mm	Läpimita ero, %	Pituus ero, dm	Pituus ero, %
keskiarvo	-0,7	-0,3	-10,9	-5,3
keskihajonta	17,5	6,8	9,2	5,6
keskiarvo	8,5	3,5	6,6	3,5



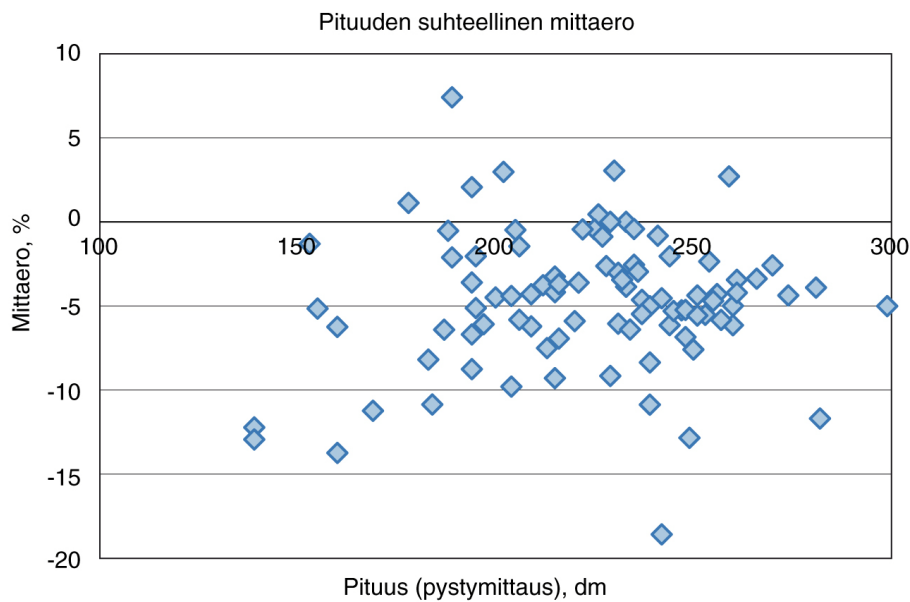
Kuva 4 . Hakkuukoneella ja pystymittauksella mitatut puiden rinnankorkeusläpimitat.



Kuva 5 . Rinnankorkeusläpimitan suhteellinen mittaero hakkuukonemittauksen ja pystymittauksen erotuksena.



Kuva 6. Hakkuukoneella ja pystymittauksella määritetyt puiden pituudet.



Kuva 7. Puun pituuden suhteellinen mittaero hakkuukoneen pituusennusteen ja pystymittauksen erotuksena.

3.2 Biomassat pystymittauksessa ja hakkuukonemittauksessa

Taulukossa 6 on esitetty pystymittaus- ja hakkuukonemittaustiedoilla laskettujen biomassarvojen erot rungolle, latvukselle ja kantopuulle. Biomassaero on määritetty hakkuukonemittauksen ja pystymittauksen tulosten erotuksena, jolloin eron etumerkki osoittaa hakkuukonemittauksen poikkeaman suunnan pystymittaukseen verrattuna.

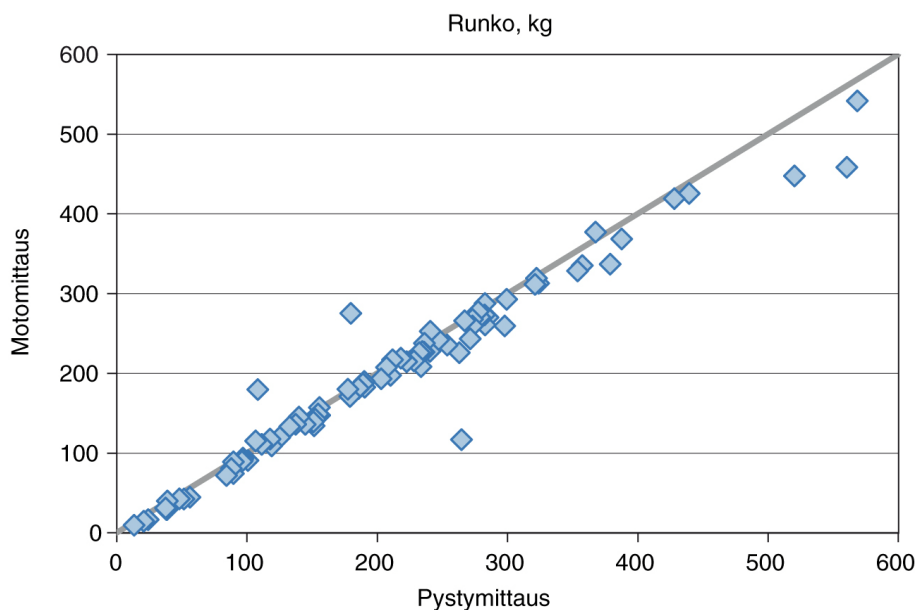
Hakkuukonemittausten perusteella tuotettu runkobiomassojen keskiarvo oli 197,6 kg. Pystymittauksella saatiin keskimäärin 5 % korkeampi runkobiomassa eli 207,4 kg. Vaikka hakkuukonemittauksilla saadut tulokset oli keskimäärin alhaisemmat, erot olivat kuitenkin pääsääntöisesti verraten pieniä. Puun koon ei havaittu vaikuttavan mittaeron suuruuteen. (taulukko 6 ja kuva 8). Ero johtui pääsääntöisesti hakkuukoneen tuottamista alhaisemmista pituusennusteista pystymittaukseen nähden.

Hakkuukoneen tuottama latvusbiomassa oli keskimäärin 65,3 kg, mikä oli 3,6 % (2,4 kg) suurempi kuin pystymittauksella (63,0 kg) tuotettu latvusmassa (taulukko 6). Pienistä tuloserosta huolimatta molemmilla menetelmillä saatiin varsin yhdenmukaiset tulokset yksittäisiä puita lukuun ottamatta (kuva 9). Hakkuukoneen tuottamat pienemmät pituusennusteet johtivat latvusmassan kohdalla puolestaan hieman suurempiin biomassa-arvoihin. Tämä selittyy sillä, latvusbiomassayhtälöissä pituuden parametrin arvo on negatiivinen eli solakoissa puissa latvusmassa on yleensä alhaisempi.

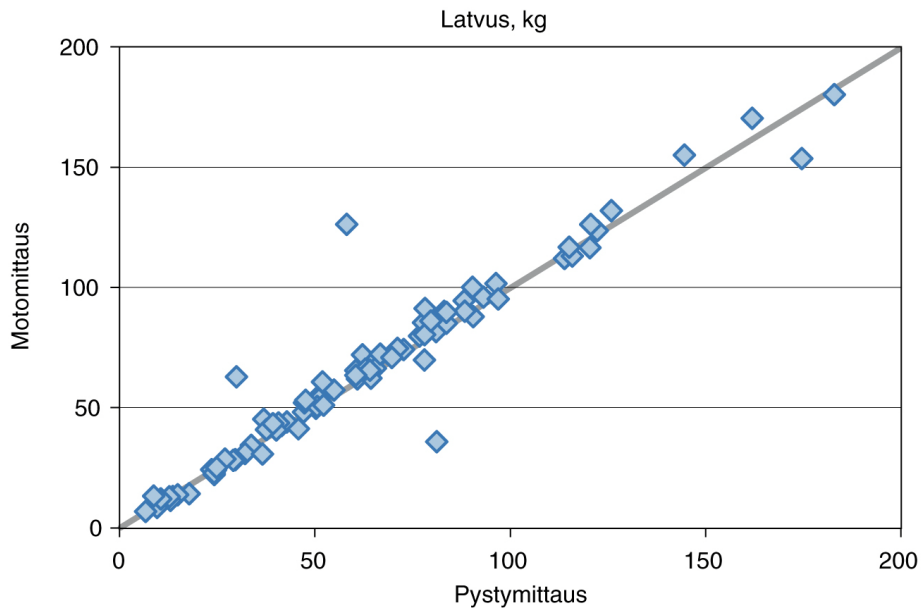
Kantopuun biomassaerot hakkuukone- ja pystymittauksen välillä olivat pienet, keskimäärin 0,8 kg eli vain 1 % (taulukko 6 ja kuva 10). Hakkuukoneen tuottama kantopuun biomassa oli keskimäärin 82 kg ja vastaava pystymittauksen tuottama arvo oli 81,2 kg. Kanto- ja juuribiomas-yhtälöt perustuvat läpimittaan, joten erot menetelmien välillä johtuivat yksinomaan eroista puun läpimitoissa.

Taulukko 6. Rungon, latvuksen ja kantopuun biomassojen absoluuttiset ja suhteelliset mittaeron tunnusluvut hakkuukonemittauksen ja pystymittauksen erotuksena.

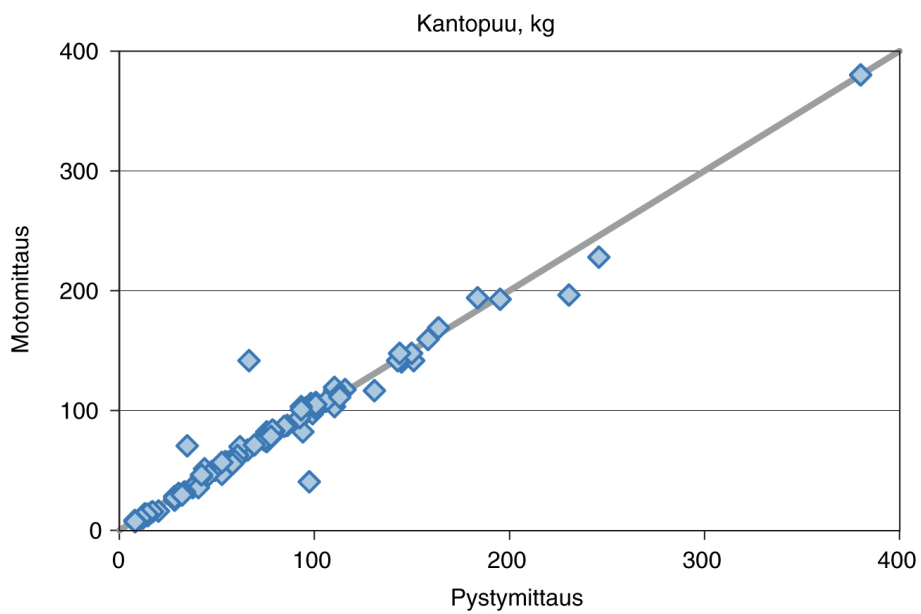
	Runko ero, kg	Runko ero, %	Latvus ero, kg	Latvus ero, %	Kantopuu ero, kg	Kantopuu ero, %
keskiarvo	-9,8	-5,0	2,4	3,6	0,8	1,0
keskihajonta	26,1	13,2	10,5	16,1	12,1	14,8
keskipoikkeama	12,6	6,4	4,9	7,6	5,4	6,5



Kuva 8. Hakkuukone- ja pystymittauksilla ennustetut puiden runkobiomassat.



Kuva 9. Hakkuukone- ja pystymittautiedoilla ennustetut puiden latvusmassat.



Kuva 10. Hakkuukone- ja pystymittautiedoilla ennustetut kantopuun biomassat.

4 Johtopäätökset

Biomassamalleilla pystytään tuottamaan arvio siitä latvusmassan ja kantopuun määrästä, joka metsikössä on hakkuuajankohtana. Energiapuun korjuusuositusten mukaisesti osa latvusmassasta ja kantopuusta jätetään korjaamatta (Äijälä ym. 2010) eikä metsäbiomassaa pyritä korjaamaan kokonaan talteen palstalta myöskään teknis-taloudellista syistä (Hakkila 2004). Latvusmassalla tavoitteena on jättää ravinnetaloudellista syistä johtuen kolmannes kokonaismäärästä korjaamatta. Kantopuun korjuussa jätetään nostamatta tietty kappalemäärä kantoja hehtaarilla, sekä kaikki pienet ja kuvion tai suoja-alueen reunavyöhykkeillä olevat kannot. Latvusmassan kasoihin hakkuussa, kantojen nostossa sekä metsäkuljetuksessa ja tienvarsivarastoinnissa syntyy hävikkiä, joiden todellisen suuruuden luotettava arviointi on haastavaa. Latvusmassan ja kantopuun saanto suhteessa teoreettiseen kokonaismäärään vaihtelee merkittävästi korjuukohteiden välillä johtuen mm. korjuulosuhteista, varastointiajan pituudesta, vuodenajasta, energiapuun kokonaismäärästä ja ylipäätään työtavasta ja työn laadusta korjuussa.

Harstelan ja Kiljusen (2001) mukaan hakkuukonemittauksella saadaan varsin hyvä ja edullinen arvio latvusmassan teoreettisesta kokonaismäärästä. Suurin haaste menetelmän hyödyntämisessä on saantovaihtelun aiheuttamat erot käyttöpaikalla määritetyn kuivamassan ja hakkuukonemittauksella arvioidun kuivamassan välillä, jos menetelmän avulla yritetään täsmällisesti määrittää käyttöpaikalle yksittäiseltä leimikolta saatavaa polttoainemäärää. Harstelan ja Kiljusen tutkimuksessa (2001) latvusmassan saanto-osuus oli kolmelta tutkimustyömaalta kootussa aineistossa 81,3 %, 55,2 % ja 60,8 %.

Ruotsissa Skogforsk tutki kehittämänsä menetelmää (Möller ym. 2011), joka laskee latvusmassan ja kantopuun määrän hakkuukonemittauksen yhteydessä sekä tallentaa metsäbiomassan sijaintitiedot karttaohjelmaan. Kehitetystä menetelmästä kuljettaja antaa hakkuutyön yhteydessä tiedot siitä, että hakataanko puun latvusmassa kasoille talteenottoa varten vai jätetäänkö se levälleen palstalle tai kasataan ajouralle parantamaan kantavuutta. Puukohtaisen saantotiedon avulla parannetaan korjuussa talteen saatavan latvusmassan määrääarviota. Karttatiedolla latvusmassakasojen sijainnista ja hakkuukertymästä puolestaan parannetaan metsäkuljetuksen tuottavuutta reittioptimoinnin avulla (Jönsson ym. 2011). Kenttäkokeiden perusteella metsäbiomassan määräärvioon hakkuukonemittauksen avulla ei liity riskiä systemaattisesta mittavirheestä (Möller ym. 2011). Menetelmän toimivuutta on testattu Smälannista Norrbotteniin ulottuvalla alueella sekä Marklundin (1988) että Repolan ym. (2007) biomassamalleilla todellisilla hakkuutyömailla ja käyttökokemukset määräärvioinnin luotettavuudesta ja käyttökelpoisuudesta ovat olleet rohkaisevia (Möller ym. 2011).

Tässä tutkimuksessa samat koepuut mitattiin sekä manuaalisella pystymittauksella ja hakkuukoneella. Edellytys biomassamallien soveltamiselle hakkuukonemittauksessa on, että biomassamallien syöttötietoina käytettävät mittaustiedot pystytään määrittämään riittävän luotettavasti. Hakkuukoneen ja pystymittauksen välillä ei havaittu systemaattista eroa läpimitan mittauksessa. Koska mittaustuloksena tavoitellaan energiapuun kokonaismäärää leimikko- ja eräkohtaisesti, on myös mittaeron satunnaisvaihtelu hallittavissa mitattavien runkojen kappalemäärän noustessa. Hakkuukoneella määritetyn puun pituusennusteen ja pystymittauksen välillä oli havaittavissa systemaattinen ero. Tämä puolestaan johti siihen sen, että hakkuukonemittaus tuotti systemaattisesti noin 5 % alhaisemman runkobiomassan ja vajaa 4 % korkeamman latvusbiomassan. Tämän systemaattisen eron lisäksi leimikon energiapuun kokonaismäärän arvioinnissa leimikkotasolla on huomioitava biomassan satunnaisvaihtelu metsiköiden välillä. Latvusmassalla satunnainen metsikkövirhe on noin 20 % ja kantopuulla 30 %. Latvusmassan metsikkökohtaista en-

nustetta voidaan tarkentaa, mikäli käytetään malleja, joissa hyödynnetään puun elävän latvuksen alarajaa. Tällöin latvusmassan satunnainen virhe on alle 13 prosenttia. Tämä edellyttäisi, että kaikista tai ainakin osasta kaadettavista puista myös puun latvusraja mitataan.

Mittausmenetelmän jatkokehittämiselle on hyvät edellytykset yhtäältä käytettävissä olevien ver-raten kattavien biomassamallien ja toisaalta hakkuukonemittauksessa tuotettavien runkokohtais-ten mittaustietojen osalta. Hakkila (2006) ehdotti selvitystyössään energiapuun mittauksen jär-jestämisestä ja kehittämisestä, että latvusmassan ja kantopuun määrän ennustaminen liitettäisiin osaksi hakkuukonemittausta. Metsäbiomassan määrän ennustaminen perustuisi puulajikohtaisiin biomassamalleihin sekä hakkuukoneen mittaustulokseen, jossa olisivat mukana ne puut, joiden latvusmassa on kasattu korjuuta varten tai joiden kannot on tarkoitus nostaa.

Menetelmän käyttömahdollisuuksia arvioitaessa on otettava huomioon metsikkökohtaisen mää-räarvion verraten heikko tarkkuus, mikä aiheutuu metsiköiden välisestä luontaisesta biomassan vaihtelusta ja energiapuun talteensaannon vaihtelusta korjuussa. Kuitenkin nykyistä tarkempi ja yhtenäiseen menetelmään perustuva määräärvioiden tuottaminen tarjoaisi uusia mahdollisuuksia ja toimintamalleja energiapuukaupassa ja puunhankinnassa. Hakkuun yhteydessä saatavaa mää-räarvioita voitaisiin käyttää tarjouspyyntöjen ja puukaupparjousten perustietona silloin, kun energiapuu ja ainespuu eivät sisälly saman kauppasopimuksen piiriin. Samoin menetelmä toisi entistä paremmat perusteet energiapuukohteen kokonaistaloudellisuuden arviointiin ja kauppahintojen määrittämiseen. Lisäksi energiapuun määräärvio tarkoittaisi varastojen hallintaa ja mahdollistaa paremman energiapuun korjuun, haketuksen ja kuljetuksen työaikamenekkien ja tarvittavan kapasiteetin suunnittelun.

Lähteet

- Hakkila, P. 1972. Mechanization harvesting of stumps and roots. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 77(1). 71 s.
- Hakkila, P. 1979. Wood density surveys and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 96(3). 59 s.
- Hakkila, P. 1991. Crown mass of trees at the harvesting phase. *Folia Forestalia* 773. 24 s.
- Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraportti 5/2004. 135 s.
- Hakkila, P. 2006. Selvitys energiapuun mittauksen järjestämisestä ja kehittämisestä. Dnro:n 4191/67/2005/MMM mukainen selvitystehtävä. 30 s.
- Harstela, P. & Kiljunen, N. 2001. Hakkuutähteen määrän arviointi puunkorjuun yhteydessä – PUUT03. Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. VTT Symposium 216. 459 s.
- Jönsson, P., Westlund, K., Flisberg, P. & Rönnqvist, M. Grotsporre improves profitability. Julkaisussa: Efficient forest fuel supply systems. Composite report from a four year R & D programme 2007–2010. Skogforsk. Sivut 102–103.
- Kärkkäinen, L. 2005. Evaluation of performance of tree-level biomass models for forestry modeling and analyses. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 940. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 940. 108 s. + liitteet.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes Institute Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Marklund, G. 1988. Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Survey Report 45. 71 s.
- Möller, J., Hannrup, B., Larsson, W., Arlinger, J., Barth, A. Wilhelmsson, L. 2011. Harvester reporting of logging residues and stumps. Julkaisussa: Efficient forest fuel supply systems. Composite report from a four year R & D programme 2007–2010. Skogforsk. Sivut 110–111.
- Petersson, Hans. 1999. Biomassafunktioner för trädfraktioner av tall, gran och björk i Sverige. Arbetsrapport 59 1999. 31 s.
- Petersson, Hans. 2006. Functions for below-ground biomass of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 21(7): 84–93.
- Repola, J, Ojansuu, R. & Kukkola, M. 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 53. 28 p.
- Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset. Energiapuun korjuu ja kasvatust. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 56 s.