

Energiapuun määrä ja laatu sekä niiden arviointi

Jari Lindblad, Miina Jahkonen, Juha Laitila, Harri Kilpeläinen ja Seija Sirkiä

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

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 Lindblad, Jari, Jahkonen, Miina, Laitila, Juha, Kilpeläinen, Harri ja Sirkiä, Seija			
Nimeke Energiapuun määrä ja laatu sekä niiden arviointi			
Vuosi 2013	Sivumäärä 53	ISBN 978-951-40-2416-0 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuu / Bioenergiaa metsistä -tutkimus- ja kehittämissuunnitelma (BIO)/ METKA - metsäenergiaa kannattavasti 7335			
Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, BIO-tutkimusohjelman johtaja, 01.03.2013			
Tiivistelmä <p>Metsäenergiaa kannattavasti METKA -hankkeessa kehitettiin soveltavasta näkökulmasta uutta tietoa tuottamalla ja olemassa olevaa tietoa käyttämällä energiapuun määrän ja laatu-tekijöiden arviointia. Hankkeen erilliset tehtävät jakautuivat 1) energiapuun määrän arvioinnin, 2) laadun arvioinnin ja 3) mitauksen kehittämisen tutkimuksiin.</p> <p>Kuusen uudistushakkuualoilta energiakäyttöön osana latvusmassaa korjattavan latvarunkopuun laskennallinen määrä on vain noin kaksi kuutiometriä hehtaarilla, kun käytetään tyypillisiä ainespuun läpimittavaatimuksia. Kasvattamalla ainespuun läpimittavaatimusta kymmeneen senttimetriin, kasvaa laskennallinen latvarunkopuun määrä 19 kuutiometriin. Latvusmassan laskennalliset kokonaismäärät vaihtelivat 100–150 kuutiometriin.</p> <p>Kantopuun korjuukohteiden säästökantojen määrä ylitti selvästi energiapuun korjuusuositusten määrät. Lähes kaikilla tutkimuskohteilla yli 15 senttimetrin kantoja oli jätetty yli 50 kappaletta hehtaarille. Keskimäärin korjuukohteilla oli korjuun jälkeen yhteensä 198 erikokoista ja eri puulajien kantoa hehtaarilla. Säästökantojen määrän tulisi kiinnittää huomiota kantojen korjuun kokonaistaloudellisuuden kannalta.</p> <p>Harvennusenergiapuun korjuukohteiden puusto- ja metsikkötunnusten ennakkomittauksessa 50 neliömetrin koealako ko vaikuttaa tarkoituksenmukaiselta. Koealan kokoa kasvattamalla ennakkomittauksen tarkkuus ei oleellisesti parantunut. Koealan kokoa pienentämällä ennakkomittauksen tarkkuus huonontuu merkittävästi. Koealamittauksilla määritettyjä puusto- ja metsikkötunnuksia voidaan käyttää syöttötietoina METKA-laskentaohjelmissa.</p> <p>Energiapuun tienvarsivarastojen kosteuden ennustemalleissa varastointiajan säätiedoilla pystyttiin parhaimmillaan selittämään noin 90 prosenttia kosteuden vaihtelusta. Tulos oli lupaava, mutta energiapuun eräkohtaiseen tai yli talven ulottuvaan kosteuden ennustamiseen malleja ei voida soveltaa.</p>			
Asiasanat bioenergia, energiapuu, kantopuu, latvusmassa, harvennusenergiapuu, mittaus, energiasisältö, laatu			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp259.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 Taitto: Anne Siika/Metla			

Aluksi

Metsäenergiaa kannattavasti – METKA oli vuosina 2007–2012 toteutettu elinkeinon kehittämishanke. Hankkeen keskeisenä tavoitteena oli tuottaa energiapuun korjuukohteiden valintaan sekä energiapuun korjuuseen, varastointiin ja käyttöön liittyvää tutkimustietoa ja sitä kautta parantaa metsäenergian käytön kannattavuutta ja energiapuun laatua.

Hanke sai pääosan rahoituksestaan Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta. Lisäksi hanke sai kunta- ja yritysrahoitusta. Hankkeen toteuttajia olivat Metsänhoitoyhdistys Kanta-Häme, Metsänhoitoyhdistys Päijät-Häme, Työtehoseura ja Metsäntutkimuslaitos, joista ensimmäinen myös koordinoi hanketta.

Metsänhoitoyhdistykset hankkivat pääosan tutkimusaineistojen keruussa tarvituista energiapuun korjuukohteista. Työtehoseura ja Metsäntutkimuslaitos toteuttivat eri osatehtävien tutkimukset. Työtehoseuran tutkimus keskittyi harvennusenergiapuun ja kantopuun korjuumenetelmiin, teknologian ja logistiikan arviointiin ja kehittämiseen. Metsäntutkimuslaitoksen tutkimus koostui yhtäältä energiapuun määrän arvioinnin kehittämisestä korjuukohteiden valinnan tukemisen kannalta ja toisaalta energiapuun laadun arvioinnista kokonaistaloudellisuuden parantamisen kannalta. Tähän raporttiin on koostettu Metsäntutkimuslaitoksen tutkimukset Metsäenergiaa kannattavasti - METKA -hankkeessa.

Tekijät

Sisällys

Aluksi	4
1 Tutkimuksen tausta	7
2 Latvusmassan ja kantopuun biomassamalleihin perustuva määrä ja katkaisuläpimitan vaikutus latvusmassan määrään	8
2.1 Johdanto	8
2.2 Aineisto ja menetelmät.....	9
2.3 Tulokset.....	10
3 Säästökantojen määrä kantojen korjuussa	12
3.1 Johdanto	12
3.2 Aineisto	12
3.3 Tulokset ja johtopäätökset.....	13
4 Metsikkö- ja puustotunnusten ja hakkuukertymän arviointi nuorissa metsissä	15
4.1 Johdanto	15
4.2 Aineisto ja menetelmät.....	16
4.2.1 Mittaukset energiapuun korjuukohteilla	16
4.2.2 Pituuden ja latvussuhteen laskenta	17
4.2.3 Koepuiden tilavuuden ja biomassan laskenta	17
4.3 Tulokset.....	17
4.3.1 Koealan koon vaikutus otannan tarkkuuteen	17
4.3.2 Puuston tilavuus ja harvennusvoimakkuus esimerkkikohteilla	20
4.4 Johtopäätökset.....	23
5 Metka-laskentaohjelmat	23
5.1 Harvennusmetsien energiapuun kertymien ja keskitilavuuksien laskentaohjelma, Metka-maastolaskuri	23
5.1.1 Johdanto	23
5.1.2 Metka-maastolaskurin rakenne ja toimintaperiaate	24
5.1.3 Metka-maastolaskurin hyödyt ja epävarmuustekijät	26
5.2 Metsähakkeen tuotantokustannusten laskentaohjelma, Metka-kustannuslaskuri	27
5.2.1 Johdanto	27
5.2.2 Laskurin rakenne ja toimintaperiaate	28
5.2.3 Laskentamallin korjuuketjut.....	29
5.2.4 Johtopäätökset.....	30
6 Energiapuun kosteuden ennustaminen	31
6.1 Johdanto	31
6.2 Tutkimusaineistot ja menetelmät	32
6.3 Tulokset.....	33
6.4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	36

7 Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantopuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus	38
7.1 Johdanto	38
7.2 Aineisto ja menetelmät.....	39
7.3 Tulokset.....	40
7.3.1 Kantomurskeen palakokojakaumat	40
7.3.2 Lämpöarvo ja tuhkapitoisuus.....	41
7.3.3 Puhdistukseen käytetyn ajan vaikutus epäpuhtauksiin	43
7.4 Tulosten tarkastelu	44
8 Hakkuukoneen ja kuormainvaa’an käyttöön perustuva paino-otantamittaus	45
8.1 Johdanto	45
8.2 Aineisto ja menetelmät.....	46
8.3 Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	47
9 Lopuksi	50
Kirjallisuus	52

I Tutkimuksen tausta

Energiapuun määrää ja laatua koskevaa tietoa tarvitaan energiapuun luovutuksessa kauppahintojen perusteena ja energiapuun korjuun ja kuljetusten työsuoritteiden määrittämisessä. Energiapuun perusmittauksen lisäksi puunhankinnan suunnittelu, varastokirjanpito sekä kuljetusten ja tuotannon ohjaus edellyttävät riittävää tietoa energiapuun määrästä ja laadusta.

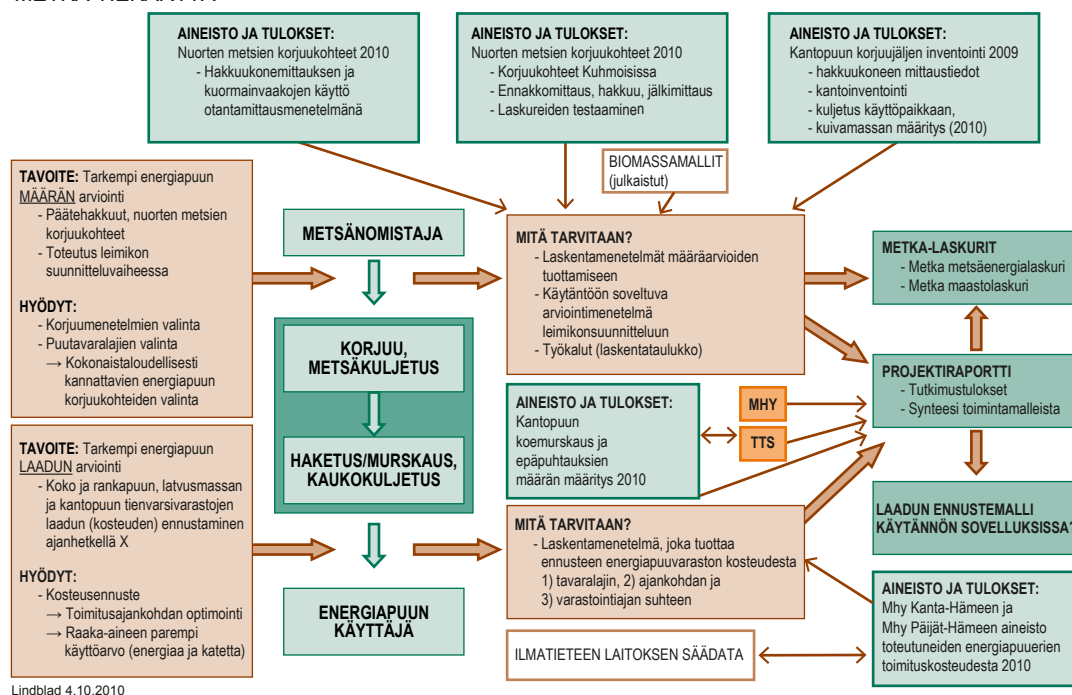
Energiapuun käyttötarkoitukseen nähden riittävän laadun saavuttaminen edellyttää yleensä pitkiä varastointiaikoja. Tänä aikana energiapuun kosteus pyritään saamaan energiantuotannon ja energiasäilön kannalta hyvälle tasolle ja ehkäisemään raaka-aineen uudelleen kastuminen. Energiapuun hankintaketjun aikana metsänomistajalta käyttäjälle on tavallista, että energiapuun hankinnan operaatioista vastaa jokin kolmas toimija. Tämä puunhankintaorganisaatio voi myös omistaa energiapuun, toisin sanoen ostaa sen metsänomistajalta ja myydä edelleen energiapuun käyttäjälle. Yksinkertaistaen puunhankintaorganisaatio tarvitsee arvioita energiapuun määrästä ja laadusta näiden molempien rajapintojen toimintojen suunnittelussa. Ensimmäisessä rajapinnassa, energiapuun korjuukohteiden hankinnassa on pystyttävä tunnistamaan ja valitsemaan kokonaistaloudellisesti kannattavat korjuukohteet joihinkin kriteereihin perustuen. Kriteereistä energiapuun määrä on eittämättä keskeinen, mutta muitakin tarvitaan. Esimerkiksi harvennusenergiapuun korjuukohteilla runkojen järeys on tärkeä tekijä arvioitaessa korjuun kustannuksia.

Jälkimmäisessä rajapinnassa energiapuusta saatavan tehollisen energian ja siten energiapuun hankinnan ja käytön kokonaistaloudellisuuden kannalta on edullista, jos energiapuu pystytään toimittamaan käytettäväksi sopivassa kosteudessa. Tämä edellyttää esimerkiksi malleihin perustuvia kosteusennusteita, jolloin toimijalla olisi tarvittava tieto energiapuuvarastojen varastojen purkamisen ja toimitusten ohjaukseen.

Tässä tutkimuksessa määritettiin eri energiapuutavaralajien määrän ja laadun arviointiin liittyviä seikkoja. Tutkimuksessa toteutettiin seuraavat osatehtävät:

- a) tutkittiin rungon ylimmän katkaisuläpimitan vaikutusta latvusmassan määrään,
- b) tutkittiin kantopuun korjuukohteille jäävien kantojen määrää,
- c) tutkittiin harvennusenergiapuun korjuukohteiden puuston kokonaistilavuutta, hakkuukertymän rakennetta, runkolukusarjoja ja runkojen keskitilavuutta,
- d) tutkittiin harvennusenergiapuun korjuukohteiden ennakkomittausta sekä koealojen ja -puiden määrän vaikutusta ennakkomittauksen tuloksen tarkkuuteen,
- e) laadittiin energiapuun tuotantokustannusten laskentaohjelma ja harvennusmetsien korjuukohteiden hakkuukertymien ja runkotunnusten laskentaohjelma,
- f) tutkittiin kantopuun epäpuhtauksien määrää ja korjuumenetelmien vaikutusta kantopuun lämpöarvoon ja tuhkapitoisuuteen,
- g) kehitettiin energiapuun kosteuden ennustamiseen käytettäviä tilastomatemattisia malleja,
- h) tutkittiin kuormainvaa'alla tehtävään punnitukseen ja hakkuukonemittaukseen perustuvaa paino-otantamittausta.

METKA TIEKARTTA



Kuva 1. METKA-hankkeen tiekartta hankkeen toteutusvaiheessa. Tiekartassa kuvattiin energiapuun hankintaketjun vaihe, jossa tietoa tarvitaan, määritettiin tavoitteet, kartoitettiin tutkimusaineistot ja arvioitiin tuloksia ja niiden esittämismuotoja.

2 Latvusmassan ja kantopuun biomassamalleihin perustuva määrä ja katkaisuläpimitan vaikutus latvusmassan määrään

2.1 Johdanto

Latvusmassa koostuu oksista, neulasista ja runkojen latvaosista, ja vastaavasti kantopuu kannoista ja juurista. Latvusmassan ja kantopuun sekä näiden ositteiden laskennalliset määrät voidaan määrittää käyttämällä eri tutkimuksissa esitettyjä biomassamalleja (mm. Hakkila 1979 ja 1991, Marklund 1988, Petersson 1999 ja 2006, Repola ym. 2007). Biomassamallit tuottavat ositteen kuiva-aineen painon runkokohtaisesti. Lähtöarvoina malleissa käytetään puun läpimittaa (kanto- ja rinnankorkeusläpimitta) ja pituutta sekä mahdollisesti elävän latvuksen korkeutta tai latvussuhdetta.

Käytettävissä olevista biomassamalleista Repolan (Repola ym. 2007) esittämät mallit muodostavat kattavan kokonaisuuden sekä ositteiden että puulajien suhteen ja ovat sovellettavissa maantieteellisen käyttöalueen perusteella Suomessa. Yksinkertaisissa biomassamalleissa selittäjinä käytetään puun rinnankorkeusläpimittaa ja pituutta. Useamman selittäjän malleissa käytetään lisäksi puun latvuksen korkeutta tai latvussuhdetta.

Latvusmassaksi korjattavan latvarunkopuun määrä riippuu käytössä olevista karsitun ja katkotun puutavaran mitoista. Rungon ylin katkaisukohta ja katkaisuläpimitta apteerauksessa määräytyvät siten tavaralajien pituus- ja läpimittayhdistelmien mukaan.

Tässä tutkimuksessa

- a) määritettiin biomassamalleihin perustuva laskennallinen uudistusalojen latvusmassan ja kantopuun määrä esimerkkikohteella ja
- b) määritettiin ylimmän katkaisuläpimitan vaikutus latvusmassan runkopuun (latvarunkopuun) määrään

2.2 Aineisto ja menetelmät

Laskenta-aineisto oli kerätty Päijät-Hämeessä Kuhmoisissa sijaitsevilta uudistushakkuuleimikoilta (kuva 2). Aineisto koostui runkokohtaisista rinnankorkeusläpimitan ja pituuden mittauksista. Mittaukset oli tehty linjoittaisena koelamittauksena kaikkiaan seitsemältä eri metsikkökuviolta. Aineisto koostui 574 kuusirungon ja 81 mäntyrunгон mittaustiedoista. Aineisto on tarkemmin kuvattu Peltolan ym. (2011) tutkimuksessa.

Koerunkoaineistosta sovitettiin pituusmallit rinnankorkeusläpimitan suhteen kuuselle ja männylle. Mallin yleisenä muotona käytettiin Näslundin (1937) pituusmallia (kaava 1), jolle laskettiin koerunkoaineiston perusteella puulajikohtaiset parametrit.

Latvusmassan ja kantopuun määrät laskettiin esimerkkileimikoille, joiden runkolukusarjan jakauma noudatti koerunkoaineiston jakaumaa (Peltola ym. 2011). Laskennallisesti hakkuissa poistettiin 500 runkoa hehtaarilta ja runkolukusarjan keskimmäisen puun (mediaanipuun) rinnankorkeusläpimita vaihteli välillä 22–36 senttimetriä (kuva 4). Latvusmassan ja kantopuun hehtaarikohtaiset biomassat laskettiin kuuselle, männylle ja koivulle. Laskennassa käytettiin Repola ym. (2007) biomassamalleja, joissa selittäjinä olivat puun pituus ja rinnankorkeusläpimita sekä elävien oksien ja neulasten ja lehtien osalta lisäksi elävän latvuksen korkeus tai latvussuhde. Puiden pituudet laskettiin puulajikohtaisilla pituusmalleilla. Elävän latvuksen korkeutena käytettiin kuusella 65, männyllä 40 ja koivulla 50 prosentin osuutta puun pituudesta.



Kuva 2. Pituusmallit laskettiin uudistushakkuuleimikoilta mitatusta pystymittausaineistoista. Päätehakkuusikko Kuhmoisissa. Kuva: Jari Lindblad.

Latvusmassan ja kantopuun biomassat muutettiin kiintotilavuudeksi Hakkilan (1978) esittämällä tuoretiheyslukuilla. Määräarviot latvusmassan ja kantopuun biomassasta ja tilavuudesta edustavat metsässä olevaa suurinta energiapuun määrää (kuva 4) eli niissä ei otettu huomioon korjuussa, kuljetuksessa ja varastoinnissa tapahtuvaa hävikkiä.

Rungon ylimmän katkaisuläpimitan vaikutusta latvarunkopuun määrään tarkasteltiin laskennallisesti muodostettujen esimerkkirunkojen perusteella. Eri rinnankorkeusläpimitaluokille määritettiin rungon pituudet pituusmallilla puulajikohtaisesti. Edelleen esimerkkirungoille muodostettiin runkokäyrät puulajiin, rinnankorkeusläpimitaan ja pituuteen perustuvilla runkokäyräyhtälöillä (Laasasenaho 1982), joiden perusteella laskettiin runkojen kokonaistilavuudet. Rungon latvaosien tilavuudet laskettiin ylimmän katkaisuläpimitan vaihdella 1–15 senttimetriä.

2.3 Tulokset

Koepuuaineistosta määritetyn pituusmallin yleinen muoto on (Näslund 1937):

$$h = \frac{d^2}{(a_0 + a_1 d)^2} + 1,3 \quad (1)$$

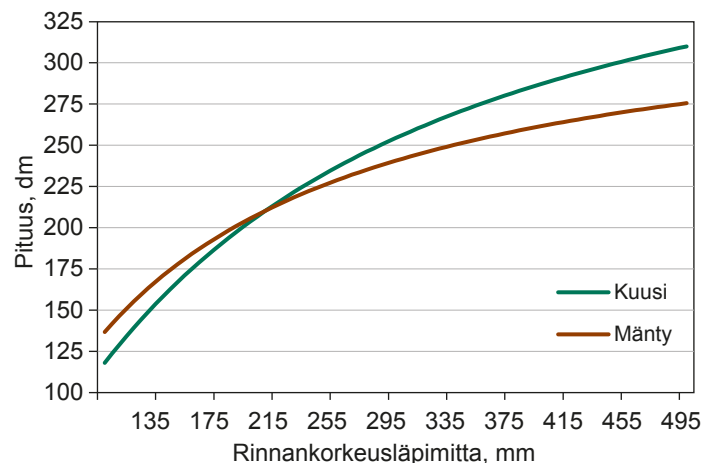
, jossa h on puun pituus (dm)

d on rinnankorkeusläpimitta (mm)

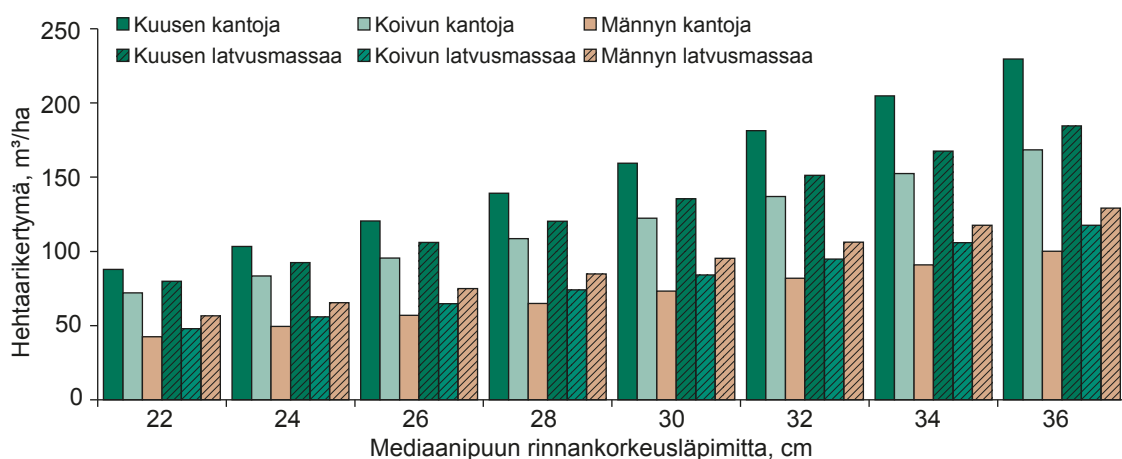
a_0 ja a_1 ovat puulajikohtaisia mallin parametreja

Kuusen pituusmallissa parametrin a_0 arvo oli 4,458 ja a_1 oli 0,048. Männyllä vastaavat arvot olivat 3,193 ja 0,054. Pituusmallilla laskettu puun pituus rinnankorkeusläpimitan suhteen kuusella ja männyllä on esitetty kuvassa 3.

Latvusmassan ja kantopuun laskennalliset hehtaariohtaiset tilavuudet rinnankorkeusläpimitan mediaanin suhteen on esitetty kuvassa 4. Sekä latvusmassan että kantopuun tilavuudet olivat kuusella selvästi korkeampia kuin männyllä tai koivulla vaihdellen alle sadasta kuutiometristä yli 150 kuutiometriin. Männyn ja koivun latvusmassan hehtaariohtaiset tilavuudet voivat laskennallises-



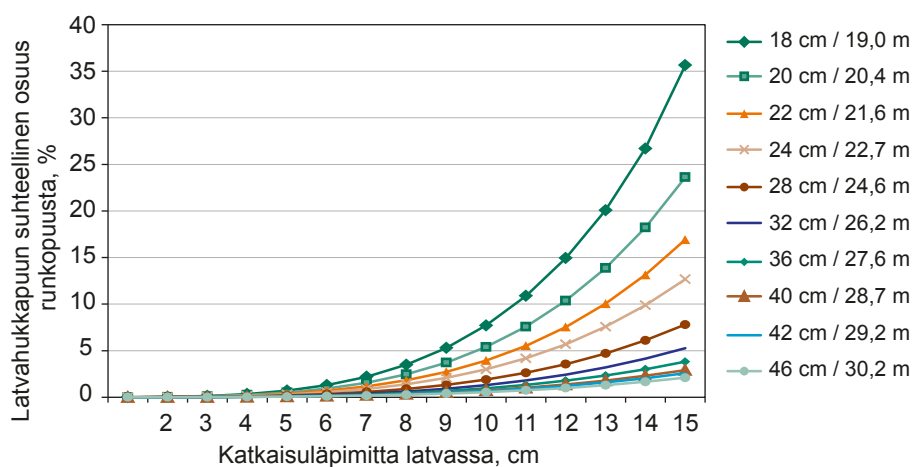
Kuva 3. Pituusmallilla laskettu pituus (dm) rinnankorkeusläpimitan (mm) suhteen kuusella ja männyllä.



Kuva 4. Kantopuun ja latvusmassan hehtaarikertymä puulajeittain mediaanipuun rinnankorkeusläpimitan mukaan, kun pätehdäkuussa poistetaan 500 runkoa hehtaarilta.

ti ylittää sata kuutiometriä. Männyn kantopuun määrä oli 50–100 kuutiometriä hehtaarilla. Kun rinnankorkeusläpimitan mediaani oli 30 senttimetriä, oli latvusmassan osuus runkopuun tilavuudesta 29 prosenttia ja kantopuun osuus 34 prosenttia. Männyllä vastaavat osuudet olivat 22 ja 17 prosenttia ja koivulla 20 ja 29 prosenttia.

Energiapuun kertymiin vaikuttaa merkittävästi ainespuun, useimmiten kuitupuun, minimikatkaisuläpimitta. Jos ainespuuta korjataan pieneen läpimittaan, latvaosasta saatavan energiapuun määrä hehtaarilla jää hyvin pieneksi. Kuusen esimerkkirungoille muodostetuilta runkokäyryiltä määritettiin runkopuun eri osien tilavuudet käyttäen eri katkaisuläpimittoja. Tällä määritettiin ylimmän katkaisuläpimitan vaikutusta niin sanotun latvarunkopuun osuuteen koko rungon määrästä. Järeillä rungoilla, joiden rinnankorkeusläpimitta oli 18–46 senttimetriä, latvarunkopuun osuus rungon tilavuudesta oli pieni (0–2 prosenttia) kun katkaisuläpimitta oli alle kuusi senttimetriä (kuva 5). Latvarunkopuun osuus kasvaa kuitenkin nopeasti katkaisuläpimitan noustessa yli kymmenen senttimetrin. Kymmenen senttimetrin katkaisuläpimitalla latvarunkopuun osuus rungon tilavuudesta oli 4–8 prosenttia ja 12 senttimetrin katkaisuläpimitalla jo 7–15 prosenttia.



Kuva 5. Ainespuun minimikatkaisuläpimitan vaikutus latvarunkopuun osuuteen rungon kokonaistilavuudesta kuusella erikokoisilla esimerkkirungoilla.

Kuusen päätehakkuuleimikossa, jossa on 500 kappaletta läpimitaltaan 26 senttimetrin ja pituudeltaan 23,7 metrin kuusirunkoja, latvarunkopuuta voidaan laskennallisesti saada viiden senttimetrin katkaisuläpimitalla kaksi kuutiometriä hehtaarilta, kymmenen senttimetrin katkaisuläpimitalla 19 kuutiometriä hehtaarilta ja 15 senttimetrin katkaisuläpimitalla 79 kuutiometriä hehtaarilta. Käytännössä osa latvarunkopuusta jää korjaamatta, joten todelliset energiapuukertymät ovat laskennallisia määriä huomattavasti pienempiä.

3 Säästökantojen määrä kantojen korjuussa

3.1 Johdanto

Kantoja korjataan pääasiassa kuivahkojen kankaiden ja sitä viljavimpien kivennäismaiden kuusivaltaisilta päätehakkuilta. Kantojen korjaaminen vähentää juurikäävän leviämisen riskiä, lisää luontaisesti syntyvien taimien määrää sekä vähentää erikseen tehtävän maanmuokkauksen tarvetta. Haittapuolia ovat muun muassa kantojen mukana poistuvat ravinteet sekä liiallisen maanpinnan käsittelyn aiheuttama eroosio- ja vesakoitumisriski. Tämän vuoksi kantojen noston yhteydessä suositellaankin välttämään liiallista kivennäismaan paljastamista, jättämään osa kannoista nostamatta ja välttämään kantojen korjuuta karuimmilla kasvupaikoilla. Kantoja ei myöskään korjata hakkuualueen reunoilta eikä elävien puiden läheisyydestä. (Äijälä ym. 2010).

Edellä esitetyt suositukset vaikuttavat kantojen korjuukohteiden valintaan ja korjuualalle jätettävien säästökantojen määrään. Läpimitaltaan yli 15 senttimetrin kantoja suositellaan jätettäväksi maalajin mukaan vähintään 25–50 kappaletta hehtaarille. Lisäksi korjaamatta jätetään kaikki alle 15 senttimetrin kannot sekä lahot ja vanhat kannot.

Tutkimustiedon perusteella ei tunneta, miten suositusten mukaiset säästökantojen määrät toteutuvat käytännön kantojen korjuussa. Lisäksi tietoa todellisesta säästökantojen määrästä tarvitaan kantopuun kertymän arvioinnin tueksi korjuukohteilla. Säästökantojen määrällä on myös vaikutus kantojen korjuun yksikkökustannuksiin ja hankinnan kokonaistaloudellisuuteen. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia kantopuun korjuukohteille käytännön korjuutoiminnassa jätettävien säästökantojen määrää.

3.2 Aineisto

Säästökantojen määrää tutkittiin 20 kantojen korjuukohteella Metsänhoitoyhdistys Kanta-Hämeen alueella. Korjuukohteet valittiin jo valmistuneista tai valmistumassa olevista työmaista. Korjuukohteilta kerättiin taustatiedot, mukaan lukien hakkuuajankohta ja kantojen korjuuajankohta.

Kantojen korjuun oli tehnyt kuusi eri yrittäjää. Korjuukohteiden määrät eri yrittäjillä olivat seuraavat:

yrittäjä A	5	korjuukohdetta
yrittäjä B	3	”
yrittäjä C	1	”
yrittäjä D	6	”
yrittäjä E	2	”
yrittäjä F	3	”

Korjuukohteilta mitattiin kokonaispinta-ala ja sen alueen pinta-ala, jolta kantoja oli korjattu. Kohteiden pinta-ala vaihteli noin puolesta hehtaarista kahteentoista hehtaariin. Kokonaispinta-alan keskiarvo oli 3,6 hehtaaria.

Säästökantojen määrä määritettiin systemaattisella linjoittaisella otantamittauksella ympyräkoealoilta. Koeala- ja linjaväli oli 40–50 metriä ja koealan pinta-ala 200 m² (säde 7,98 metriä). Kentäkoeaineistojen keruu tehtiin keväällä 2009.

Ympyräkoealoilta laskettiin ja luokiteltiin kannot seuraaviin luokkiin:

- läpimitaltaan yli 20 senttimetrin havupuukannot
- läpimitaltaan alle 20 senttimetrin havupuukannot
- läpimitaltaan yli 20 senttimetrin lehtipuukannot
- läpimitaltaan alle 20 senttimetrin lehtipuukannot
- alle 10 cm kannot (kaikki puulajit samassa luokassa)
- vanhat, ennen uudistushakkuuta syntyneet kannot (kaikki puulajit samassa luokassa)

3.3 Tulokset ja johtopäätökset

Kantojen korjuuala oli keskimäärin 95 prosenttia korjuukohteiden kokonaispinta-alasta. Pienin korjuualan osuus oli 79 prosenttia ja suurin 100 prosenttia. Kokonaispinta-alan ei havaittu vaikuttavan korjuualan osuuteen. Voidaan arvioida, että kokonaispinta-alaa suurempi merkitys korjuualan osuuteen on korjuukohteen muodolla, joka määrää kuvion reunaan korjaamatta jätettävän alueen osuuden. Lisäksi korjuun ulkopuolelle jäävät korjuukohteella sijaitsevat arvokkaat elinypäristöt ja niiden suojakaistat.

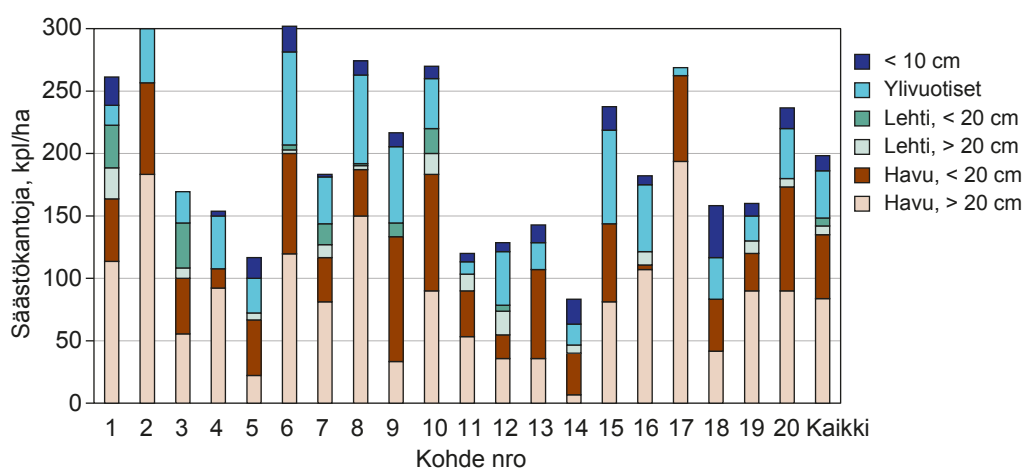
Korjuukohteilla oli korjuun jälkeen keskimäärin 198 erikokoista kantoa hehtaarilla. Kantojen määrä vaihteli huomattavasti korjuukohteiden välillä (vaihteluväli 83–300 kantoa/hehtaari). Korjuujäljen arvioinnin kannalta merkittävin on isojen, läpimitaltaan yli 20 senttimetrin havupuukantojen luokka. Näiden määrän keskiarvo oli 84 kantoa hehtaarilla. Enimmillään isoja havupuukantoja oli korjuualalla lähes 200 kappaletta hehtaarilla. Pienten, alle 20 senttimetrin havupuukantojen määrän keskiarvo oli 51 kantoa hehtaarilla ja vaihteluväli oli 4–100 kantoa hehtaarilla.

Lehtipuukantojen määrän keskiarvo oli 13 kappaletta hehtaarilla ja vaihteluväli 0–60 kappaletta hehtaarilla (kuva 6). Koska lehtipuukantoja ei korjattu, niiden määrä riippuu metsikön rakenteesta ennen uudistushakkuuta. Vanhoja, uudistushakkuuta aiemmissa hakkuissa syntyneitä kantoja oli keskimäärin 38 kappaletta hehtaarilla ja vaihteluväli oli 6–74 kantoa hehtaarilla.

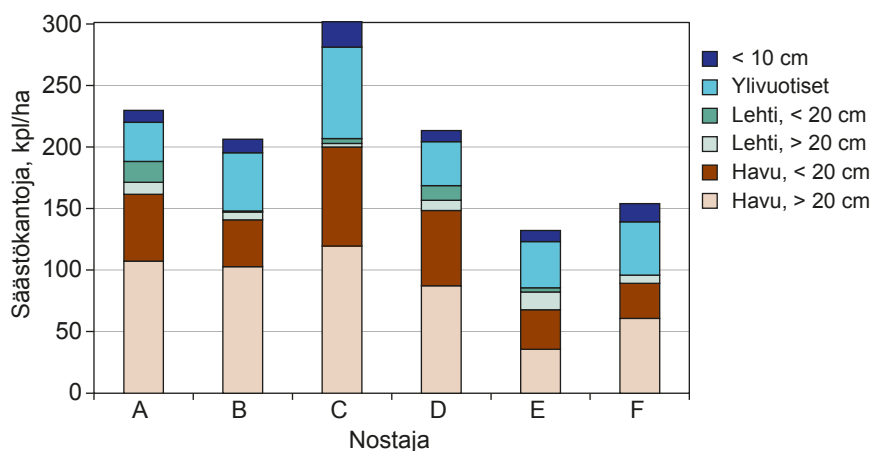
Kuvassa 7 on esitetty säästökantojen hehtaarikohtaiset määrät yrittäjittäin. Säästökantojen kokonaismäärät ja suurten havupuukantojen määrät poikkesivat selvästi yrittäjien välillä. Tulosten mukaan ainakin urakoitsijat A–D olisivat voineet nostaa kantoja havaittuja määriä enemmän. Yrit-

täjien väliset vertailut on kuitenkin tehtävä varauksin, koska korjuukohteet poikkeavat toisistaan muodon sekä reuna- ja suoja-alueiden suhteen.

Kantojen korjuusuosituksen mukainen vähintään 25 yli 15 senttimetrin säästökannon määrä jäi toteutumatta pelkästään yhdellä korjuukohteella. Lähes kaikilla korjuukohteilla oli jätetty yli 15 senttimetrin kantoja yli 50 kappaletta hehtaarille, mitä pidetään rajana savi- ja silttimailla. Yleisesti ottaen kantoja oli jätetty suositukseen nähden riittävästi. Joillakin kohteilla kantoja olisi voitu korjata selvästi enemmän ilman että olisi ylitetty suositusten mukaisia rajoja. Taloudelliselta kannalta säästökantojen määrään tulisi kiinnittää huomiota. Korjuun yksikkökustannukset nousevat tarpeettomasti, jos kantopuun kertymä jää pieneksi verrattuna korjattavissa olevaan kantopuun määrään.



Kuva 6. Erityyppisten säästökantojen kappalemäärät hehtaarilla kannonnostokohteittain Kanta-Hämeessä.



Kuva 7. Erityyppisten säästökantojen kappalemäärät hehtaarilla eri yrittäjien kannonnostokohteilla Kanta-Hämeessä.

4 Metsikkö- ja puustotunnusten ja hakkuukertymän arviointi nuorissa metsissä

4.1 Johdanto

Metsähakkeen kysyntä kasvaa, mikä on lisännyt latvusmassan ja kantopuun lisäksi nuorista metsistä korjattavan energiapuun korjuumääriä. Nuorten metsien energiapuuta korjataan kohteilla, joissa taimikonhoito on jäänyt tekemättä, se on tehty puutteellisesti tai taimikon päältä poistetaan verhopuustoa. Myös metsissä, joissa on selvästi harvennuksen tarvetta, mutta odotettavissa oleva kuitupuukertymä jää vähäiseksi, voidaan harkita energiapuuharvennusta. Energiapuun korjuulle, aivan kuten muullekin puunkorjuulle, on laadittu Tapion metsänhoitosuositukset (Äijälä ym. 2010), joissa annetaan muun muassa puuston tavoiteteiheydet korjuun jälkeen kasvupaikoittain ja puulajeittain.

Nuorten metsien energiapuun korjuussa ongelmana on puunkorjuun korkeat kustannukset, jotka johtuvat ennen kaikkea poistettavan puuston pienestä tilavuudesta. Korjuun kustannukset nousevat huomattavasti puuston pienentyessä ja ylittävät helposti energiapuusta maksettavan hinnan. Vaikka kyseessä on osittain myös metsänhoidollinen toimenpide, tulee mieltä, paljonko energiapuun korjuu voi enintään maksaa. Pienipuustoisilla ja korjuukustannuksiltaan kalliilla kohteilla tuleekin harkita energiapuuharvennuksen sijasta taimikonhoitoa raivaussahalla. Metsänomistajan näkökulmasta oleellista on hyvän työjäljen sekä metsänhoidollisten etujen ja kustannussäästöjen lisäksi hakkuukertymä sekä energiapuusta maksettava kantohinta. Energiapuuharvennuksilla hakkuupoistuman järeys ratkaisee energiapuun korjuun kannattavuuden, puustamaksukyvyn sekä raaka-aineesta maksettavan kantohinnan suuruuden. Energiapuuharvennuksilla metsä- ja kaukokuljetuskustannuksen merkitys puustamaksukyvyllä on huomattavasti hakkuukustannusta pienempi, varsinkin kun operoidaan kohtuullisilla metsä- ja kaukokuljetusmatkoilla (Laitila ym. 2010).

Nuorten harvennusemetsien korjuukohteilla korjuumenetelmistä, puutavaralajeista ja ylipäättään tehtävistä toimenpiteistä päättäminen edellyttää riittävää tietoa metsikkö- ja puustotunnuksista. Odotettavissa oleva hakkuukertymä, tavaralajijakauma ja runkojen koko määrittävät pitkälti kohteen kantorahatulon ja korjuukustannusten tason.

Nuorissa harvennusemetsissä tehtävästä puukaupasta ja korjuun menetelmistä päättäminen on tyypillisesti perustunut silmävaraiseen ja kokemusperäiseen arviointiin. Leimikoilla ei yleensä ole tehty koelaitteita puustomittauksia. Metka-hankkeessa laadittujen laskureiden (luku 5) ja näiden tuottamien tulosten avulla käyttäjät pystyvät paremmin arvioimaan korjuukohteiden toimenpiteitä ja kokonaistaloudellisuutta. Tämän tyyppisten apuvälineiden käyttöä varten tarvitaan riittävän tarkkaa tietoa korjuukohteen puuston puulajijakaumasta, runkoluvusta, läpimitoista ja pituuksista. Näiden määrittäminen on tehtävä korjuukohteen ennakkomittauksilla.

Korjuukohteella tehtävä ennakkomittaus koelamittauksena vie työaikaa ja on siten sekä kustannus- että resurssikysymys. Jotta ennakkomittauksen perusteella saadut tulokset ja päätelmät olisivat oikeita, on metsikkö- ja puustomittautustietojen oltava riittävän tarkkoja. Käytännössä riittävään tarkkuuteen pääseminen edellyttää riittävää koelaitteiden lukumäärää ja koepuiden mittausta. Toisaalta liian suuri mittausten määrä on epätarkoituksenmukaista, jos sillä ei saavuteta merkittävää parannusta puuston arviointitarkkuudessa. Ennakkomittautustiedot ja Metka-laskureiden kaltaisilla

työkaluilla määritettävät tulokset ovat päätösten tukena eikä mittauksilta ole tarpeen edellyttää samanlaista tarkkuutta kuin puuraaka-aineen kauppaa koskevissa luovutusmittauksissa tarvitaan.

Tässä tutkimuksessa

- a) määritettiin tyypillisten nuorten metsien korjuukohteiden puuston rakennetta Kanta-Hämeessä,
- b) määritettiin harvennusvoimakkuus ja hehtaarikohtainen kertymä nuorten metsien korjuukohteiden hakkuussa ja
- c) tutkittiin koealojen pinta-alan ja koealojen määrän vaikutusta korjuukohteen puustotunnusten määrityksen luotettavuuteen.

4.2 Aineisto ja menetelmät

4.2.1 Mittaukset energiapuun korjuukohteilla

Tutkimuskohteiksi valittiin kahdeksan korjuuseen tulevaa nuorten metsien korjuukohdetta Kuhmoisten kunnan alueella. Maastomittaukset tehtiin ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen kesällä ja syksyllä 2010.

Korjuuseen tulevien metsikkökuvioiden puustomittaukset tehtiin systemaattisella linjoittaisella otantamittauksella ympyräkoealoilta. Koeala- ja linjaväli vaihteli 20–50 metriin metsikkökuvion pinta-alan mukaan. Ympyräkoealan pinta-ala oli 100 neliometriä (säde 5,64 metriä). Lisäksi yhdellä metsikkökuvioilla tehtiin samaa koealan keskipistettä käyttäen mittaukset myös pinta-alaltaan 50 neliometrin (säde 3,99 metriä) ja neljän neliometrin (säde 1,13 metriä) ympyräkoealoilta. Metsikkökuvioilta mitattiin ennen korjuuta 2–11 ympyräkoealaa (taulukko 1).

Ennen korjuuta tehdyissä mittauksissa ympyräkoealojen jokaisesta puusta (ns. lukupuu) mitattiin rinnankorkeusläpimitta, merkittiin puulaji ja valittiin poistettavat ja kasvamaan jätettävät puut. Järjestyksessä joka viidennestä puusta (ns. koepuu) mitattiin lisäksi pituus ja elävän latvuksen alaraja. Tilavuus- ja biomassamalleja käyttäen määritettiin leimikko-, kuvio- ja hehtaarikohtaiset kokonaistilavuudet ja kuiva-ainemäärät.

Taulukko 1. Metsikkökuvioiden pinta-alat ja ympyräkoealojen määrät.

Metsikkökuvio	Metsikkökuvion pinta-ala, ha	Koealojen lukumäärä
1	1,69	10
2	0,66	2
3	0,29	2
4	0,61	6
5	2,25	7
6	1,43	8
7	2,74	11
8	0,57	3

4.2.2 Pituuden ja latvussuhteen laskenta

Puukohtaisten mittaustietojen perusteella laadittiin tilastomatemattinen malli, jossa puun pituus määritettiin rinnankorkeusläpimitan suhteen (Näslund 1937, kaava 1). Mallilla laskettiin pituuden arvo niille koealojen puille (lukupuut), joista pituutta ei maastossa mitattu. Latvussuhteeksi (elävän latvuksen pituus/puun pituus) laskettiin kaikkien saman puulajin koepuiden latvussuhteiden keskiarvo (taulukko 2).

Taulukko 2. Kaikkien koealojen luku- ja koepuiden kokonaismäärät ja koepuiden perusteella lasketut latvussuhteet puulajeittain.

Puulaji	Lukupuita, kpl	Koepuita, kpl	Latvussuhde, %
mänty	221	45	58
kuusi	318	65	86
rauduskoivu	268	54	67
hieskoivu	216	43	61
haapa	33	7	57
harmaaleppä	149	31	56
muu lehtipuu	6	2	80
yhteensä	1213	247	

4.2.3 Koepuiden tilavuuden ja biomassan laskenta

Koepuiden runkopuun tilavuus laskettiin tilavuusmalleilla, joissa tilavuus määritetään rinnankorkeusläpimitan ja pituuden perusteella (Laasasenaho 1982). Koealan kaikkien puiden biomassat, mukaan lukien runkopuu, oksat, neulaset ja lehdet, laskettiin biomassamalleilla (Repola ym. 2007, Johansson 2000 ja 2002). Männyllä, kuusella sekä koivulla biomassat laskettiin puiden läpimitan, pituuden sekä latvussuhteen perusteella erikseen puun eri osille (runko, kuori, elävät oksat, kuolleet oksat ja lehdet), jonka jälkeen puun eri maanpäällisten osien biomassojen summaa käytettiin puun biomassana. Haavan (Johansson 2002) ja lepän (Johansson 2000) biomassat laskettiin läpimitan ja pituuden perusteella koko puulle. Ympyräkoalojen puuston biomassasta laskettiin hehtaarikohtainen biomassa.

Toisena tapana lukupuiden tilavuuden laskennassa käytettiin menetelmää, jossa puun biomassaa jaettiin harvennusenergiapuulle aiemmissä tutkimuksissa määritetyillä kuivatuoretiheyksillä (mänty 385, kuusi 400, koivu 475, leppä 370 ja haapa 385 kg/m³) (Hakkila 1978, Lindblad & Verkasalo 2001). Puiden tilavuus muunnettiin hehtaarikohtaiseksi tilavuudeksi.

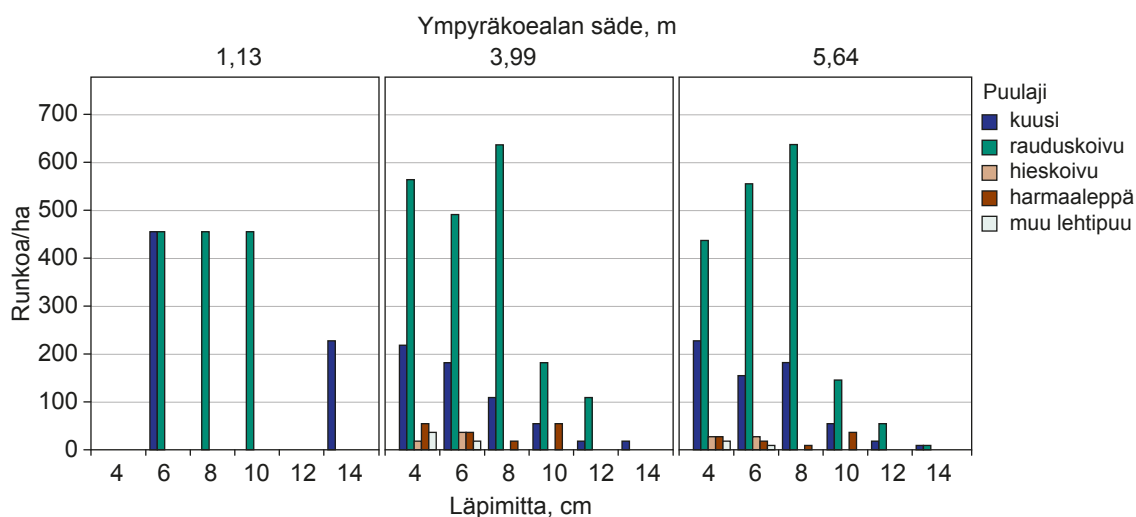
4.3 Tulokset

4.3.1 Koealan koon vaikutus otannan tarkkuuteen

Ympyräkoelan koon vaikutusta puustotunnusten määrittämisen tarkkuuteen tutkittiin metsikkökuviolla 7 (kuva 8). Kun koealojen lukumäärä pidetään samana niiden pinta-alan pienentäminen vaikuttaa otannan suuruuteen ja pinta-alan otantasuhteeseen. Koealan pinta-ala vaikuttaa koepuiden edustamaan runkomäärään, kun puustotunnukset muutetaan hehtaarikohtaisiksi. Pinta-alaltaan sadan neliömetrin koealalla yksi koepuu edustaa sataa puuta hehtaarilla, 50 neliömetrin koealalla 200 puuta ja neljän neliömetrin koealalla 2500 puuta.



Kuva 8. Metsikkökuvio 7 ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen. Kuvat: Jukka Lehtimäki.



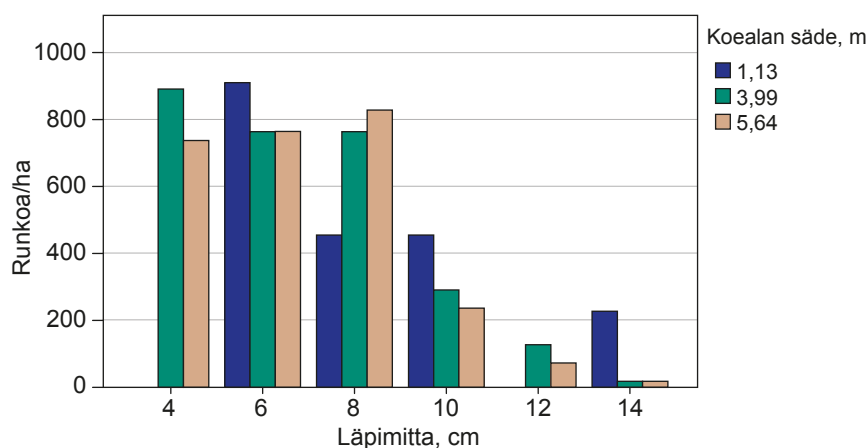
Kuva 9. Erisäteisiltä ympyräkoeloilta määritetty runkolukusarja puulajeittain.

Käytettäessä pienintä koelan kokoa kokonaisrunkoluku hehtaarilla määritettiin pienemmäksi kuin suuremmilla koeloilla. Pienimpään koelakokoon pohjautuvassa otannassa runkolukusarjasta puuttuivat läpimitaltaan pienimmät puut (kuvat 9 ja 10). Vastaavasti suurimpaan 14 senttimetrin läpimittaluokan puita oli pienimmällä koelalla eniten. Pinta-alaltaan 50 neliömetrin ja sadan neliömetrin koalojen mittauksilla runkolukusarjat ovat verraten yhtenevät. Tulos kuvaa pienen koelaan perustuvan mittauksen satunnaisvaihtelua.

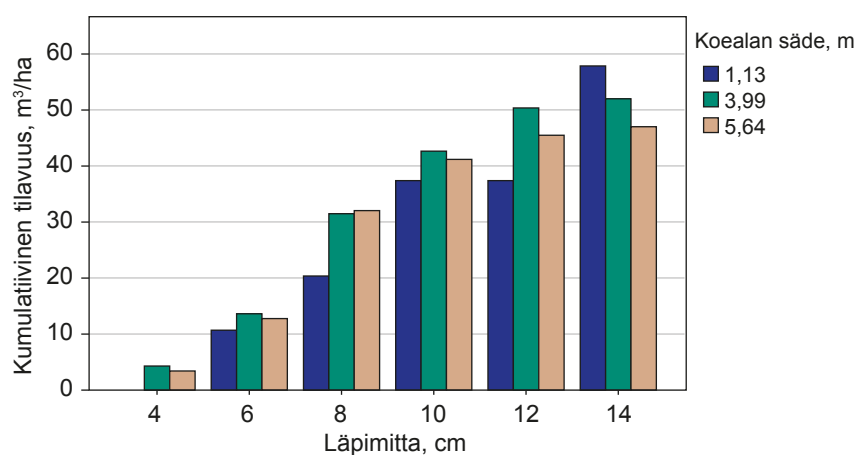
Samat erot kuin puuston läpimittajakaumassa ja kokonaisrunkoluvussa ovat havaittavissa myös erikokoisilta koeloilta lasketuissa puuston tilavuuksissa (kuva 11). Puuston kokonaistilavuus pienimmällä ympyräkoelalla (1,13 m:n säde) oli suurempi kuin suuremmilla koeloilla. Pienimmillä koeloilla pienimmät puut puuttuivat kokonaan. Suurinta järeysluokkaa (läpimitta 14 senttimetriä) lukuun ottamatta suuremmilla koeloilla saatiin suurin puumäärä (kuva 11).

Koelan koon vaikutusta puuston tilavuuden hajontaan havainnollistaa kuva 12. Vertailussa on käytetty 100, 75, 50 ja 25 neliömetrin koaloja, joiden säteet olivat 5,64, 4,89, 3,99 ja 2,82 metriä Koelan koon kasvaessa 25 neliömetristä 50 neliömetriin puustomittausten perusteella lasketun

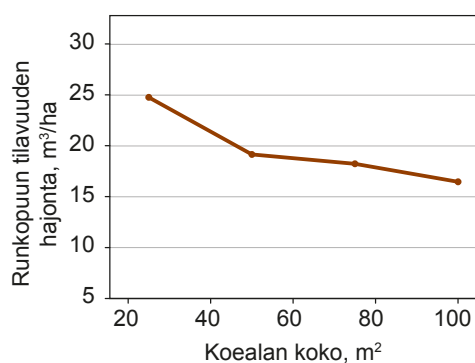
tilavuusennusteen hajonta laskee selvästi, mutta koealan koon kasvaessa edelleen hajonta laskee vain vähän. Todennäköisesti koealan koon kasvattaminen yli 50 neliömetrin ei enää merkittävästi paranna tilavuusennusteen tarkkuutta, mutta lisää mittausten työmäärää huomattavasti. Käyttämällä 3,99 metrin säteistä koealaa työmäärä pysyy kohtuullisena ja puuston määrän arviointitarkkuus on riittävän hyvä ennakkomittauksessa.



Kuva 10. Runkolukusarjat erisäteisiin ympyräkoeloihin pohjautuvissa otannoissa.



Kuva 11. Runkojen kumulatiivinen hehtaarikohtainen tilavuus läpimittaluokittain eri säteisillä koeloiilla.



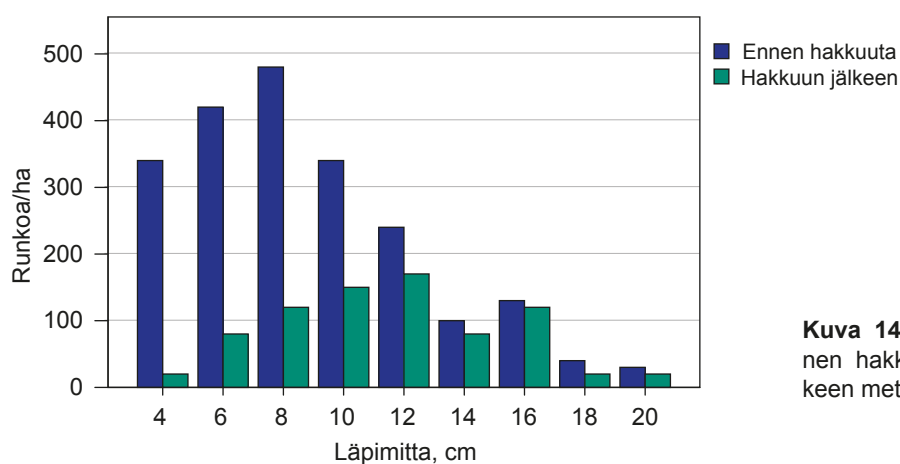
Kuva 12. Koealan koon vaikutus puuston tilavuusennusteen hajontaan.

4.3.2 Puuston tilavuus ja harvennusvoimakkuus esimerkkikohteilla

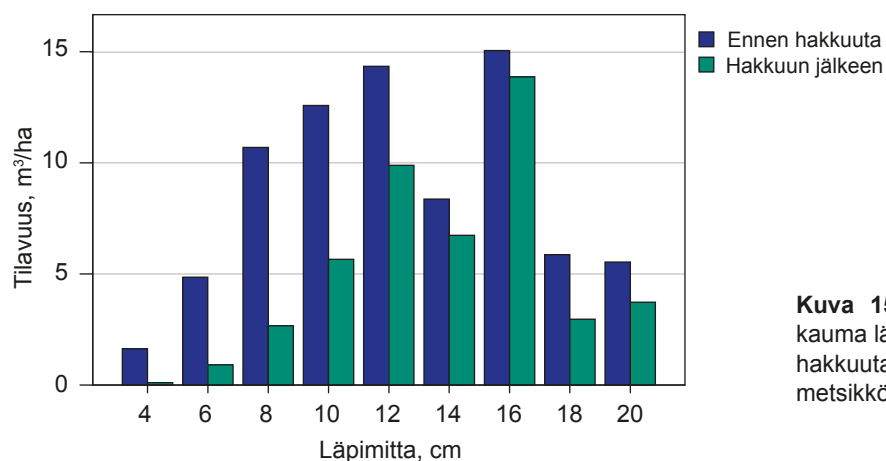
Metsikkökuvio 1 (kuva 13) oli havupuupainotteista sekametsää. Puuston hehtaarikohtainen runkoluku oli ennen hakkuuta noin 2120 ja hakkuun jälkeen 780, eli runkomäärästä poistettiin yli kaksi kolmasosaa (kuva 14). Pääosin harvennuksessa poistettiin läpimitaltaan pieniä puita ja suurimmat puut jätettiin kasvamaan, eli tehtiin tyypillinen alaharvennus. Puuston hehtaarikohtainen tilavuus ennen hakkuuta oli 79 m³/ha ja hakkuun jälkeen 47 m³/ha. Hakkuupoistuma oli siten noin 40 prosenttia puuston alkutilavuudesta (kuva 15).



Kuva 13. Metsikkökuvio 1 ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen. Kuva: Jukka Lehtimäki.



Kuva 14. Runkolukusarja ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen metsikkökuviolla 1.

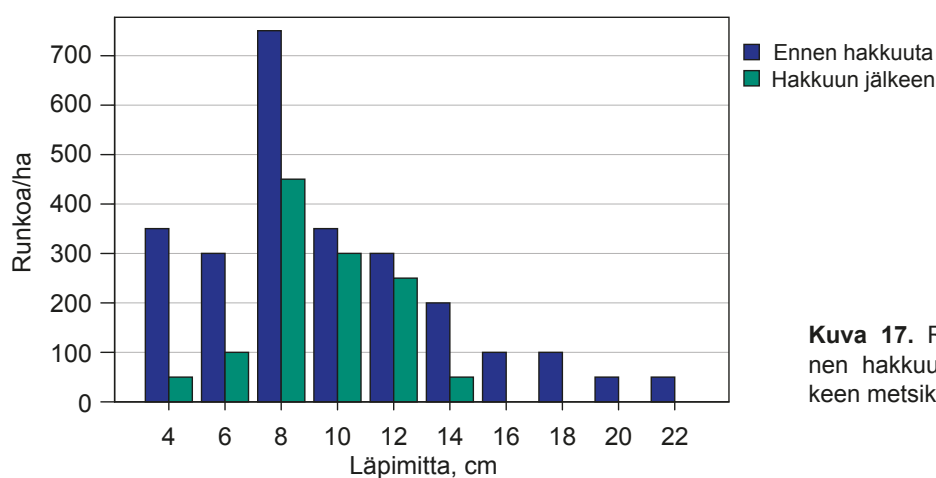


Kuva 15. Puuston tilavuusjakauma läpimittaluokittain ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen metsikkökuviolla 1.

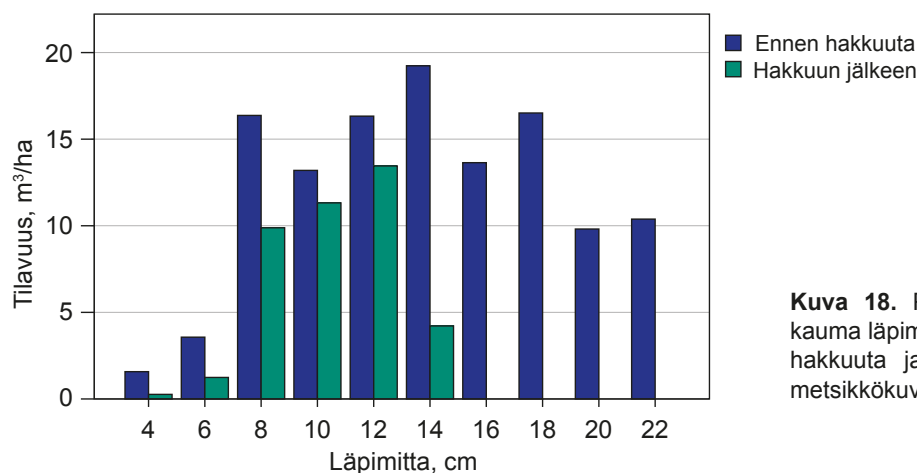
Metsikkökuviolla 3 (kuva 16) kasvoi nuorta kuusikkoa, jossa oli sekapuuna suurikokoisia hieskoivuja. Hehtaariohtainen runkoluku oli ennen hakkuuta noin 2550 ja hakkuun jälkeen noin 1200, eli runkomäärästä poistettiin hieman yli puolet (kuva 17). Harvennuksessa poistettiin läpimitaltaan suurimpia ja pienimpiä puita ja keskikokoiset puut jätettiin kasvamaan. Kuviolta poistettiin kaikki koivut, jolloin jäljelle jäi kasvamaan puhdas kuusikko. Hakkuutapana oli siis etukasvuisten lehtipuiden poisto ja alaharvennus kuusikossa. Puuston hehtaariohtainen tilavuus ennen hakkuuta oli 120 m³/ha ja hakkuun jälkeen 40 m³/ha. Hakkuupoistuma oli siten noin kaksi kolmasosaa puuston tilavuudesta (kuva 18).



Kuva 16. Metsikkökuvio 3 ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen. Kuvat: Jukka Lehtimäki.

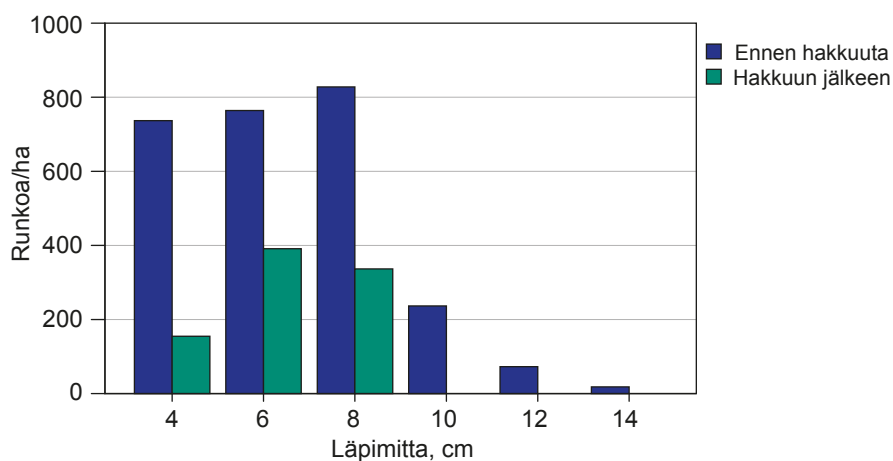


Kuva 17. Runkolukusarja ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen metsikkökuviolla 3.

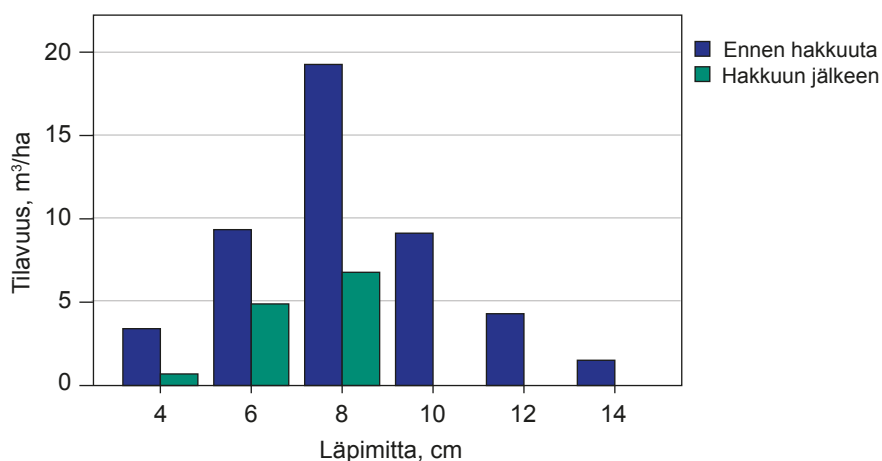


Kuva 18. Puuston tilavuusjakauma läpimittaluokittain ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen metsikkökuviolla 3.

Metsikkökuvio 7 (kuva 8) oli koivuvaltaista sekametsää. Hehtaarikohtainen runkoluku oli ennen hakkuuta noin 2650 ja hakkuun jälkeen noin 880 runkoa hehtaarille, eli runkomäärästä poistettiin noin kaksi kolmasosaa (kuva 19). Harvennuksessa poistettiin kaiken kokoisia runkoja, ja parhaat puut pienimmistä läpimittaluokista jätettiin kasvamaan (laatuharvennus). Hakkuussa kasvamaan jätettiin pääosin rauduskoivua ja sekapuuksi kuusta. Hehtaarikohtainen tilavuus oli ennen hakkuuta noin 47 m³/ha ja hakkuun jälkeen noin 12 m³/ha (kuva 20). Hakkuupoistuma oli siten noin 75 prosenttia puuston tilavuudesta. Voimakkaasta harvennuksesta huolimatta hakkuukertymä oli pieni, sillä puusto kuviolla oli pientä.



Kuva 19. Runkolukusarja läpimittaluokittain ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen metsikkökuviolla 7.



Kuva 20. Puuston läpimittaluokittainen tilavuusjakauma ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen metsikkökuviolla 7.

4.4 Johtopäätökset

Eri säteisten ympyräkoalojen erot biomassan ja tilavuuden kokonaismäärien ennustamisessa eivät ole suuria, mutta mitä pienempi koeala on kyseessä, sitä epäluotettavampia tuloksia saadaan. Lisäksi pienin koealakoko yksinkertaistaa läpimittajakaumaa ja puulajisuhteita. Sen sijaan 3,99 ja 5,64 metrin säteiset ympyräkoalat antavat melko yhtenevät runkolukusarjat puulajeittain. Koealan koon kasvattaminen 3,99 metrin säteisestä ympyräkoalaa suuremmaksi ei tyypillisissä ja tassarakenteisissa nuorissa metsissä paranna puuston arviointitarkkuutta merkittävästi. Puustoltaan epätasaisissa kohteissa puuston määrän arviointi riippuu koalojen määrästä ja sijoittelusta metsikkökuviolle.

Koealamittauksella määritettyjen puustotunnusten arviointitarkkuuteen vaikuttavat otantamenetelmä, mitattujen koalojen määrä ja pinta-ala ja runkojen määrä. Kun kyseessä on verraten vähäisin mittauksin tehtävä puuston määrän arviointi, koalat on syytä sijoittaa kuviolle edustavasti joko silmävaraisesti tai esimerkiksi systemaattisella linjoittaisella otannalla. Silloin kun kaikki koalojen rungot luetaan koepuiksi, mittauksen työmäärään vaikuttavat koalojen määrä ja koko ja näiden muodostama yhteispinta-ala. Pääpiirteissään voidaan sanoa, että mittaamalla useampia pieniä koaloja saadaan selvitettyä kuvion sisäistä hajontaa paremmin (esimerkiksi puulajisuhteita tai puuston kokojakaumia) kuin mittaamalla kokonaispinta-alaltaan vastaava, mutta vain muutama suuri koeala. Useampien koalojen mittaus todennäköisesti pienentää systemaattisen virheen mahdollisuutta. Ennakkomittauksissa käyttöön vakiintunut 50 neliömetrin koealakoko vaikuttaa tarkoituksenmukaiselta. Tällä saavutetaan verraten hyvä puuston arviointitarkkuus, eikä mittaustyön lisääminen paranna tarkkuutta merkittävästi.

5 Metka-laskentaohjelmat

5.1 Harvennusemetsien energiapuun kertymien ja keskitilavuuksien laskentaohjelma, Metka-maastolaskuri

5.1.1 Johdanto

Energiapuukohteen korjuukelpoisuuden määrittäminen on perinteisesti perustunut silmävaraiseen ja kokemusperäiseen arviointiin eikä leimikolla tai kuviolla ole tehty koealoittaisia puustomittauksia hakkuupoistuman määrästä tai hakkuussa poistuvan puuston keskitilavuudesta. Silmävaraiseen puuston tilavuuden ja hakkuupoistuman määrittämiseen liittyy kuitenkin aina systemaattisen virhearvioinnin riski, minkä vuoksi korjuukelpoisuuden määrittämisen helpottamiseksi ja arvioinnin tarkkuuden parantamiseksi kehitettiin Excel-pohjainen laskentapohja puustokoealatietojen keruuta ja puustotunnusten laskentaa varten (kuva 21). METKA-maastolaskuri on päätöksenteon apuväline, jolla harvennusemetsistä koealamittauksilla määritettyjen metsikkö- ja puustotunnusten perusteella pystytään määrittämään aiempaa tarkemmin hakkuussa poistuvan puuston keskitilavuus ja hakkuupoistuman määrä. Laskettujen puustotietojen perusteella on olemassa aiempaa paremmat perusteet valinnalle, korjataanko leimikolta energiapuuta vai onko se taimikonhoitokohde.

Harvennusmetzien energiapuun kertymien & keskitilavuuksien laskentaohjelma



Laskentaohjelma on laadittu hankkeessa Metsäenergiaa kannattavasti - METKA
Ohjelma laskee kokopuun ja rangan kertymät ja keskitilavuudet leimikkotasolla puustotunnusten avulla
Metsäntutkimuslaitos, Itä-Suomen alueyksikkö, Joensuu toimipaikka
©Juha Laitila 2010

Kuva 21. Excel-pohjaisen METKA-maastolaskurin aloitussivu.

5.1.2 Metka-maastolaskurin rakenne ja toimintaperiaate

METKA-maastolaskurissa on laskentamallin aloitussivu, puustotietojen keruulomakesivu sekä tulossivu (kuvat 21, 22 ja 24) ja se on tehty Excel-tilukkolaskentaohjelman pohjalle. METKA-maastolaskuri laskee kokopuun ja rangan kertymät ja puuston keskitilavuudet laskuriin syötettävien kuvio- ja puustotietojen avulla (kuva 22). Kokopuun tilavuudessa on mukana runkopuu, elävät oksat, kuolleet oksat sekä havupuilla neulaset. Rangan tilavuus tarkoittaa runkopuun tilavuutta.

Kuviotietoina laskuriin syötetään arvioitavana olevan kuvion pinta-ala hehtaareina (ha). Puumäärän laskenta perustuu Repola ym. (2007) puulajikohtaisiin biomassamalleihin ja puubiomassat muutetaan kiintotilavuuksiksi (m³) Hakkilan (1978) puulajikohtaisilla kuivatuoretiheyskertoimilla. Excel-pohjaista laskentaohjelmaa luotaessa tavoitteena on ollut sen helppokäyttöisyys, muunneltavuus ja selkeä rakenne. Laskentaohjelman sivuille on lisätty ohjetauluja, jotka opastavat METKA-maastolaskurin käytössä ja kuvio- sekä puustotietojen syöttämisessä taulukoihin.

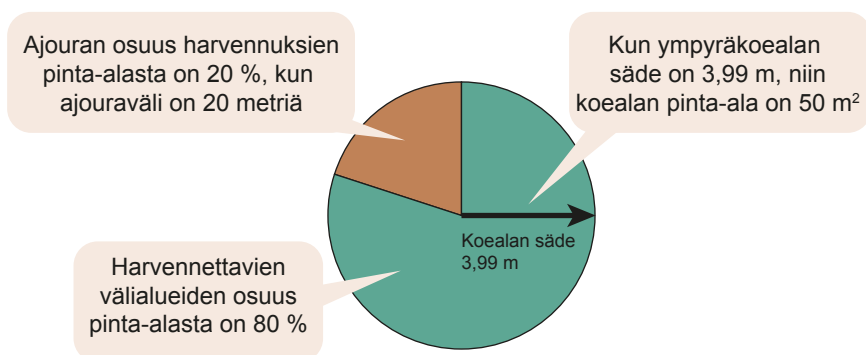
Hakkuupoistuman puustotietojen keräämistä varten arvioitavalle kuviolle tehdään kolme 3,99 metrin säteistä ympyräkoealaa, joiden pinta-ala on 50 neliometriä (kuva 23). Otantavirheen pienentämiseksi ympyräkoealat tulee sijoittaa mahdollisimman edustavasti eri puolille arvioitavaa kuviota. Ympyräkoealoille tehdään Tapion energiapuun korjuusuositusten (Äijälä ym. 2010) mukainen malliharvennus ja samalla kerätään puulajeittain tiedot harvennuksessa poistettavien runkojen kappalemäärästä, keskipituudesta, keskimääräisestä rinnankorkeusläpimitasta sekä latvussuhteesta. Koealakohtaiset puustotiedot voidaan syöttää joko suoraan metsässä maastotietokoneen METKA-maastolaskuriin tai puustotiedot voidaan kerätä paperiselle maastolomakkeelle ja siirtää myöhemmin pöytä tietokoneella olevaan METKA-maastolaskuriin tulosten laskentaa varten. Mallileimauksen tietoja voidaan hyödyntää myös laadittaessa korjuuyrittäjälle työmaaohejetta, jossa selostetaan mm. harvennusvoimakkuus, hakkuutapa sekä harvennuksessa suosittavat puulajit kyseisellä korjuukohteella. Koealoilta kerättyjä puustotietoja vaaditaan myös silloin kun haetaan metsänhoidon ja energiapuun korjuun tukia.

	Mänty	Kuusi	Koivu	Muu lehtipuu
Poistuma koealalta kpl, kun yli 8 cm	0	0	8	15
Poistuma koealalta kpl, kun yli 8 cm	4	0	9	15
Poistuma koealalta kpl, kun yli 8 cm	0	0	10	13
Poistuma koealalta kpl, kun 4 - 8 cm	0	2	2	2
Poistuma koealalta kpl, kun 4 - 8 cm	2	2	2	2
Poistuma koealalta kpl, kun 4 - 8 cm	0	2	2	2
Pituus m, kun yli 8 cm		0	10	11
Pituus m, kun yli 8 cm	11	0	10	11
Pituus m, kun yli 8 cm		0	11	12
Pituus m, kun 4 - 8 cm		6	7	7
Pituus m, kun 4 - 8 cm	7	6	5	8
Pituus m, kun 4 - 8 cm		6	7	7
Läpimitta cm, kun yli 8 cm		0	10	8
Läpimitta cm, kun yli 8 cm	10	0	8	9
Läpimitta cm, kun yli 8 cm		0	8	8
Läpimitta cm, kun 4 - 8 cm		4	5	5
Läpimitta cm, kun 4 - 8 cm	5	4	5	5
Läpimitta cm, kun 4 - 8 cm		4	5	5
Latvussuhde %, kun yli 8 cm		0 %	35 %	40 %
Latvussuhde %, kun yli 8 cm	28 %	0 %	35 %	40 %
Latvussuhde %, kun yli 8 cm		0 %	35 %	40 %
Latvussuhde %, kun 4 - 8 cm		70 %	40 %	35 %
Latvussuhde %, kun 4 - 8 cm	20 %	70 %	40 %	35 %
Latvussuhde %, kun 4 - 8 cm		70 %	40 %	35 %
Kuvion pinta-ala, hehtaareina	8,0			

Kuva 22. METKA-maastolaskurin puustotietojen keruulomake.

METKA-maastolaskuriin syötettävät puulajit ovat mänty, kuusi, koivu sekä muut lehtipuut. Muut lehtipuut tarkoittavat haapaa, leppää, pihlajaa sekä raitaa. Mittaus- ja arviointitarkkuuden parantamiseksi hakkuupoistuman puulajittaiset puustotunnukset (runkoluku, keskipituus, keskiläpimitta sekä latvussuhde) kerätään kahdesta läpimittaluokasta eli rinnankorkeusläpimittaluokasta 4–8 senttimetriä ja rinnankorkeusläpimitta yli kahdeksan senttimetriä. Mallileimausta tehdessä on huomioitava, että ajouran osuus on 20 metrin ajouravälillä 20 prosenttia harvennuksen pinta-alasta. Ajouran vaikutuksen huomioiminen lisää hakkuupoistuman runkoluvun määrää ja kasvattaa poistettavan puuston keskijäreyttä, kun uralta poistetaan myös suuria puita, jotka muutoin olisi jätetty kasvamaan. Hakkuupoistuman runkoluku koealalta tallennetaan puiden lukumääränä (kpl). Puiden keskipituus tallennetaan metreinä (m) ja keskiläpimitta senttimetreinä (cm) millimetrin tarkkuudella. Hakkuupoistuman latvussuhde, eli elävän latvuksen pituus suhteessa puun pituuteen, tallennetaan prosentteina (%).

METKA-maastolaskuri laskee kokopuun ja rangan kertymän kuviolta (m³) sekä hakkuukertymän määrän hehtaarilta (m³/ha). Tiedot löytyvät maastolaskurin tulossivulta (kuva 24). Lisäksi ohjelma laskee kokopuun ja rangan keskitilavuuden kuviolla litroina (dm³) sekä hakkuupoistuman pohjapinta-alan hehtaarilta (m²/ha) samoin kuin hakkuussa poistuvien puiden keskimääräisen etäisyyden toisistaan metreinä (m). Edellä mainittujen tietojen ohella METKA-maastolaskurin tulossivulta voi poimia tiedot poistettavien puiden runkoluvusta hehtaarilta (kpl/ha), harvennuspoistuman puulajisuhteet rinnankorkeusläpimittaluokissa 4–8 senttimetriä ja yli kahdeksan sentti-



Kuva 23. Periaatekuva ympyräkoealasta.

Tulokset: [*] <small>* Puubiomassan määrät on laskettu Repola ym. (2007) malleilla ja ne on muutettu kiintotilavuuksiksi Hakkilan (1978) kuivatuoretiheyskertoimilla</small>		
	Hakkuukertymä, m ³	Hakkuukertymä, m ³ /ha
Kokopuun määrä kuviolla yhteensä:	402	50
Rankapuun määrä kuviolla yhteensä:	331	41
Kokopuun keskitilavuus kuviolla, dm ³	32	
Rankapuun keskitilavuus kuviolla, dm ³	26	
Hakkuupoistuman pohjapinta-ala yhteensä, m ² /ha	7,7	
Hakkuupoistuman keskimääräinen runkoväli, m	2,5	

Kuva 24. Näkymä METKA-maastolaskurin tulossivulta.

metriä, samoin kuin puulajittaiset keskiläpimitat, keskipituudet, latvussuhteet, poistettavan puuston pohjapinta-alat ja keskitilavuudet edellä mainituissa läpimittaluokissa.

5.1.3 Metka-maastolaskurin hyödyt ja epävarmuustekijät

METKA-maastolaskuri on kehitetty päätöksenteon apuvälineeksi määrittämään ensisijaisesti hakkuussa poistettavan kokopuun ja rangan keskitilavuutta kuviolla ja toissijaisesti kokopuun ja rangan kertymää kuviolla tai työmaalla. Laskurin tuottamien puustotietojen perusteella käyttäjä voi valita kyseiselle kohteelle taloudellisesti kannattavimman toimenpideketjun ja samalla parantaa energiapuun korjuun kannattavuuden kokonaistaloutta, kun korjuukustannuksiltaan epäedulliset työmaat voidaan rajata aiempaa tarkemmin korjuutoiminnan ulkopuolelle. Mitattuun tietoon pohjautuva päätöksenteko on aina tarkempaa kuin silmävaraiseen arvioon pohjautuva päätöksenteko. Mittauksen ja mallileimauksen merkitys korostuu erityisesti työmailla, jotka ovat puuston koon perusteella taimikonhoidon ja energiapuun korjuun rajamaastossa. Edellä mainituilla kohteilla huolellisesti tehtyyn mittaukseen ja arviointiin käytetty aika kertyy huomattavana säästönä oikein tehdyn toimenpideketjun valinnan kautta. METKA-maastolaskurilla tuotettuja kertymätietoja voidaan hyödyntää myös energiapuun hankinnan suunnittelussa, kun korjuuorganisaatiolla on käytettävissä aiempaa huomattavasti tarkemmat arviot energiapuun pystyvarannoista.

METKA-maastolaskurin tuottamien tulosten virhelähteitä ovat muun muassa puustotietojen mittauksen, ympyräkoealan harkinnanvaraiseen sijoittamiseen, mallileimaukseen, toteutuneeseen harvennusvoimakkuuteen tai laskurissa käytettyihin puubiomassamalleihin ja kuivatuoretiheyskertoimiin liittyvät tekijät. Puustotietojen keruussa kokenutkin mittaaja tekee joskus virheitä. Rinnankorkeusläpimittojen mittausrvirheet syntyvät muun muassa väärästä mittauskorkeudesta ja puun epäpyöreyydestä. Puun pituuden ja latvussuhteen mittaamisessa huono näkyvyys tai puiden kallistuminen ja mittaussuunta voivat aiheuttaa virhettä. Ympyräkoealojen edustava sijoittaminen voi myös olla haastava tehtävä etenkin puustoltaan epätasaisilla kuvioilla. Myös koealojen suhteellisen pieni koko ja kappalemäärä voivat aiheuttaa arviointivirhettä. Mallileimauksen ja toteutuneen harvennuksen välillä on myös aina eroa, koska mallileimauksen ja varsinaisen harvennustyön tekee yleensä eri henkilö. Laskurissa olevat puubiomassamallit on tehty edustamaan suurta maantieteellistä aluetta, minkä vuoksi kuviotasolla mallien avulla lasketun biomassamäärän ja todellisen biomassamäärän välillä voi olla eroa johtuen muun muassa kasvupaikasta tai metsän käsittelyhistoriasta. Biomassamallien luotettavuus ei ole niin hyvällä tasolla kuin esimerkiksi runkopuuta ennustavien mallien. Merkittävä virhelähde on muiden lehtipuiden puubiomassan määrän laskenta, koska näillä puulajeilla käytetään puulajikohtaisten mallien puutteen vuoksi koivun biomassamalleja. Kuviotasolla virhettä aiheuttavat myös suuralueelle tarkoitettut puulajikohtaiset kuivatuoretiheyskertoimet, koska puun tiheys vaihtelee jonkin verran kuviointain muun muassa kasvupaikan ja puuston iän mukaan.

5.2 Metsähakkeen tuotantokustannusten laskentaohjelma, Metka-kustannuslaskuri

5.2.1 Johdanto

METKA-hankkeessa kehitetyn Excel-pohjaisen ”Metsähakkeen tuotantokustannusten laskentaohjelman” päätehtävä on perehdyttää käyttäjänsä siihen, mitkä seikat vaikuttavat latvussmassa-, kanto- tai kokopuuhakkeen käyttöpaikkahintaan ja mikä on eri työvaiheiden osuus metsähakkeen käyttöpaikkahinnasta erityyppisillä leimikoilla (kuva 25). Samalla voidaan tarkastella, kuinka muutokset materiaalin lämpöarvossa tai valitun korjuuketjun tuottavuudessa ja kustannuksissa vaikuttavat yksittäisen työvaiheen tai koko toimitusjärjestelmän yksikkökustannuksiin. Laskentamallissa käydään leimikkotasolla läpi metsähakkeen hankinnan työvaiheet eri korjuuketjuilla alkaen toiminnan organisoinnista edeten korjuun ja kuljetuksen kautta metsäpolttoaineiden toimittamiseen loppukäyttäjälle saakka. Malli laskee työvaiheittaiset yksikkökustannukset sekä metsähakkeen kiintotilavuutta että energiasisältöä kohden. Laskentamallia voidaan käyttää päätöksenteon tukena verrattaessa metsähakkeen tuotantokustannuksia voimalaitoksen metsähakkeesta maksamaan hintaan tai perusteltaessa metsähakkeen raaka-aineesta maksettavaa hintaa metsänomistajalle.

Laskentaohjelmia voivat työssään hyödyntää neuvontaorganisaatiot, tutkimuslaitokset, oppilaitokset, metsähaketta hankkivat ja korjaavat yritykset kuin myös metsähakkeen loppukäyttäjät. Laskentamallia voidaan käyttää yksikkökustannusten ja resurssitarpeiden laskentaan ja sen avulla voidaan vertailla eri korjuumenetelmiä eri olosuhteissa. METKA-korjuukustannuslaskurissa työntutkimukseen perustuvat korjuuketjujen tuottavuusmallit on muokattu mahdollisimman helpokäyttöiseen ja käytäntöä palvelemaan muotoon.



Kuva 25. Metsähakkeen tuotantokustannusten laskentaohjelman aloitussivu.

5.2.2 Laskurin rakenne ja toimintaperiaate

METKA-korjuukustannuslaskuri laskee latvusmassa-, kokopuu- ja kantohakkeen korjuukustannukset eri korjuuketjuille työmaatiетоjen, konekustannustietojen sekä tuottavuustietojen perusteella. Tiedostot ovat syöttösoluja lukuunottamatta suojatut, joten laskentamallia ei vahingossa pysty muuttamaan tai vahingoittamaan. Työmaatiетоissa käyttäjä antaa tiedot mm. työmaan pinta-alasta, metsä- ja kaukokuljetusmatkasta, puulajisuhteista, materiaalin kosteudesta, materiaalin talteensaantoprosentista palstalla sekä varastointihävikin suuruudesta (kuva 26). Puubiomassan kertymälasenta varten käyttäjä syöttää tiedot hukkarunkopuun osuudesta päätehakuulla, poistettavan puuston runkoluvusta hehtaarilla (kuva 26) sekä puulajikohtaiset tiedot latvussuhteesta, puun pituudesta sekä rinnankorkeusläpimitasta (kuva 27). Puubiomassakertymän laskenta perustuu Repolan biomassamalleihin (Repola ym. 2007) ja ne muunnetaan kiintotilavuuksiksi Hakkilan (1978) kuivatuoretiheyskertoimilla. Metsähakkeen tehollinen lämpöarvo lasketaan puolestaan materiaalin kosteuden ja puulajikohtaisten lämpöarvojen mukaan (Hakkila 1978, Nurmi 2000).

	Annettava arvo
Työmaan pinta-ala, ha	2,0
Metsäkuljetusmatka, m	250
Kaukokuljetusmatka käyttöpaikalle, km	41
Kaukokuljetusmatka terminaaliin, km	41
Kuljetusmatka terminaalista käyttöpaikalle, km	5

	Annettava arvo
Männyn osuus kertymästä, %	50 %
Kuusen osuus kertymästä, %	50 %
Koivun osuus kertymästä, %	0 %
Muiden lehtipuiden osuus kertymästä, %	0 %
	100 %

	Annettava arvo
Hakkuupoistuma, runkoja hehtaarilta (kpl/ha)	450
Runkohukkapuu % (tyvilumpit, latvat yms. suhteessa runkopuuhun)	2 %

Kuva 26. Työmaatiетоjen syöttölomake.

	Latvussuhde, %	Puun pituus, m	Rinnankorkeusläpimitta, cm
Mänty	40 %	24	24
Kuusi	65 %	24	24
Koivu	50 %	24	24
Muu lehtipuu	45 %	24	24

Kuva 27. Puustotietojen syöttölomake

Syöttötietojen perusteella laskuri laskee tiedot latvusmassan, kantoapuun ja kokopuun hehtaari-kertymistä sekä työmaan kokonaiskertymistä kiintokuutiometreinä ja megawattitunteina. Lisäksi laskuri laskee kokopuun ja kannon keskitilavuuden työmaalla ja tekee arvion kannon keskiläpimitasta. Työmaa- ja puustotietojen syöttölomake on yhteinen kantojen, latvusmassan ja kokopuun korjuuketjuille, joten laskuria voi käyttää yhdellä kertaa joko harvennuspuuhakkeen kertymien ja korjuukustannusten laskentaan tai sillä voi laskea päätehakkuaaloilta korjattavien kantojen ja latvusmassan kertymät ja korjuukustannukset.

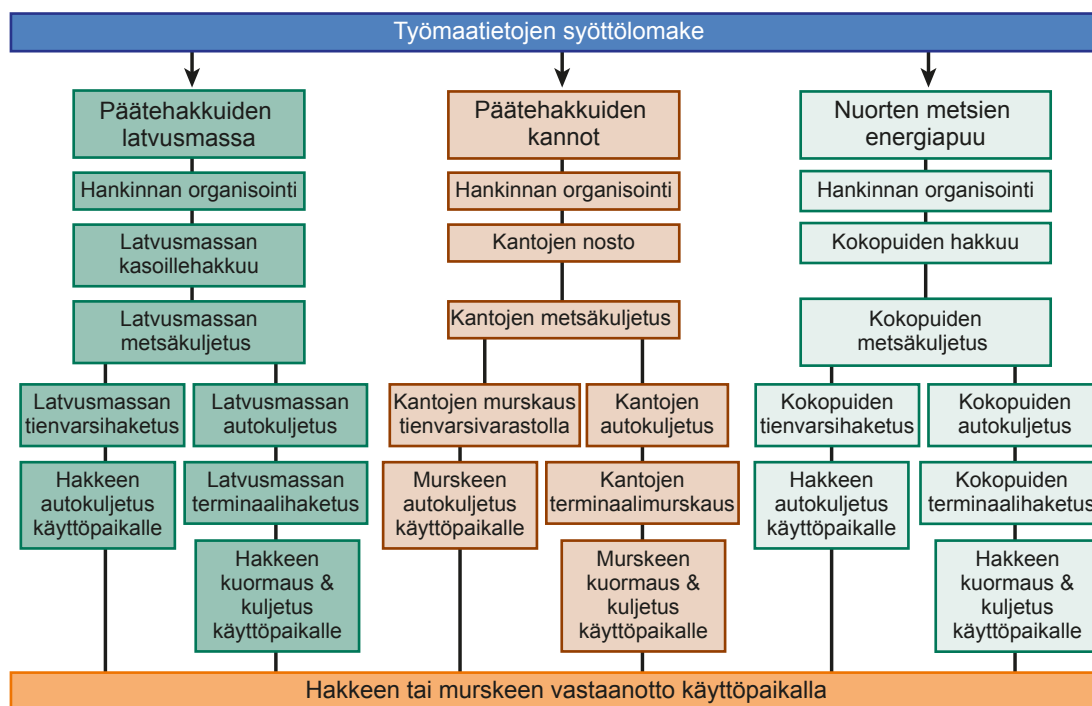
Luvussa 5.1 esiteltyä METKA-maastolaskuria voidaan käyttää puustotietojen keruuseen ja energiapuusuunnitelmien tekoon nuorten metsien energiapuuharvennuksilla. METKA-maastolaskurilla laskettuja puustotietoja voidaan käyttää myös syöttötietoina korjuukustannuslaskuriin. METKA-korjuukustannuslaskurilla voi muun muassa tehdä kannattavuusarvioita eri leimikkotyypeille ja määrittää leimikon valinnan korjuukelpoisuuskaavioita.

5.2.3 Laskentamallin korjuuketjut

Laskentamallissa latvusmassan ja kokopuiden haketus sekä kantojen murskaus tehdään joko tienvarsivarastolla tai terminaalisella (kuva 28). Latvusmassahakkeen tuotantoketjussa latvusmassan metsäkuljetus tehdään kasoillehakuun ja kuivattamisen jälkeen keskiraskaalla kuormatraktorilla (Asikainen ym. 2001). Kantomurskeen tuotantoketjussa kannot nostetaan kantoharalla varustetulla 21 tonnin kaivukoneella, jonka jälkeen kannot kuormataan ja kuljetetaan tienvarsivarastolle keskiraskaalla kuormatraktorilla (Laitila 2010). Nuorten metsien energiapuun korjuussa kokopuun hakkuu tehdään harvennusharvesterilla, jonka hakkuulaitteessa on syöttörullat ja joukkokäsittelyvarustus (Heikkilä ym. 2005). Kokopuiden metsäkuljetus palstalta tienvarsivarastolle tehdään puolestaan kevyellä kuormatraktorilla (Laitila ym. 2007 b).

Hakettamattoman puubiomassan autokuljetus tienvarsivarastolta terminaaliin tehdään umpilaidallisella puutavara-autolla ja valmis hake kuljetetaan tienvarsivarastolta tai terminaalista käyttöpaikalle perävaunullisella hakeautolla (kuva 28). Autokuljetuksessa kuljetusaikaan kuuluu tyhjänä ja kuormattuna ajoaika sekä terminaaliaika. Terminaaliaika sisältää kuormauksen, kuorman purkamisen sekä odotus- ja apuajat tienvarsivarastolla, terminaalisella tai käyttöpaikalla. Laskentamallissa autojen tyhjänä- ja kuormattuna ajon ajanmenekit lasketaan puutavaran autokuljetuksen ajanmenekkimalleilla (Kukko ym. 1990).

Laskentamallin korjuuketjutiedoissa on valmiina oletusarvoina muun muassa kunkin toimitusjärjestelmän organisaatiokustannukset, tienvarsivaraston peittämiskustannukset, energiapuun kantohinta sekä latvusmassalla kasoihin hakkuun kustannukset kiintokuutiometriä kohden. Muita valmiita oletusarvotietoja ovat koneiden tuntikustannustiedot, koneiden siirtokustannukset työmaalta toiselle, metsä- ja kaukokuljetuksen kuormakoko, kaukokuljetuksen kuormaus- ja pur-



Kuva 28. Laskentamallin korjuuketjut päätyövaiheineen ja laskentamallin toimintaperiaate.

kuajat, materiaalin murskaus- tai haketuskuormat sekä hakkeen tai murskeen käsittelykustannukset terminaalissa. Korjuuketjutiedoissa käyttäjä voi halutessaan antaa uudet arvot malliin oletusarvojen tilalle. Tämä sen vuoksi, että käytännössä koneiden ja toimitusjärjestelmien korjuukustannusten laskentaperusteita ja -tilanteita on yhtä paljon kuin on yrittäjiäkin. Laskentamallissa oletusarvoina on käytetty keskimääräisiä arvoja. Kaikki valmiit kustannusperusteet ovat kuitenkin joustavasti muunnettavissa kunkin laskentatilanteen mukaisiksi.

5.2.4 Johtopäätökset

Tässä raportoitu ja esitelty METKA-korjuukustannuslaskuri on tehty ennen kaikkea korjuukelpoisuuslaitosten laatimista ja korjuun yksikkökustannusten laskentaa varten. Korjuukustannuslaskentamallin avulla käyttäjä pystyy määrittämään metsähakkeen korjuukustannuksia erityyppisillä puustoilla ja kuljetusmatkoilla sekä vertaamaan laskentamallilla saatuja metsähakkeen korjuukustannuksia lämpö- tai voimalaitoksen hakkeesta maksamaan hintaan. METKA-korjuukustannuslaskuri on leimikon suunnittelun ja päätöksenteon apuväline ja korjuukustannusten laskenta perustuu pystyjuusta mitattuun ennakkotietoon. Aiemmissa Metsäntutkimuslaitoksessa laadituissa metsähakkeen korjuukustannuslaskureissa (Laitila 2006) latvusmassan ja kantojen kertymät laskettiin työmaan ainespuutietojen perusteella. Kokopuu- ja rankahakkeen korjuukustannuslaskureissa puustotietojen syöttö puolestaan perustui käyttäjän silmävaraisiin arvioihin hakkuupoistuman puuston keskipituudesta ja rinnankorkeusläpimitasta. Aiempiin laskuriversioihin verrattuna korjuumenetelmävaihtoehtoja on vähemmän (Laitila 2006), koska haluttiin keskittyä niihin perusmenetelmiin ja tuotantoketjuihin, joita metsänhoitoyhdistykset ja muut korjuuorganisaatiot valtaosin käyttävät omassa metsähakkeen hankinnassaan. Jos tarvitaan vertailuja eri korjuumenetelmistä, Metsäntutkimuslaitoksessa aiemmin laaditut metsähakkeen korjuukustannuslaskurit latvusmassa-, kanto-, kokopuu- ja rankahakkeen tuotantoketjuista ovat ladattavissa internetissä osoitteesta www.bioenergiatieto.fi.

6 Energiapuun kosteuden ennustaminen

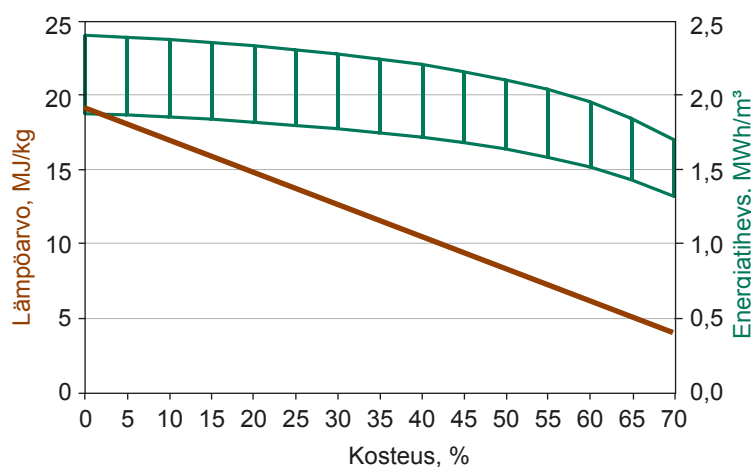
6.1 Johdanto

Puun kosteus on puun polttamisen hyötysuhteen kannalta olennainen asia. Kaatotuoreen puun kosteus on yleensä liian korkea puun tehokasta energiakäyttöä ajatellen (Hakkila 1989), minkä vuoksi kosteutta pyritään alentamaan energiapuun korjuun ja varastoinnin aikana. Pienten lämpölaitosten hakkeen kosteusprosentti ei saisi ylittää 40 prosenttia (Erkkilä ym. 2011), mutta suuremmat lämpölaitokset pystyvät käyttämään kosteampaakin polttoainetta.

Lämpöarvolla (MJ/kg) tarkoitetaan energiaa, joka saadaan polttamalla massayksikkö puuta. Osa energiasta kuluu puussa olevan veden höyrytämiseen. Puun tehollinen lämpöarvo on sitä alempi, mitä kosteampaa puu on, ja mitä suurempi osa lämpöenergiasta kuluu puussa olevan veden haihtuttamiseen (kuva 29).

Kosteudella on oleellinen merkitys energiapuuerästä saatavaan energiamäärään ja käyttöarvoon. Ajatellen energiapuun käyttöä kokonaisuudessaan, kosteudeltaan oikealaatuisten energiapuuerien toimittamisella ja käytöllä pystyttäisiin parantamaan koko energialiiketoiminnan kannattavuutta. Lähtökohtaisesti tämä edellyttää nykyistä parempia mahdollisuuksia tuottaa ennakoarvioita energiapuuvarastojen kosteudesta.

Puu on vettä imevä eli hygroskooppinen aine. Puu pystyy sitomaan vettä ympäröivästä ilmasta ja toisaalta luovuttaa ilmaan vettä. Puun kosteus muuttuu kohti lämpötilan ja kosteusolojen mukaisia tasapainokosteutta, jolloin haihtuvan ja sitoutuvan veden määrä on yhtä suuri. Koska luonnossa olosuhteet muuttuvat jatkuvasti, on myös puun kosteus jatkuvassa muutostilassa. Muutoksen nopeus ja suunta riippuvat paitsi olosuhteista, myös puussa vallitsevasta kosteustasosta (muun muassa Kärkkäinen 2007). Kosteuden vaihtelu kasvaa ja nopeutuu väliaineeseen kosketuksissa olevan pinta-alan kasvaessa. Energiapuutavaralajien läpimitat järeeä runkopuuta ja kantoja lukuun ottamatta ovat tyypillisesti pieniä, jolloin vettä sitova ja luovuttava pinta-ala on tilavuuteen nähden suuri.



Kuva 29. Puun tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) ja energiatiheys (MWh/m³) kosteuden suhteen. Energiatiheyden laskennassa kuivatuoretiheyden vaihteluväli oli 350–450 kg/m³.

Veden siirtymistä kuivattavan aineen pinnalta vesihöyrynä ilmaan kutsutaan haihtumiseksi, jonka määrää kuvataan suureella haihdunta (mm/vrk). *Potentiaalinen haihdunta* kuvaa täysin veden kyllästämästä pinnasta haihtuvan veden määrää. Potentiaalinen haihdunta siis määrittää haihdunnan suurimman arvon silloin, kun veden määrä ei rajoita haihtumista. Potentiaaliseen haihduntaan vaikuttavat muun muassa ilman lämpötila, suhteellinen kosteus, tuulisuus ja auringon säteily.

Käytännössä haihtumisen määrä aineesta, tässä tapauksessa puusta, on pienempi kuin potentiaalinen haihdunta. Suotuisissa haihduntaolosuhteissa kuivuminen alkaa puun pintaosista, mutta hidastuu pian, sillä vettä ei siirry puun sisäosista haihduttaville pinnoille yhtä nopeasti kuin sitä haihtuu.

Tutkimuksen tavoitteena oli

- a) tutkia varastointiajan ja varastointiajankohdan vaikutusta energiapuun kosteuteen eri energiapuutavaralajeilla,
- b) kehittää menetelmä säähavaintotietojen kohdentamiseksi energiapuubarastoon,
- c) tutkia varastointiajan sääolosuhdetekijöiden vaikutusta energiapuun kosteuteen sekä
- d) laatia ennustemallit eri energiapuutavaralajien kosteudelle.

6.2 Tutkimusaineistot ja menetelmät

Tutkimuksen energiapuuerien kosteusmittausaineisto koostui kahdesta eri alueella ja menetelmillä kerätystä aineistosta. **Hämeen kosteusmittausaineisto** koostui Metsänhoitoyhdistys Kanta- ja Päijät-Hämeen operoimista, vuosina 2006–2010 korjatuista varastoiduista ja käyttöpaikkaan toimitetuista energiapuueristä. Käyttöpaikassa otettiin kosteusnäytteet, joista määritettiin toimituserän kosteus. Energiapuuerien varastointiaika tienvarressa vaihteli paljon. Varastointiajan keskiarvo (yhteensä palstalla tai tienvarsivarastossa) oli harvennusenergiapuulla noin 11 kuukautta ja oksa- ja latvusmassalla 14 kuukautta. Molemmilla tavaralajeilla pisin varastointiaika oli yli kolme vuotta. Aineisto käsitti 152 harvennusmetsien energiapuun (jatkossa harvennusenergiapuu) toimituserää ja 408 oksa- ja latvusmassan toimituserää.

Keski-Suomen kosteusmittausaineisto koostui Metsäliitto Osuuskunnan keräämästä erityyppisten energiapuubarastojen kosteushavainnoista. Energiapuukohteet korjattiin huhtikuun lopun ja elokuun alun välisenä aikana vuonna 2010. Energiapuun tienvarsivarastoja purettiin määrävälein (2–4 viikkoa) touko- ja lokakuun välisenä aikana kuljettamalla kuormia lämpö- ja voimalaitoksen terminaaliin. Haketuksen tai murskauksen jälkeen määritettiin eräkohtainen kosteus. Määrävälein tehdyillä energiapuun toimituksilla ja kosteusmäärityksillä pystyttiin tarkastelemaan kosteuden muutosta kussakin varastointikasassa kesän aikana.

Kenttäkoeaineisto koostui neljästä tavaralajista. Näistä harvennusenergiapuu (karsittu ja karsimatonta) oli mäntyvaltaista tai koivuvaltaista sekapuuta. Oksa- ja latvusmassa ja kantopuu olivat kuusta. Varastokasoja oli yhteensä 25, joista harvennusenergiapuubarastoja oli 14 (karsittua ja karsimatonta), oksa- ja latvusmassavarastoja kuusi ja kantopuubarastoja viisi. Varastokasojen koko oli 30–105 m³. Koko aineistossa varastointiajan keskiarvo oli noin kaksi kuukautta. Pisin varastointiaika oli kaikilla tavaralajeilla noin neljä kuukautta.

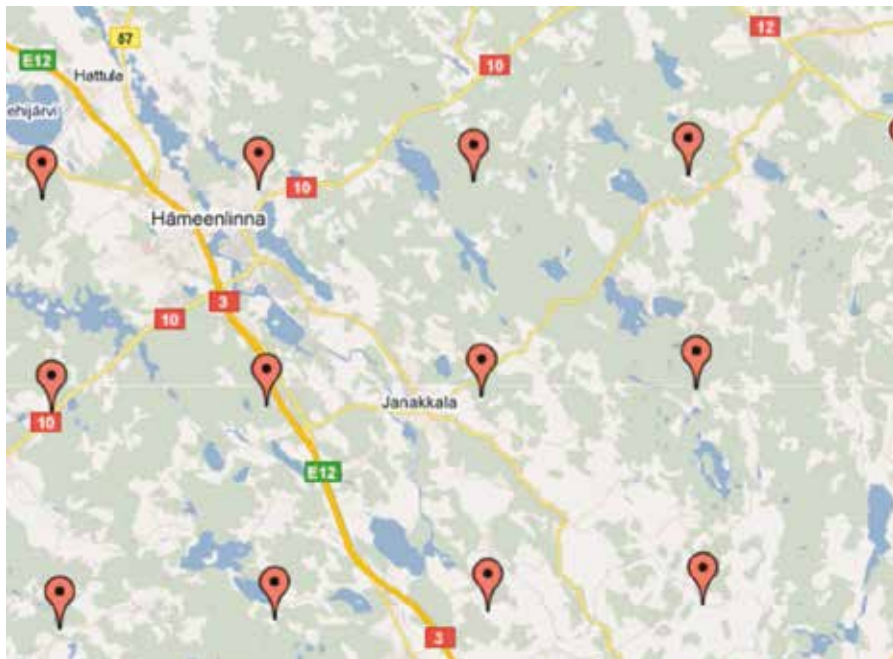
Molempiin energiapuun kosteusmittausaineistoihin liitettiin tiedot varastointiaikana vallinneista sääolosuhteista. Olosuhteiden määrittämisessä käytettiin Ilmatieteen laitoksen soveltavan tutki-

muksen tarpeisiin tuottamaa säähavaintoaineistoa. Aineisto sisältää päiväkohtaiset havainnot sademäärästä, lämpötilasta, auringon säteilystä ja vesihöyryn paineesta. Aineisto tuotetaan koko maan kattavasti siten, että interpoloidut säähavainnot saadaan 10x10 kilometrin ruudukossa sijaitseville säähavaintopisteille (kuva 30) (Venäläinen ym. 2005). Jokaiselle energiapuun toimittuserälle määritettiin varastointiajan sadesumma, lämpösumma, säteilysumma ja lumen vesiarvo varastoinnin päättymishetkellä sekä potentiaaliset haihduntasummat erilaisilla interseptiokapasiteeteilla.

Molemmille kosteusmittausaineistoille laadittiin tavaralajikohtaiset lineaariset tai epälineaariset mallit, joissa energiapuuerien kosteutta selitettiin varastointiajan sääolosuhteita kuvaavilla muuttujilla (kaavat 2-4). Epälineaaristen mallien yleiseksi muodoksi valittiin eksponenttifunktio, joka vastaa puulle tunnettua kuivumisilmiötä; kaatotuoreen puun kosteus alenee aluksi nopeasti, minkä jälkeen kuivuminen hidastuu ja tasaantuu lähestyen loppukosteutta.

6.3 Tulokset

Hämeen kosteusmittausaineiston harvennusenergiapuun ja oksa- ja latvusmassan kosteudelle sovitettiin sekä lineaariset että epälineaariset mallit. Harvennusenergiapuun epälineaarisisessa mallissa käytettiin selittävänä muuttujana potentiaalista haihduntasummaa kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 31). Selitysasteen parantamiseksi epälineaarisen mallin lisäselittäjänä käytettiin viimeisen kuukauden aikana sataneen lumen vesiarvoa haketushetkellä. Oksa- ja latvusmassan epälineaarisisessa mallissa käytettiin selittävänä muuttujana potentiaalista haihduntasummaa yhden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 32). Selitysasteen parantamiseksi epälineaarisen mallin selittäjiksi lisättiin viimeisen kuukauden lämpösumma, viimeisen kuukauden aikana satanut vesi ja viimeisen kuukauden aikana sataneen lumen vesiarvo. Mallien selitysasteet



Kuva 30. Säähavaintopisteet (Ilmatieteen laitos) Hämeenlinnan lähistöllä (Karttatiedot Tele Atlas 2011, Geo-centre Consulting).

olivat matalia. Kosteuden vaihtelusta pystyttiin eri tavaralajeilla ja malleilla selittämään ainoastaan 10–21 prosenttia.

Keski-Suomen aineistossa tehtiin kosteuden ennustemalli jokaiselle energiapuutavaralajille. Mäntyvaltaiselle harvennusenergiapuulle sovitettiin sekä lineaarinen että epälineaarinen malli, joissa selittäjänä käytettiin potentiaalista haihduntasummaa kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 33). Vastaava epälineaarinen malli tehtiin koivuvaltaiselle harvennusenergiapuulle. Oksaja latvusmassan kosteudelle tehtiin epälineaarinen malli, jossa selittäjänä käytettiin potentiaalista haihduntasummaa kahden millimetrin interseptiokapasiteetilla (kuva 34). Kantopuulle tehtiin vastaava malli käyttäen selittäjänä potentiaalista haihduntasummaa interseptiokapasiteetin ollessa nolla (kuva 35). Keski-Suomen aineiston kaikilla malleilla oli hyvät selitysasteet ja malli ennusti parhaiten kantojen kosteuden (kuva 35).

Lineaariset mallit ovat muotoa:

$$w = b_0 \times E_i + b_1 \quad (2)$$

Yhden selittäjän epälineaariset mallit ovat muotoa:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_i + 1)) + b_2 \quad (3)$$

Useamman selittäjän epälineaariset mallit ovat muotoa:

$$w = b_0 \times \exp(-b_1 \times (E_i + 1)) + b_2 + \sum(b_i \times I_i) \quad (4)$$

, joissa w = energiapuuvaraston kosteus, %

b_0, b_1, b_2 ja b_i = mallien parametreja

E_i = varastointiajan potentiaalinen haihduntasumma, kun varastoon pidättyy i mm päivittäisestä sademäärästä (interseptiokapasiteetti), mm

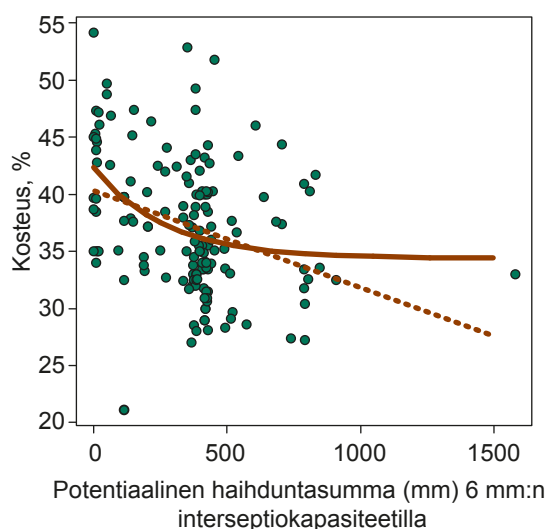
I_i = mallikohtaisia säämuuttujia

Yhden muuttujan epälineaarisen mallin parametrit b_0, b_1 ja b_2 kuvaavat energiapuun kuivumista. Parametri b_0 kuvaa varastointiaikana tapahtuvaa kosteuden kokonaismuutosta prosenttiyksiköissä. Parametri b_1 kuvaa nopeutta, jolla kosteus muuttuu selittävän muuttujan kasvaessa. Parametri b_2 kuvaa kosteustasoa, jolle tavaralajin kosteus asettuu, kun selittävä muuttuja kasvaa (loppukosteus). Parametreista b_0 ja b_2 summana saadaan laskennallinen tuoreen energiapuun kosteus.

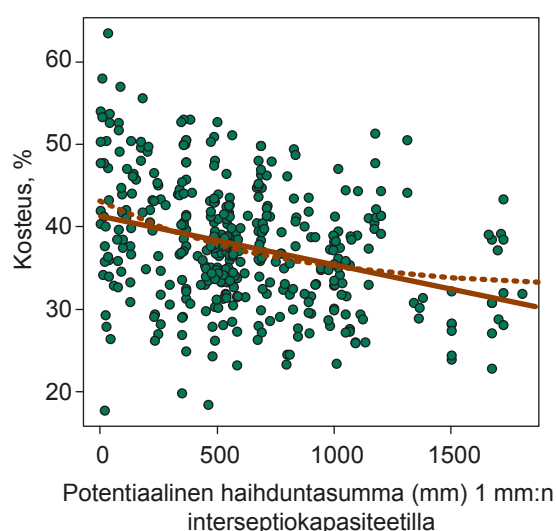
Malleilla laskettu energiapuun kosteus tuoreena oli Hämeen aineistossa 42–43 prosenttia. Kosteuden muutos tuoreesta loppukosteuteen oli kymmenen prosenttiyksikön luokkaa. Tulokset eivät vastaa aiemmissa tutkimuksissa ja käytännön energiapuun hankinnassa saatuja havaintoja energiapuun kosteuden lähtötasosta tai kosteuden kokonaismuutoksesta.

Keski-Suomen kosteusmittausaineistossa eri energiapuutavaralajien malleilla laskettu kosteus tuoreena oli kantopuulla noin 51 prosenttia, latvusmassalla noin 48 prosenttia, mäntyvaltaisella harvennusenergiapuulla noin 55 prosenttia ja koivuvaltaisella harvennusenergiapuulla noin 50 prosenttia. Eri energiapuutavaralajien kosteuden muutos varastointiaikana oli 24–32 prosenttiyksikköä. Männyh harvennusenergiapuurangat kuivuivat eniten ja kosteuden muutos oli yli 30 prosenttiyksikköä. Kantojen kosteuden muutos oli noin 29 prosenttiyksikköä ja koivuvaltaisten

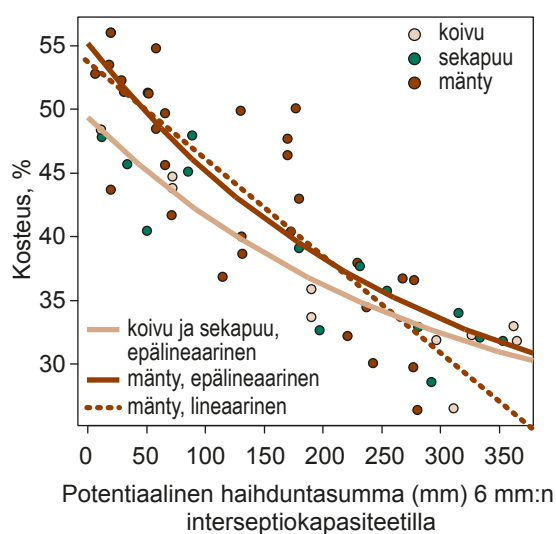
sekapuuran kokuksen noin 26 prosenttiyksikköä. Oksa- ja latvusmassa kuivui muita tavaramalajeja vähemmän; kosteuden muutos oli noin 24 prosenttiyksikköä. Energiapuutavaramalajien loppukosteus oli kantopuulla noin 23 prosenttia, latvusmassalla noin 24 prosenttia ja koivun harvennusenergiapuulla noin 24 prosenttia. Mäntyharvennusenergiapuuran kokuksen loppukosteus asetettiin muiden tavaramalajien perusteella 23 prosenttiin, koska malli ei estimoitunut vapaalla loppukosteudella.



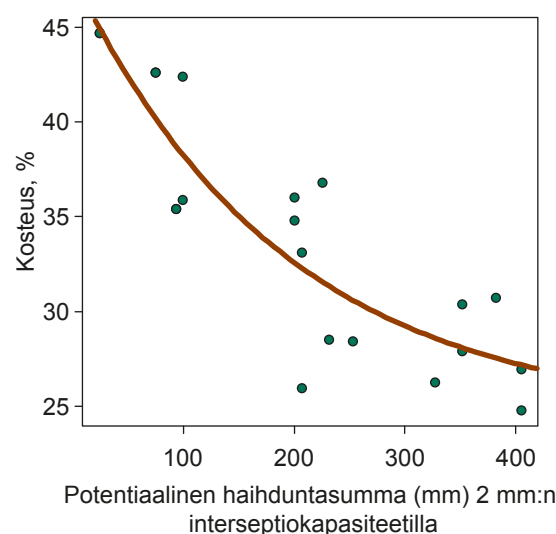
Kuva 31. Harvennusenergiapuun kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla Hämeen kosteusmittausaineistossa.



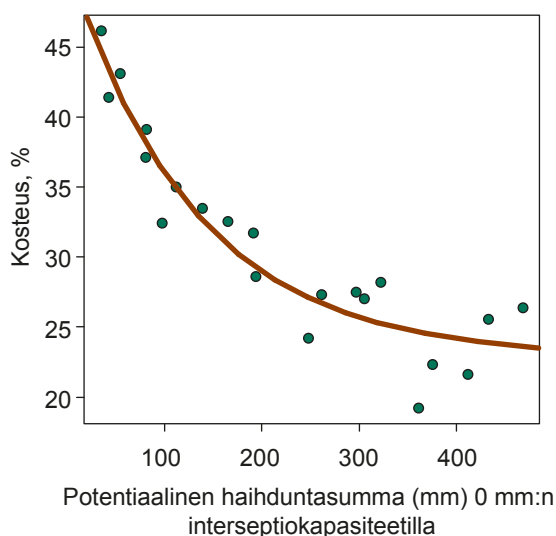
Kuva 32. Oksa- ja latvusmassan kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen yhden millimetrin interseptiokapasiteetilla Hämeen kosteusmittausaineistossa.



Kuva 33. Harvennusenergiapuun kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen kuuden millimetrin interseptiokapasiteetilla Keski-Suomen kosteusmittausaineistossa.



Kuva 34. Oksa- ja latvusmassan kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen kahden millimetrin interseptiokapasiteetilla Keski-Suomen kosteusmittausaineistossa.



Kuva 35. Kantopuun kosteus potentiaalisen haihduntasumman (mm) suhteen, kun varasto ei pidätä vettä (interseptiokapasiteetti on 0 mm) Keski-Suomen kosteusmittausaineistossa.

6.4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Harvennusenergiapuun Keski-Suomen aineistoon sovitetuilla kosteuden ennustemalleilla saadut laskennalliset kosteudet tuoreena vastasivat tasoltaan verraten hyvin aiemmissä tutkimuksissa koekellisistä aineistoista määritettyjä kosteuksia (esimerkiksi Hakkila 1962 ja 1964 sekä Hakkila ym. 1995). Hämeen aineistosta mallinnetut harvennusenergiapuun alkukosteudet olivat aiempien tutkimusten tuloksiin verrattuna matalia, eikä niitä voida pitää energiapuuerien todellisina tuorekosteuksina. Kyseisessä aineistossa varastointiajat olivat jopa vuosien pituisia, jolloin tuoreen energiapuun kosteuden määrittäminen oli selvästi mallien käyttöalueen ulkopuolella. Toisaalta myöskään harvennusenergiapuuvarastojen puulajia tai puulajisuhdetta ei tunnettu, jolloin vertailut aiempiin puulajikohtaisiin tutkimustuloksiin eivät olleet mahdollisia.

Pieniläpimittaisen harvennusenergiapuun on havaittu kuivuvan hyvissä oloissa 40 prosentin kosteuteen jopa 2–4 viikossa (Hakkila 1962). Hämeen aineistossa energiapuuvarastot eivät pitkistä varastointiajoista huolimatta kuivuneet paljoakaan. Tähän vaikutti se, että Hämeen aineistossa energiapuuta oli toimitettu ympäri vuoden, jolloin mukana oli talvisin hakkeen sekaan joutunutta lunta tai jäätä sekä syksyllä runsaiden sateiden ja kohonneen ilmankosteuden takia uudelleen kohonneita kosteushavaintoja. Keski-Suomen aineiston varastointiajat olivat lyhyemmät kuin Hämeen aineiston ja varastointi tapahtui kesäaikana, jolloin kuivumisolosuhteet olivat hyvät. Keski-Suomen kenttäkokeet tehtiin kesällä 2010, jolloin kuivumisolosuhteet olivat tavanomaista paremmat, mutta Hakkilan (1962) tutkimusta vastaaviin kuivumisnopeuksiin ei kuitenkaan päästy. Tässä tutkimuksessa Keski-Suomen aineiston koivut ja koivuvaltaiset sekapuut saavuttivat noin 40 prosentin kosteuden kahdessa kuukaudessa, mutta männyt kuivuivat hieman hitaammin. Koko kuivumisjakson aikana harvennusenergiapuu saavutti noin 30 prosentin kosteuden. Karsitun ja karsimattoman harvennusenergiapuun eroa kuivumisessa ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu Keski-Suomen aineiston pienen havaintomäärän vuoksi.

Keski-Suomen aineistoon sovitetuilla malleilla määritetty tuoreen latvusmassan kosteus (48 %) vastasi verraten hyvin aiempien tutkimusten tuloksia (esimerkiksi Kärkkäinen 1976, Verkasalo 1987, Ronkainen 2010). Latvusmassan kosteus muuttuu nopeasti vallitsevien olosuhteiden mukaan oksien pienten läpimittojen ja suuren lehti- ja neulaspinta-alan vuoksi. Lisäksi ilmankosteuden ja sateiden vaikutukset ovat suuren kuoriosuuden vuoksi merkittävämpiä kuin esimerkiksi kannoilla. Keski-Suomen aineistossa suurin osa oksa- ja latvusmassaeristä saavutti alle 30 %

kosteuden, mikä aiempien tutkimusten perusteella on saavutettavissa vain edullisissa olosuhteissa (esimerkiksi Thörnqvist 1985, Hakkila ym. 1998).

Keski-Suomen aineistoon kantopuulle sovitetulla mallilla määritetty tuoreen kantopuun kosteus vastasi hyvin aiemmissä tutkimuksissa saatuja tuloksia (Laurila ja Lauhanen 2010, Erkkilä ym. 2011). Kannot eroavat muista energiapuutavaralajeista suuren läpimitan, pienen kuoriprosentin ja massaansa nähden pienen pinta-alan suhteen, joten kuivuminenkin tapahtuu eri tavalla. Vettä haihduttavaa pintaa on vähän, mutta myös vettä imevää pintaa on vähän. Kantojen rakenne rikkoutuu kantojen noston ja siirtelyn yhteydessä, jolloin kuivuminen nopeutuu. Kuivumisen seurauksena rengashuokosten vedenläpäisykyky heikkenee (esimerkiksi Kärkkäinen 2007), minkä vuoksi kantopuun kosteus kohoaa vain vähän olosuhteiden muuttuessa kuivumiselle epäsuotuisiksi esimerkiksi syksyllä. Lisäksi havupuiden kuori muuttuu kuivuessaan huonosti vettä läpäiseväksi (Hakkila 1964), mikä aiheuttaa sen, että kerran kuivunut kanto ei helposti kastu uudelleen. Tässä tutkimuksessa kaikki ennen elokuun alkua korjatut kantopuuerät saavuttivat alle 30 prosentin kosteuden. Tulos vastaa muissa edellä mainituissa tutkimuksissa saatuja tuloksia kantopuun loppukosteudesta.

Hämeen kosteusmittausaineistoon liittyvien epävarmuuksien ja suuren hajonnan vuoksi tulokset ja johtopäätökset ovat vain suuntaa-antavia. Hämeen aineiston suuri vaihtelu johtui osittain erilaisista varastointiajoista, -paikoista ja olosuhteista sekä kosteusnäytteiden ottamisesta. Aineisto oli kerätty takautuvasti normaalissa energiapuun hankinnassa syntyvistä tiedoista, eikä tutkimuksen tarpeita siten voitu ottaa huomioon.

Keski-Suomen aineisto oli huolellisesti kerätty ja dokumentoitu. Aineiston keruu suunniteltiin tutkimuksen vaatimusten mukaisesti ja samat henkilöt tekivät näytteiden oton ja kosteusmääritykset. Näytteiden ottaminen tehtiin johdonmukaisella tavalla ja normaaleihin käytäntöihin nähden tarkennetuilla menetelmillä. Näytteenotosta johtuva kosteuden vaihtelu aineistossa oli oletettavasti pientä. Keski-Suomen aineistosta lasketut tulokset olivat johdonmukaisia ja sinänsä lupaavia. Pieni havaintomäärä, lyhyet varastointiajat, poikkeuksellisen lämmin kesä ja kevään, syksyn ja talven puuttuminen varastointiajoista tekevät kuitenkin tuloksista heikosti yleistettäviä.

Vertailukohtia energiapuun kosteuden mallinnukseen löytyy vain vähän. Erkkilän ym. (2011) tutkimuksessa on säätietojen avulla laadittu kosteusmalli, jossa ennustetaan kantojen kuivumista palsta- ja varastokasoissa. Molemmista malleista otetaan huomioon lähtökosteus, haihduntasumma ja sadesumma.

Yhteenvedon voidaan sanoa, että energiapuun kosteuden mallintaminen varastointiajan ja -paikan sääolosuhteiden avulla vaikuttaa lupaavalta. Sääolosuhteisiin perustuvalla kosteuden ennustamisella on saavutettavissa huomattavasti parempi tarkkuus kuin nykyisin eri yhteyksissä käytettävillä, lähinnä pitkäaikaisiin säähavaintoihin tai energiapuun kosteudesta eri vuodenaikoina saatuihin havaintoihin perustuvalla arvioinnilla. Toteutuneisiin sääolosuhteisiin perustuvalla kosteuden arvioinnilla pystyttäisiin ottamaan huomioon kuivumisolosuhteiden paikalliset vaihtelut ja myös vuosien väliset erot. Toteutukseen tarvitaan tutkimuksia, jossa on riittävässä laajuudessa otettu huomioon puu- ja tavaralajit ja niiden ominaisuuksien vaihtelut, varastopaikan olosuhteiden vaikutukset, varastomuodostelmien koon vaikutukset ja sääolosuhteiden riittävä vaihtelu.

Tämä tutkimus on tarkemmin raportoitu julkaisussa:

Jahkonen, M., Lindblad, J., Sirkiä, S. & Lauren, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja 241. 35 s.

7 Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantopuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

7.1 Johdanto

Kannoista ja juurakoista muodostuvan kantopuun energiakäyttö on ollut kasvussa viimeisen vuosikymmenen ajan. Vuonna 2011 kantopuuta käytettiin energiaksi hieman vajaa miljoona kuutiometriä (Ylitalo 2012).

Kantopuun korjuu on keskittynyt kuusen päätehakkuualoille, mutta viime aikoina myös männyn kantojen korjuu ja käyttö on lisääntynyt. Käytössä olevat kannonnoston valtamenetelmät perustuvat tela-alustaisen kaivukoneen kauhan tilalle asennettuihin laitteisiin, jotka voidaan jakaa kahteen tyyppiin: hydraulisella halkaisuterällä varustettuihin nosto-paloittelulaitteisiin eli kantoharvestereihin ja kantoharoihin ilman kantopaloja leikkaavaa ominaisuutta. Näiden lisäksi markkinoille on tullut yksiotekantoharvesteri, jolla kanto voidaan nostaa, paloittaa ja puhdistaa yhdessä työvaiheessa kantoa välillä maahan laskematta.

Kantomurskeen seassa polttokattilaan kulkeutuvat epäpuhtaudet, lähinnä maa-aines, on poltto-tekniinen ongelma, joka voi pahimmillaan pysäyttää suuren lämpö- ja voimalaitoksen toiminnan. Kannonhankinnan logistiikassa puhdistumiseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä käyttöpaikalle kulkeutuvien epäpuhtauksien määrään ei tunneta, vaikka käytännössä epäpuhtauksien määrän hallinnassa korostetaan kannonnostotyön yhteydessä tehtävän puhdistuksen merkitystä. Myös metsä- ja kaukokuljetuksen, kuormauksen ja purkamisen aikana tapahtuu puhdistumista. Lisäksi palstalla kuivauksen ja ennen murskausta tehtävän 1–2 vuoden pituisen tienvarsivarastoinnin aikana kantopalat altistuvat monenlaisille kantopaloja puhdistaville sääolosuhteille, kuten lämpötilan vaihteluille, sateille ja tuulelle.

Epäpuhtaudet nostavat tuhkapitoisuutta ja laskevat polttoaineen lämpöarvoa. Lämpöarvo on puun energiakäytön kannalta olennainen ominaisuus. Lämpöarvolla tarkoitetaan energiaa, joka saadaan polttamalla massayksikkö puuta (Kärkkäinen 2007). Tehollinen lämpöarvo kertoo vapautuvan lämpöenergian määrän, kun puussa oleva vesi on ensin haihdutettu. Kosteuden lisäksi lämpöarvoon vaikuttavat kemiallinen koostumus, tiheys ja tuhkapitoisuus (Hakkila ym. 1998). Lämpöarvon aleneminen ja tuhkapitoisuuden lisääntyminen siis ilmaisevat epäpuhtauksien määrän lisääntymistä kantopuussa. Lämpöarvolla ja tuhkapitoisuudella ei kuitenkaan suoraan ole käänteistä riippuvuutta. Uuteaineet, muun muassa pihka, kohottavat lämpöarvon lisäksi myös tuhkapitoisuutta (Hakkila & Parikka 2002).

Tutkimusta tarvitaan määrittämään, mikä on kantopaloja puhdistavien tekijöiden merkitys ja niiden lopullinen vaikutus käyttöpaikalla. Tutkimustulosten mukaan paloitteluun ja puhdistamiseen käytetyn ajanmenekin vaihtelu on suurta. Paloittelun ja puhdistuksen osuus kannonnostoon käytetystä ajasta voi olla vain muutamasta prosentista jopa 40–50 prosenttiin (Laitila ym. 2007 a, Kärhä ym. 2009, Jouhioho ym. 2010, Jouhioho ja Mutikainen 2010). Nykyistä parempi tietämys siitä, miten kannonnoston puhdistamiseen käytetty ajankäyttö vaikuttaa kantopalojen puhtaustasoon käyttöpaikalla, edesauttaisi toimenpiteiden mitoittamista kustannustehokkaasti. Kantojen noston paloittelu- ja puhdistustyön rationalisoinnissa saattaa olla mahdollisuus merkittäviinkin kustannussäästöihin.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli

- a) verrata epäpuhtauksien määrää eri kannonnostomenetelmillä (kantohara ja kantoharvesteri),
- b) tutkia puhdistukseen käytetyn ajan vaikutusta epäpuhtauksien määrään,
- c) tutkia epäpuhtauksien vaikutusta kantopuun lämpöarvoon.

7.2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksessa hyödynnettiin Työtehoseuran koneellisen kannonnoston kustannustehokkuutta käsitelleen työntutkimuksen kenttäkokeita (Jouhiaho ym. 2010). Kannonnosto oli tehty kahdella tutkimuskohteella noin vuosi päätehakkuun jälkeen. Janakkalassa sijainneella kivisellä tutkimuskohteella kannot nostettiin lokakuussa 2008 ja Kalvolassa sijainneella vähäkivisellä tutkimuskohteella elokuussa 2009.

Molemmilla tutkimuskohteilla kantojen korjuussa käytettiin kantoharaa ja kantoharvesteria. Kantoharassa oli rivissä neljä hankomaista piikkiä ja yksi piikkiriviin nähden kohtisuorassa kulmassa sijaitseva kannon halkaisupiikki, jolla suuriläpimittaisia kantoja voitiin pilkkoa pienempään kokoon nostotyön helpottamiseksi. Kantoharvesterilla kannot voitiin halkaista laitteen kahdella hydraulisella sylinterillä liikuteltavalla halkaisuterällä ja nostaa maasta paloina.

Kantojen nosto tehtiin molemmilla korjuumenetelmillä tutkimuskohteille vierekkäin sijoitetuilla koealaruuduilla. Koealaruudut olivat 25 metrin pituisia ja niiden leveys määräytyi koneen ulottuman mukaan. Molemmilla korjuumenetelmillä korjattiin kantoja kivisellä tutkimuskohteella 14 koealaruudulta ja vähäkivisellä tutkimuskohteella 17 koealaruudulta.

Kantopuusta kasattiin molemmille tutkimuskohteille noin 200 kannon suuruiset varastokasat kannonnostomenetelmittain. Lokakuussa 2010 työmaa- ja kannonnostomenetelmäkohtaiset kantopuuerät kuljetettiin terminaaliin, jossa kannot murskattiin kantopuuerittäin. Jokaisesta kantopuuerästä otettiin 15 noin kymmenen litran kokoista kantomurskenäytettä. Näistä seitsemän kantomurskenäytettä kerättiin eri puolilta kantomurskekasaa noin kahden metrin korkeudelta 20–30 senttimetrin syvyydeltä. Tämän jälkeen murskekasaa aukaistiin kauhakuormaajalla kasan vastakaisilta puolilta ja kummaltakin puolelta otettiin neljä näytettä murskekasaa sisäosasta.

Laboratoriossa jokaisesta näytteestä otettiin kaksi osanäytettä, joista toisesta määritettiin palakojakauma. Seulojen reikäkoot olivat 63; 45; 31,5; 16; 8; 3,15 mm ja pohja-astia. Tuhkapitoisuus, kosteusprosentti ja lämpöarvo määritettiin jokaisesta 15 seulomattomasta ja neljästä seulotusta näytteestä kantoerää. Palakojakauman, tuhkapitoisuuden, lämpöarvon ja kosteuden määritykset tehtiin SFS-EN -standardien tai näiden esistandardien (SFS-CEN) mukaisesti (SFS-EN 15149, SFS-EN 14775, SFS-EN 14918, CEN/TS 14774).

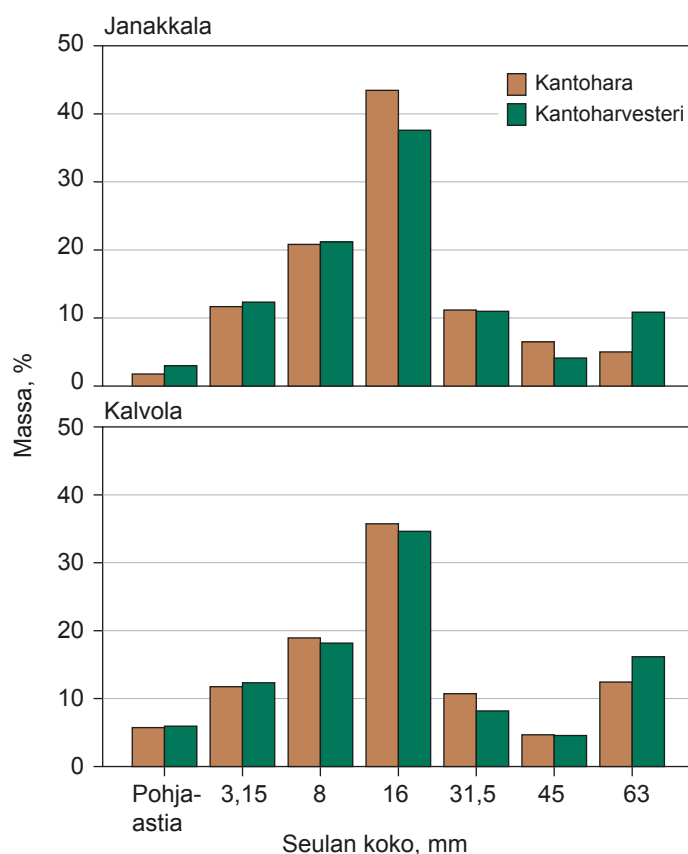
Syksyllä 2011 molemmilta kohteilta otettiin määrävälein viisi maanäytettä, joista määritettiin kohteen maaperän raakoostumus laserdiffraktiolla. Raakoostumuksen perusteella molempien kohteiden maalajiksi määritettiin hiekkamoreeni.

7.3 Tulokset

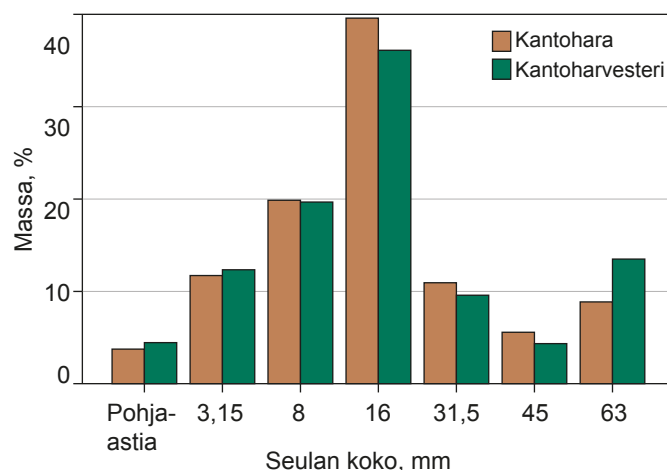
7.3.1 Kantomurskeen palakokojakaumat

Kantomurskeella keskikokoisten (16 mm) jakeiden suhteellinen kuivamassaosuus oli hieman yli kolmanneksen molemmilla tutkimuskohteilla ja kannonnostomenetelmillä (kuva 36). Suuret (>31,5 mm) jakeet ja pienet jakeet (<16 mm) muodostivat kumpikin suuruusluokaltaan noin kolmanneksen palakokojakaumasta. Kalvolassa pohja-astiaan kertyvän pienen jakeen osuus oli suurempi kuin Janakkalassa.

Kuvassa 37 on esitetty molempien kannonnostopaikkojen yhdistetyt palakokojakaumat kannonnostomenetelmittain. Keskikokoisia ja suurehkoja (16–63 mm) jakeita oli enemmän kantoharalla kuin kantoharvesterilla nostettujen kantojen murskeessa. Suurilla yli 63 millimetrin jakeilla kannonnostomenetelmien ero oli päinvastainen.



Kuva 36. Kantomurskeen palakokojakaumat tutkimuskohteittain.

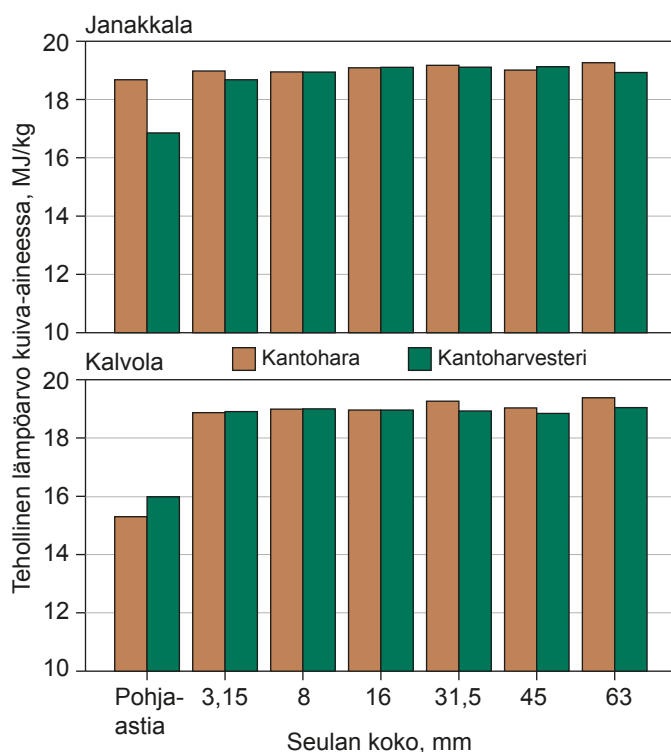


Kuva 37. Palakokojakaumat kannonnostomenetelmittain.

7.3.2 Lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

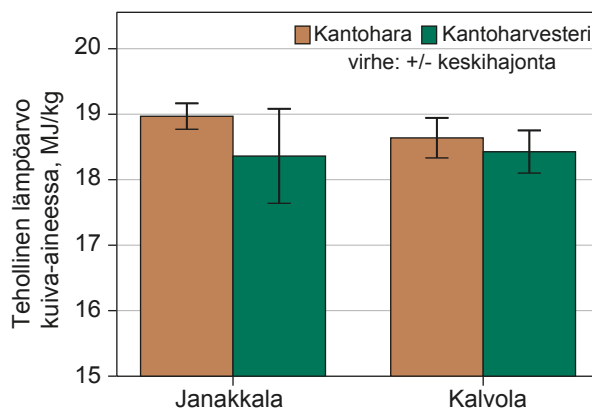
Palakooltaan erikokoisten jakeiden tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (kuva 38) oli 15,3–19,4 MJ/kg. Ainoastaan pienimmän jakeen (pohja-astia) lämpöarvo oli muita alempi; suuremmissa jakeissa lämpöarvon vaihtelu oli hyvin vähäistä.

Janakkalassa tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli kantoharalla keskimäärin 19,0 MJ/kg ja kantoharvesterilla 18,4 MJ/kg ja ero menetelmien välillä oli tilastollisesti erittäin merkitsevä ($p < 0,001$) (kuva 37). Kalvolassa vastaavat arvot olivat 18,6 MJ/kg ja 18,4 MJ/kg. Kantoharvesterilla nostettujen kantojen lämpöarvo oli molemmista paikoista kerätyissä aineistoissa alempi kuin kantoharalla nostettujen kantojen lämpöarvo (kuva 39).

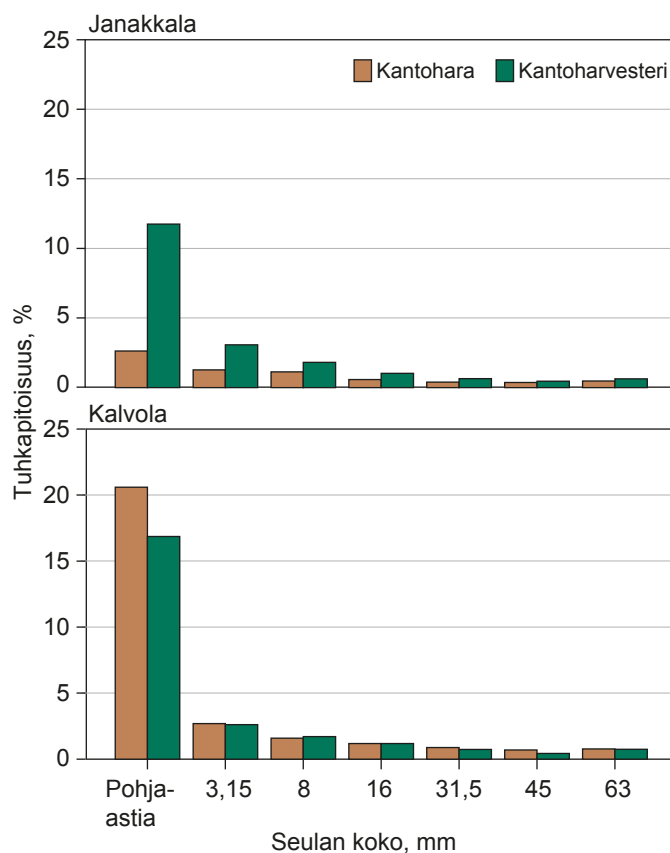


Kuva 38. Seulottujen näytteiden tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg) tutkimuskohteittain.

Seulottujen näytteiden tuhkapitoisuus eri jakeilla oli 0,4–20,6 prosenttia ja se laski huomattavasti palakoon kasvaessa (kuva 40). Pohja-astian tuhkapitoisuus oli selvästi muita ositteita suurempi. Kalvolan tutkimuskohteella palakooltaan pienimmän ositteen tuhkapitoisuus oli korkeampi kuin Janakkalan tutkimuskohteella. Kantoharvesterilla korjatun kantoapuun tuhkapitoisuus Janakkalan tutkimuskohteella oli kaikilla palakokojakeilla samalla tasolla tai korkeampi kuin kantoaharalla korjatun. Ero oli suurin pienimmällä palakoon ositteella, jossa tuhkapitoisuus oli kantoaharalla noin 12 prosenttia ja kantoaharalla noin kolme prosenttia.



Kuva 39. Seulomattomien kantomurskenäytteiden tehollisen lämpöarvon keskiarvo ja keskihajonta kannonnostomenetelmittäin ja tutkimuskohteittain.



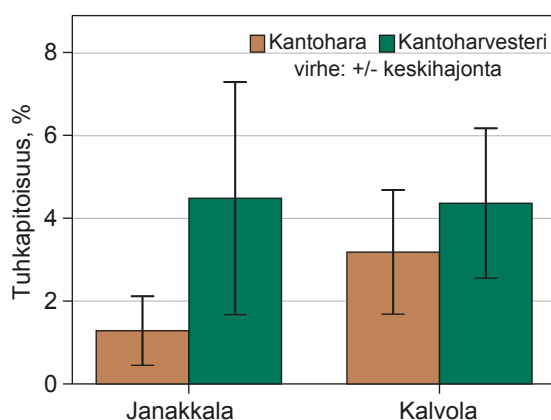
Kuva 40. Seulottujen kantomurskenäytteiden tuhkapitoisuudet kannonnostomenetelmän ja tutkimuskohteen mukaan.

Seulomattomilla näytteillä kannonnostomenetelmien tuhkapitoisuudet erosivat molemmilla tutkimuskohteilla. Janakkalassa kantoharalla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli noin 1,3 prosenttia ja kantoharvesterilla nostettujen noin 4,5 prosenttia. Ero oli tilastollisesti merkitsevä ($p < 0,001$). Kalvolassa ero menetelmien välillä oli pienempi; kantoharalla nostettujen kantojen tuhkapitoisuuden keskiarvo oli 3,2 prosenttia ja kantoharvesterilla nostettujen kantojen 4,4 prosenttia. Kantoharvesterilla tuhkapitoisuus oli lähes sama molemmissa tutkimuskohteilla, kun kantoharalla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli Kalvolassa yli kaksinkertainen Janakkalan tuhkapitoisuuteen nähden (kuva 41). Kantoharalla nostettujen kantojen tuhkapitoisuuden erot kannonnostopaikkojen välillä olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($p < 0,001$).

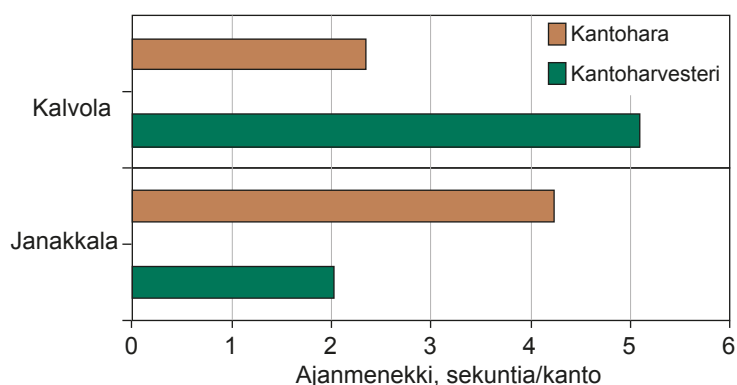
7.3.3 Puhdistukseen käytetyn ajan vaikutus epäpuhtauksiin

Janakkalan kivisellä tutkimuskohteella kantoharvesterilla ei tehty kantopalojen ravistelua käytännössä lainkaan, vaan kannot ainoastaan paloitiin. Tällä kantopuuerällä nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli suurin (4,5 %) (kuva 41). Samalla tutkimuskohteella kantohara käytti puhdistukseen kaksinkertaisen ajan (kuva 42) ja vastaavasti tuhkapitoisuus on huomattavasti alempi (1,3 %). Myös tehollinen lämpöarvo (kuva 39) Janakkalassa erosi kannonnostomenetelmien välillä tilastollisesti merkitsevästi.

Kalvolassa, eli vähäkivisellä tutkimuskohteella, kantoharvesteri käytti puhdistukseen kaksinkertaisen ajan kantoharaan nähden (kuva 42). Kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus (kuva 41) oli silti korkeampi kuin kantoharalla nostettujen. Tehollinen lämpöarvo oli kantoharvesterilla korjatuilla kannoilla alempi kuin kantoharvesterilla nostetuilla (kuva 39).



Kuva 41. Seulomattomien kantomurskenäytteiden tuhkapitoisuuden keskiarvo ja keskihajonta kannonnostomenetelmittäin ja tutkimuskohteittain.



Kuva 42. Kantoharan ja kantoharvesterin kantokohtainen paloittelemisen ja puhdistuksen ajanmenekki tutkimuskohteittain (Työtehoseura).

7.4 Tulosten tarkastelu

Tässä tapaustutkimuksessa selvitettiin kannonnostomenetelmän vaikutusta kantopuun epäpuhtauksien määrään. Tutkimusmenetelmä perustui kantomurskenäytteiden palakokojakauman, tehollisen lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden määrittämiseen. Tässä tutkimuksessa kantopuun tehollinen lämpöarvon kuiva-aineessa oli keskimäärin 18,7 MJ/kg, joten tulokset vastasivat suuruusluokaltaan aiempien tutkimusten tuloksia (mm. Laurila & Lauhanen 2010 ja Anerud & Jirjis 2011).

Palakooltaan pienimpien ositteiden (< 3,15 mm) tehollinen lämpöarvo oli alempi ja tuhkapitoisuus suurempi kuin muiden ositteiden. Tämä ilmentää raekooltaan pienten epäpuhtauksien kertymistä tähän ositteeseen. Koska palakooltaan pienimmän jakeen kuivamassaosuus oli pieni, epäpuhtauksien suuremman määrän merkitys koko kantoerän ominaisuuksia ajatellen oli hyvin vähäinen.

Anerudin ja Jirjoksen (2011) tutkimuksessa varastoinnilla tai kannonnostomenetelmällä ei ollut tilastollisesti merkittävää vaikutusta lämpöarvoon. Sen sijaan eri menetelmillä nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli eronnut merkittävästi jokaisella tutkimuskohteella. Anerudin ja Jirjoksen tutkimuksessa (2011) tuhkapitoisuus oli alentunut selvästi varastoinnin aikana ollen alussa 1,4–7 % ja reilun vuoden varastoinnin päätyttyä kaikilla menetelmillä nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli laskenut alle prosentin. Erkkilän ym. (2011) mukaan pilkottujen kuusen kantojen tuhkapitoisuus viikko noston jälkeen oli ollut 1,1–4,2 %. Tässä tutkimuksessa kantopuuerien tuhkapitoisuudet olivat varastointiajan jälkeen hieman korkeampia (3,2–4,5 %).

Kantoharvesterilla korjatun kantopuun epäpuhtauksien määrää ilmentävä tuhkapitoisuus oli korkeampi ja tehollinen lämpöarvo hieman alempi kuin kantoharalla korjatun. Tehollisten lämpöarvojen ero kannonnostomenetelmien välillä oli johdonmukainen tuhkapitoisuuksiin nähden. Erojen voidaan arvioida johtuvan paitsi kannonnostomenetelmästä myös toteutetusta työtavasta. Janakkalan kivisellä tutkimuskohteella kantoharvesterilla ei tehty kantopalojen ravistelua käytännössä lainkaan, mikä selittää suurempaa epäpuhtauksien määrää. Samalla tutkimuskohteella kantoharalla käytettiin puhdistukseen kaksinkertainen aika ja vastaavasti tuhkapitoisuus oli huomattavasti alempi. Sen sijaan Kalvolassa, eli vähäkivisellä kohteella, kantoharvesteri käytti puhdistukseen kaksinkertaisen ajan kantoharaan nähden, mutta kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli silti korkeampi kuin kantoharalla nostettujen kantojen.

Maalaji ei selitä tässä tutkimuksessa havaittuja eroja, koska molemmissa kannonnostokohteissa maalaji oli hiekkamoreeni. Kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli Janakkalassa ja Kalvolassa yhtä suuri, vaikka Janakkalassa harvesteri ei tehnyt puhdistusta käytännössä lainkaan ja Kalvolassa harvesteri käytti puhdistukseen kaksinkertaisen ajan haran käyttämään aikaan verrattuna. Yksi mahdollinen selitys tulokselle on se, että altistuminen sääolosuhteiden puhdistavalle vaikutukselle lähes vuoden pidempään kompensoi tässä tapauksessa kannonnoston yhteydessä tehdyn kantopalojen ravistelun. Tämän tutkimuksen aineisto oli kuitenkin verraten pieni, joten päätelmät kannonnostomenetelmän vaikutuksesta epäpuhtauksien määrään on tehtävä varauksin.

Tämä tutkimus on tarkemmin raportoitu julkaisussa:

Jahkonen, M., Jouhiaho, A., Lindblad, J., Rieppo, K. & Mutikainen, A. 2012. Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantopuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus. Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja 239. 20 s.

8 Hakkuukoneen ja kuormainvaa'an käyttöön perustuva paino-otantamittaus

8.1 Johdanto

Nuorista metsistä korjattavalle harvennusenergiapuulle on käytettävissä rajallinen määrä mittausmenetelmiä. Pitkät varastointiajat ennen käyttöpaikkaan kuljettamista johtavat siihen, että luovutusmittaus metsänomistajalle ja toisaalta työmittaukset pyritään tekemään metsässä korjuun aikana. Puutavaran mittauksen valtamenetelmänä käytettävä hakkuukonemittaus ei sovellu harvennusenergiapuun mittaukseen silloin, kun korjattavan tavaralajin minimiläpimitta on pieni tai harvennusenergiapuuta ei karsita. Harvennuspuun korjuun tuottavuutta pyritään parantamaan käyttämällä hakkuukoneissa joukkokäsittelytekniikkaa. Joukkokäsittelyhakkuussa voidaan korjata useampaa tavaralajia, aines- ja energiapuuta, jolloin menetelmästä käytetään myös nimitystä integroitu korjuu tai yhdistelmäkorjuu. Joukkokäsittelyhakkuussa hakkuukonemittauksen käyttö ei ole toistaiseksi teknisesti mahdollista. Käytännössä joukkokäsittelyhakkuussa prosessoidaan osa rungoista myös kappaleittain, jolloin hakkuukoneen mittauslaite toimii normaalisti ja tuottaa näille rungoille mittaustuloksen.

Korjuuseen hyvin nivoutuvaa mittausmenetelmää on pidetty yhtenä joukkokäsittelytekniikan ja yhdistelmäkorjuun käytön edellytyksistä. Metsätraktoreiden kuormainvaa'at ovat yleistyneet pitkälti harvennusenergiapuun ja ylipäättään energiapuun mittaustarpeen vuoksi. Harvennusmetsistä korjattava puutavara pystytään punnitsemaan kuormainvaa'alla tavaralajikohtaisesti metsäkuljetuksen aikana. Useimmiten puutavaran luovutusta varten mittaustulos tarvitaan tilavuutena, jolloin tavaralajien kuormainvaa'alla punnitut painot on muunnettava tilavuudeksi muuntoluvulla. Muuntolukuna käytetään tukki- ja kuitupuulla maa- ja metsätalousministeriön vahvistamassa kuormainvaakamittauksen menetelmäohjeessa esitettyjä tuoretiheyslukuja (maa- ja metsätalousministeriö 2008 ja 2010). Energiapuulla vastaavat tuoretiheysluvut on esitetty Energiapuun mittaussopissa (Lindblad ym. 2010).

Tuoretiheyslukuille on ominaista, että ne keskiarvoistavat puutavaran ominaisuuksia. Tuoretiheyslukujen taso vastaa puutavaralajin keskimääräisiä ominaisuuksia, suuralueiden keskimääräisiä olosuhteita ja puutavaralajille tyypillistä korjuu- ja hankintaketjua. Tuoretiheyslukuissa ei voida ottaa huomioon paikallisia tai vuosien välisiä olosuhde-eroja tai vastaavia puutavaraerien eroja puutavaralajeissa ja korjuussa. Tuoretiheyslukujen käytön luotettavuus siis paranee pitkällä ajalla suuria puumääriä mitattaessa. Sen sijaan yksittäisissä mittauksissa luotettavuus on heikompi.

Aines- ja energiapuun tarjonta- ja kysyntävaihtelusta johtuen energiapuun korjuu kohdistuu myös tyypillisiin ensiharvennus- ja harvennusmetsiin. Tämän seurauksena energiakäyttöön menee yhä enemmän raaka-ainetta, joka mitoitetaan ja laadultaan vastaa tyypillistä ainespuuta. Ainespuun ja harvennusmetsien energiapuun mittavaatimusten mukainen raja on siten hämärtynyt. Käytännössä tämä vaikeuttaa yleisten tuoretiheyslukujen käyttöä. Puutavaralajin ominaisuuksien tai korjuumenetelmän mukaisia tuoretiheyslukuja ei aina ole käytettävissä.

Nykyiset kuormainvaakamittauksen menetelmäohjeet mahdollistavat sen, että mittausosapuolet voivat otantamittauksilla määrittää mittauserän painon ja tilavuuden välisessä muunnossa käytettävän tuoretiheysluvun. Käytännössä tämän menettelyn käyttö on ollut vähäistä työläytensä vuoksi. Lisäksi energiapuulla otantaerien mittaukset eivät useissa tapauksissa ole teknisesti mahdollisia.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin otantaan perustuvan mittausmenetelmän käyttö- ja kehittämismahdollisuuksia nuorten metsien korjuukohteilla silloin, kun hakkuussa käytetään mittauslaitteella varustettua hakkuukonetta ja metsäkuljetuksessa kuormainvaa'alla varustettua metsätraktoria. Menetelmä mahdollistaisi mittauseräkohtaisen puutavaralajien tuoretiheysluvun määrittämisen.

8.2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksen koekorjuukohteet olivat normaaleja nuorten metsien korjuukohteita. Korjuukohteet on tarkemmin esitelty luvussa 4. Sekä ennen että jälkeen koehakkuiden tehtiin puuston pystymittaus (luku 4).

Korjuukohteilla tehtiin yhdistelmäkorjuu, jossa käytettiin joukkokäsittelytekniikkaa. Runkojen tyviosien pölkyt karsittiin ja katkottiin. Latvaosat hakattiin karsimatta energiapuuksi. Hakkuun yhteydessä tehdyssä kokeessa hakattiin rungoittain karsitusta ja katkotusta puutavarasta koostuvia palstakasoja, niin sanottuja otantanippuja. Otantaniput olivat puulajipuhtaita mänty-, kuusi-, koivu-, haapa- ja leppänippuja. Hakkuukoneen mittauslaitteella mitattiin pölkkukohtaiset tilavuudet, joista edelleen saatiin otantanippujen tilavuudet. Otantaniput merkittiin ja numeroitiin maastoon (kuva 43). Metsäkuljetuksessa otantaniput punnittiin kuormainvaa'alla. Edelleen kuormien painot punnittiin tienvarressa purettaessa. Otantanippujen lukumäärät puulajeittain ja metsikkökuvioittain on esitetty taulukossa 3.



Kuvat 43 a ja b. Korjuukohteet hakattiin joukkokäsittelytekniikalla. Otantaniput numeroitiin ja merkittiin maastoon. Kuvat: Jari Lindblad.

Taulukko 3. Otantanippujen lukumäärä metsikkökuvioittain ja puulajeittain.

Metsikkökuvio	Puulaji					Yhteensä
	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa	Leppä	
1	11	2	7	0	0	20
2	0	8	12	0	0	20
3	0	3	13	1	3	20
4	19	0	1	0	0	20
5	0	6	14	0	0	20
6	6	4	5	2	3	20
7	0	0	1	0	7	8
8	0	4	1	2	13	20
Yhteensä	36	27	54	5	26	148

Otannalla määritetyn tuoretiheysluvun tarkkuus määritettiin kaavalla 5. Tarkkuudella tarkoitetaan tässä laajennettua mittausepävarmuutta, joka on arvio mittausvirheestä. Tilastomatematiikan kannalta kysymyksessä on luottamusväli (95 %).

Otannan mittauksen epävarmuus voidaan määrittää kaavalla:

$$p = \frac{k \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{x}} \quad (5)$$

, jossa p = otannan suhteellinen epävarmuus, %

k = kattavuuskerroin ($k = 2$, kun luotettavuustaso on 95 %)

s = otoskeskihajonta mitattavien yksiköiden välillä (m^3 , kg)

n = otoskoko, kappaletta

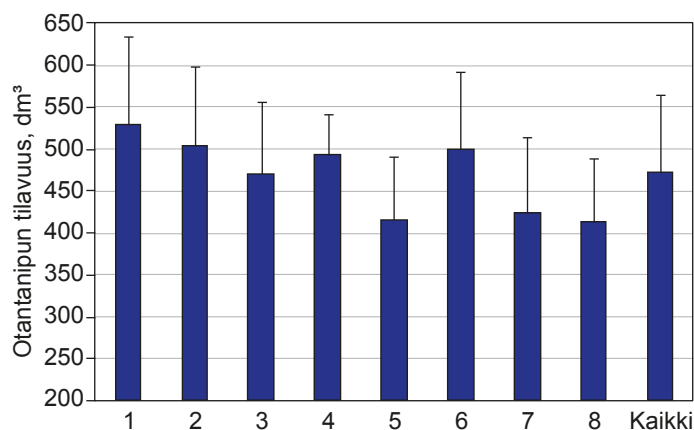
\bar{x} = otoskeskiarvo (kg/m^3)

8.3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

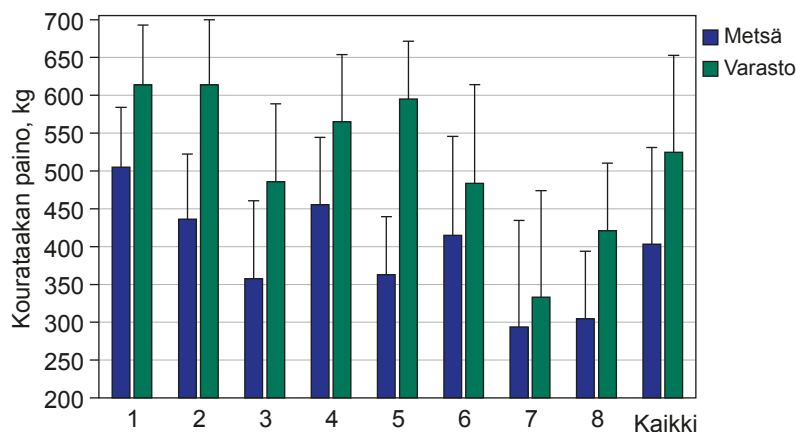
Otantanippujen tilavuuden keskiarvo oli 470 dm^3 ja keskihajonta 93 dm^3 . Otantanippujen tilavuuden keskiarvo vaihteli metsiköittäin $410\text{--}530 \text{ dm}^3$ (kuva 44). Otantanippujen painojen keskiarvo oli 403 kg ja painon keskihajonta 98 kg . Otantaniput vastasivat kooltaan normaaleja palstakasoja.

Tienvarsivarastossa kuormia purettaessa kourataakan painon keskiarvo oli 524 kilogrammaa ja keskihajonta 128 kilogrammaa (kuva 45). Kuormia purettaessa käsiteltiin keskimäärin 121 kilogrammaa suurempia kourataakkoja kuin kuormattaessa. Kourataakkojen painon ero oli samansuuntainen kaikissa metsiköissä. Eron keskiarvo vaihteli metsiköittäin $39\text{--}232$ kilogrammaa.

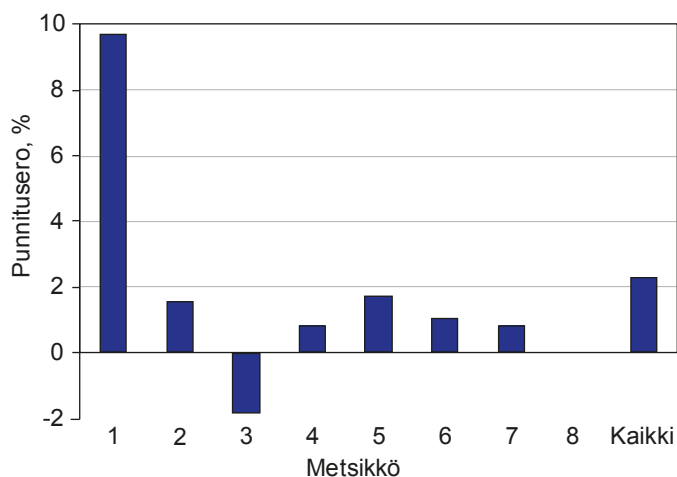
Otantanippujen kuormaa kuormattaessa ja purettaessa mitattujen painojen summien suhteelliset erot metsiköittäin on esitetty kuvassa 46. Erot on laskettu suhteessa tienvarressa punnittuun tulokseen. Metsiköittäin punnituseron itseisarvo oli alle kaksi prosenttia lukuun ottamatta metsikköä 1, jossa suuren eron syy on todennäköisesti kirjausvirhe.



Kuva 44. Otantanippujen tilavuuden keskiarvo ja keskihajonta metsiköittäin.



Kuva 45. Kourataakkojen painojen keskiarvot ja keskihajonnat metsässä kuormattaessa ja varastolla purettaessa tehdyissä punnituksissa metsiköittäin.

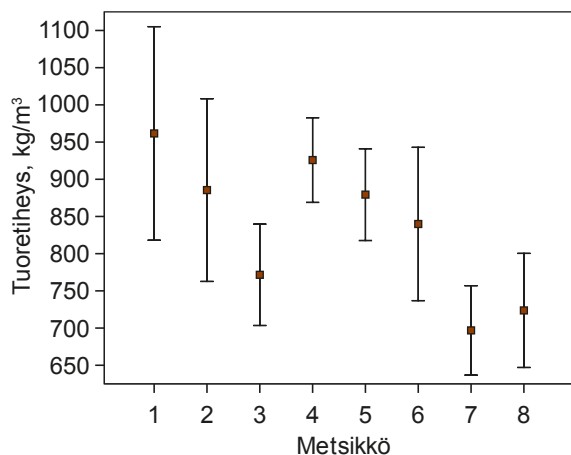


Kuva 46. Otantanippujen painojen summien suhteellinen ero metsässä ja tienvarressa tehdyssä punnituksessa metsiköittäin.

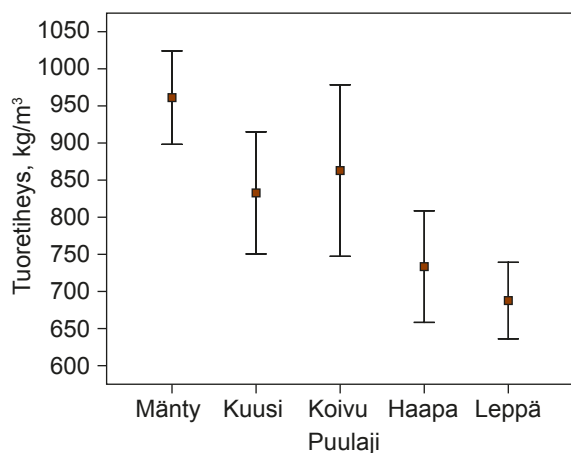
Otantanipuille laskettiin tuoretiheys (kg/m^3) kuormainvaa'alla punnitun painon ja hakkuukoneella mitatun tilavuuden perusteella. Kuvassa 47 on esitetty tuoretiheyden keskiarvot ja keskihajonnat metsiköittäin. Metsikön tuoretiheyden tasoon vaikuttaa oleellisesti otantanippujen puulaji ja puulajijakauma.

Kuvassa 48 on esitetty tuoretiheyden keskiarvot ja keskihajonnat puulajeittain. Tuoretiheyden keskiarvot olivat männyllä 961, kuusella 833, koivulla 863, haavalla 733 ja lepällä 687 kg/m^3 . Tuoretiheyden keskihajonta oli pienin lepällä (51 kg/m^3) ja suurin koivulla (116 kg/m^3).

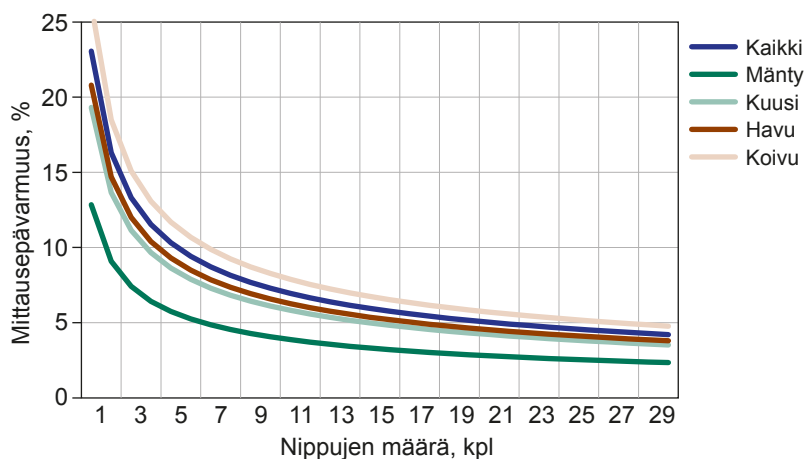
Kuvassa 49 on esitetty tuoretiheysluvun määrittämisen suhteellinen mittausepävarmuus mitattavien otantanippujen määrän suhteen puulajeittain. Laskennassa on käytetty kaavaa 5, josta nähdään, että suhteellinen mittausepävarmuus riippuu oleellisesti tuoretiheyden keskiarvosta ja -hajonnasta. Toisin sanoen keskihajonnan kasvaessa samaan tarkkuuden tasoon pääseminen edellyttää mitattavien otantanippujen määrän kasvattamista.



Kuva 47. Otantanippujen tuoreiheyden keskiarvot ja keskihajonnat metsiköittäin.



Kuva 48. Otantanippujen tuoreiheyden keskiarvot ja keskihajonnat puulajeittain.



Kuva 49. Tuoreiheyslusun määrittämisen mittausepävarmuus (satunnainen) otantanippujen lukumäärän suhteen.

Keskihajonta johtuu tuoreiheyden luontaisesta otantanippujen, puulajien ja metsiköiden välisestä vaihtelusta. Keskihajontaa lisää mittauksista aiheutuva vaihtelu, eli painon ja tilavuuden mittauksista johtuva vaihtelu. Kuvan 49 käyrät kuvaavat tämän satunnaisvaihtelun aiheuttamaa mittaus-tarkkuuden muutosta otantanippujen määrän suhteen. Tuoreiheyslusun oikean tason määrittäminen, toisin sanoen mittauksen systemaattisen virheen välttäminen edellyttää, että otantanippujen mittauksissa käytettävät mittauslaitteet on kalibroitu ja viritetty näyttämään oikeaa mittauksista.

Mittausmenetelmän käyttö tulisi kysymykseen lähinnä silloin, kun hakkuukonemittauksen käyttö kaikkien tavaralajien mittauksessa ei ole mahdollista. Näitä tilanteita olisivat ennen kaikkea joukkokäsittelymenetelmällä tai karsimattomina tavaralajeina tehtävä korjuu. Tällöin koko mittaususerän punnittaisiin kuormainvaa'alla. Edelleen otantanipuista määritettäisiin leimikkokohtainen tuoretiheysluku, jota käytettäisiin koko mittaususerän painon muuntamiseen tilavuudeksi. Lähtökohtaisesti menetelmän etuna olisi kyseisten tavaralajien ominaisuuksien ja vallitsevien olosuhteiden huomioon ottaminen tuoretiheysluvun määrittämisessä.

Riittävän tilastollisen tarkkuuden saavuttaminen näyttäisi vaativan melko ison määrän otantanipuja. Viiden prosentin mittausepävarmuuden saavuttaminen edellyttäisi parinkymmenen otantanipun mittauksia. Menetelmän työläisyys voi olla este käytännön toimintaedellytyksille. Toinen oleellinen huomioitava asia on mittauksen systemaattisen virheen välttäminen, mikä voi johtua paitsi mittauksista aiheutuvista virheistä, myös tavaralajien luontaisten ominaisuuksien ja varastointiajan kosteuden vaihtelun eroista. Lähtökohtaisesti otantanippujen tulee muodostaa edustava otos mitattavasta tavaralajista. Mittausmenetelmässä otantaniput muodostuisivat karsitusta ja katkotusta runkopuusta, mutta mittaususerä voisi sisältää esimerkiksi runkojen karsimattomia latvaosia. Ero tuoreen puun kosteudessa ja kosteuden vaihtelussa varastointiaikana voi siten aiheuttaa systemaattista virhettä tuoretiheysluvun määrittämisessä.

9 Lopuksi

Tässä työssä on kehitetty soveltavasta näkökulmasta uutta tietoa tuottamalla ja olemassa olevaa tietoa käyttämällä energiapuun määrän ja laatutekijöiden arviointia. Tuloksia ja kehitettyjä menetelmiä voidaan hyödyntää energiapuun määrän arvioinnissa korjuukohteiden valinnan tukena. Lisäksi menetelmiä voidaan hyödyntää energiapuun laadun, ensisijaisesti kosteuden, arvioinnissa energiapuun hankinnan kokonaistaloudellisuuden parantamisen kannalta.

Latvusmassan ja kantopuun määrääarvioiden laskennassa käytettiin aiemmissa tutkimuksissa julkaistuja biomassamalleja. Latvusmassan määrääarviota tarkennettiin määrittämällä runkopuun määrä erilaisilla katkaisuläpimitoilla, mikä antaa käsityksen apterauksen ja tavaralajien mittaustavasta vaikutuksesta tavaralajijakaumaan ja latvusmassan määrään. Kantopuun määrääarvioiden tueksi määritettiin säästökantojen määrä todellisilla kantojen korjuukohteilla. Säästökantojen määrän perusteella saatiin käsitys kantopuun korjuusuositusten toteutumisesta ja toisaalta korjuutyön laadusta. Tuloksia voidaan osaltaan hyödyntää kantojen korjuun maksuperusteiden laadinnassa.

Nuorten metsin korjuukohteilla tutkittiin metsiköiden rakennetta ja puustotunnuksia sekä hakkuukertymiä ja korjuujälkeä. Tutkimuksessa saatiin perustietoa paikallisten korjuukohteista sekä perusteita aiempaa järjestelmällisemmin toteutettavalle leimikoiden ennakkomittaukselle. Leimikolla tehtävillä koealamittauksilla ja METKA-laskureiden käytöllä pystytään määrittämään arviot energiapuukertymistä ja runkojen keskitilavuuksista, jotka edelleen ovat perusteina korjuukohteen kokonaistaloudellisuuden arvioinnille.

Energiapuun kosteus käyttöpaikkaan toimittaessa määrittää keskeisesti siitä saatavan hyödyn ja koko energiapuun korjuukohteen taloudellisen tuloksen. Edellytyksenä energiapuun oikea-aikaisen toimittamiselle käyttöpaikkaan on nykyistä tarkempien kosteusarvioiden tuottaminen. Tässä tutkimuksessa laaditut kosteusmallit ovat osaltaan avaus varastointiajan sääolosuhteisiin perustuvan energiapuun kosteuden ennustamisen kehittämisessä.

Energiapuuliiketoiminnan kokonaistalouden parantaminen edellyttää huonojen korjuukohteiden tunnistamista ja niiden poiskarsintaa. Tuotetun tiedon hyödyntäminen käytännön korjuutoiminnassa edellyttää, että henkilöstön tiedot ja taidot ovat ajan tasalla ja toiminnanohjausjärjestelmä mahdollistaa kerättyjen työmaatiетоjen tallennuksen ja toimitusketjun seurannan kannolta kattilaan asti.

Kirjallisuus

- Anerud, E. & Jirjis, R. 2011. Fuel quality of Norway spruce stumps – influence of harvesting technique and storage method. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 257–266.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suu-
rimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Raitila, J., Virkkunen, M., Heikkinen, A., Tiihonen, I. & Kaipainen H. 2011. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjun sekä varastoinnin kehittäminen. Tutkimusraportti, VTT. 52 s.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54.4. 82 s.
- 1964. Kesäaikana valmistettujen paperipuitten ja sahatukkien kuivuminen ja varastoviat. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 58.4. 108 s.
- 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. *Folia Forestalia* 342. 38 s.
- 1979. Wood density surveys and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 96(3). 59 s.
- 1989. Utilization of Residual Forest Biomass. *Springer Series on Wood Science*, Springer Verlag. 568 s.
- 1991. Crown mass of trees at the harvesting phase. *Folia Forestalia* 773. 24 s.
- , Kalaja, H. & Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 582. 99 s.
- , Nurmi, J. & Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energianlähteenä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 684. 68 s.
- & Parikka, M. 2002. Fuel Resources from the Forest. Teoksessa Richardsson, J., Björheden, A, Hakkila, P., Lowe, A. T. ja Smith, C.T. (toim.). *Bioenergy from Sustainable Forestry. Guiding Principles and Practices*. Kluwer Academic Publishers. s. 19–48.
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K.T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. *Metlan työraportteja* 10. 56 s.
- Jahkonen, M., Jouhiaho, A., Lindblad, J., Rieppo, K. & Mutikainen, A. 2012. Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantopuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus. *Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja* 239. 20 s.
- , Lindblad, J., Sirkiä, S. & Lauren, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. *Metsäntutkimuslaitoksen työraportteja* 241. 35 s.
- Johansson, T. 2000. Biomass equations for determining fractions of common and grey alders growing on abandoned farmland and some practical implications. *Biomass and Bioenergy* 18: 147–159.
- 2002. Increment and biomass in 26 to 91 year old European aspen and some practical implications. *Biomass and Bioenergy* 23: 245–255.
- Jouhiaho, A. & Mutikainen, A. 2010. Mäntykantojen nosto kantoharalla ja kantoharvesterilla. *TTS tutkimuksen tiedote* 9/2010 (745). 6 s.
- , Rieppo, K. & Mutikainen, A. 2010. Kantoharan ja kantoharvesterin tuottavuus ja kustannukset. *TTS tutkimuksen tiedote* 2/2010 (738). 8 s.
- Kukko, T., Lahti, K. & Torpo, J. 1990. Puutavara-autotarpeen määrittäminen annetuissa olosuhteissa. Puunkorjuun ja kaukokuljetuksen harjoitustyö. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. 12 s.
- Kärhä, K., Mutikainen, A. & Kortelahti, I. 2009. Väkevä-kantopilkkuri Metsätehon ja TTS tutkimuksen pikatestissä. *Metsätehon tulosalvosarja* 12/2009.
- Kärkkäinen, M. 1976. Puun ja kuoren tiheys ja kosteus sekä kuoren osuus koivun, kuusen ja männyn oksissa. *Silva Fennica* 10(3): 212–236.
- 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. *Metsäkustannus Oy*. 468 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt*. *Comm. Inst. Forestalis Fenniae* 108. 72 s.
- Laitila, J. 2006. Cost and sensitive analysis tools for forest energy procurement chains. *Metsäanduslikud Uurimused - Forestry Studies* 45: 5–10.
- 2010. Kantojen korjuun tuottavuus. *Metlan työraportteja* 150. 29 s.

- , Ala-Fossi, A., Vartiamäki, T., Ranta, T. & Asikainen, A. 2007 a. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen tuottavuus. Metlan työraportteja 46: 26 s.
- , Asikainen, A. & Nuutinen, Y. 2007 b. Forwarding of whole trees after manual and mechanized felling bunching in pre-commercial thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 18(2): 29–39.
- , Leinonen, A., Flyktman, A., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT Tiedotteita 2564. 143 s.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. 2010. Moisture Content of Norway Spruce Stump Wood at Clear Cutting Areas and Roadside Storage Sites. *Silva Fennica* 44(3): 427–434.
- Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2001. Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2001: 411–431.
- Lindblad, J. 2008. Energiapuun mittauksessa käytettävät tuoretiheysluvat. Raportti Energiapuun mittaus-toimikunnalle. 16.7.2008. 17 s.
- Lindblad, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. Energiapuun mittaus. Energiapuun mittaustoimikunta 27.9.2010.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2008. Maa- ja metsätalousministeriön asetus kuormainvaa’an käytöstä puutavaran mittauksessa ja erien erillään pidossa. Nro 18/08.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2010. Maa- ja metsätalousministeriön asetus kuormainvaa’an käytöstä puutavaran mittauksessa ja erien erillään pidosta annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen muuttamisesta. Nro 8/10.
- 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.
- Nurmi, J. 2000. Characteristics and storage of whole-tree biomass for energy. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 758. 42 s.
- Näslund, M. 1937. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 29. 169.s.
- Peltola, S., Kilpeläinen, H. & Asikainen, A. 2011. Recovery rates of logging residue harvesting in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten) dominated stands. *Biomass & Bioenergy* 35: 1545–1551.
- Petersson, H. 1999. Biomassfunktioner för trädfraktioner av tall, gran och björk i Sverige. *Arbetsrapport* 59 1999. 31 s.
- 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. Metlan työraportteja 53. 28 s.
- Ronkainen, P. 2010. Latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksen yhteydessä. Metsä- ja puuteknologian pro gradu – tutkielma. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 60 s.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2004. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. CEN/TS 14774-2. 14 s.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2010a. Solid Biofuels. Determination of calorific value. SFS-EN 14918. 61 s.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2010b. Kiinteät biopolttoaineet. Tuhkapitoisuuden määrittäminen. SFS-EN 14775. 15 s.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Palakokojakauman määrittäminen. SFS-EN 15149-1. 21 s.
- Thörnqvist, T. 1985. Drying and Storage of Forest Residues for Energy Production. *Biomass* 7: 125–134.
- Ylitalo, E. 2012. Puun energiakäyttö 2011. *Metsätaloustiedote (SVT Maa-, metsä- ja kalatalous)* 16/2012. 7 s.
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Pirinen, P. & Drebs, A. 2005. A basic Finnish climate data set 1961–2000 – Description and illustrations. *Ilmatieteen laitoksen raportteja* 2005:5, 27 s.
- Verkasalo, E. 1987. Metsähakkeen kosteuden ja kuivamassan mittaus kuormaotantamenetelmällä. *Folia Forestalia* 694. 35 s.
- Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset. Energiapuun korjuu ja kasvatusta. Metsätalouden tutkimuskeskus Tapio. 56 s.