

Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantopuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

Miina Jahkonen, Aki Jouhiaho, Jari Lindblad, Kaarlo Rieppo
ja Arto Mutikainen

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

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä.

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

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

Toimitus

PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

| | | | |
|---|------------------------|--|--------------------------|
| Tekijät Jahkonen, Miina, Jouhiaho, Aki, Lindblad, Jari, Rieppo, Kaarlo & Mutikainen, Arto | | | |
| Nimeke Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus | | | |
| Vuosi 2012 | Sivumäärä 20 | ISBN 978-951-40-2377-4 (PDF) | ISSN 1795-150X |
| Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Itä-Suomen alueyksikkö / Bioenergiaa metsistä tutkimus- ja kehittämisohjelma (BIO) / METKA – Metsäenergiaa kannattavasti 7335 | | | |
| Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, BIO-tutkimusohjelman johtaja, 31.7.2012 | | | |
| Tiivistelmä Kantomurskeen seassa polttokattilaan kulkeutuvat epäpuhtaudet on polttotekninen ongelma. Epäpuhtaudet nostavat tuhkapitoisuutta ja laskevat polttoaineen lämpöarvoa. Kannonhankinnan logistiikassa puhdistamiseen vaikuttavien tekijöiden merkitystä käyttöpaikalle kulkeutuvien epäpuhtauksien määrään ei tunneta ja kantojen paloitteluun ja puhdistamiseen käytetyn ajanmenekin vaihtelu on suurta. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia kannonostomenetelmän vaikutuksia kantuun epäpuhtauksiin. Tutkimusaineisto kerättiin Kanta-Hämeessä vuosina 2008 ja 2009 kahdelta työmaalta kantuun ja -harvesteria käyttäen. Kohteilta laskettiin kivisyys, kantuun kertymät sekä eri työvaiheiden ajanmenekki. Kantomurskeesta määritettiin palakokojakaumat, lämpöarvo sekä tuhkapitoisuus. Kantoharvesterilla korjatun kantuun tuhkapitoisuus oli korkeampi ja tehollinen lämpöarvo hieman alempi kuin kantoharalla korjatun. Kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli molemmissa kohteissa yhtä suuri, vaikka puhdistukseen käytetty aika kohteilla erosi huomattavasti. Koska tutkimusaineisto oli pieni, on päätelmät kannonostomenetelmän sekä työajan menekin vaikutuksesta tehtävä varauksin. Kannonostomenetelmien ja työtapojen vaikutusten tutkimista epäpuhtauksien määrään hankintaketjun eri vaiheissa tulisi jatkaa, jotta kustannustehokkaimmat epäpuhtauksien hallintamenetelmät saataisiin käyttöön. | | | |
| Asiasanat kantuun, korjuumenetelmä, lämpöarvo, tuhkapitoisuus, työaikatutkimus | | | |
| Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp239.htm | | | |
| Tämä julkaisu korvaa julkaisun | | | |
| Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla | | | |
| Yhteydenotot Jari Lindblad, Metla, PL 68, 80101 Joensuu Sähköposti: jari.lindblad@metla.fi | | | |
| Bibliografiset tiedot | | | |
| Muita tietoja Aki Jouhiaho, Arto Mutikainen ja Kaarlo Rieppo TTS-Työtehoseura | | | |
| Taitto: Maija Heino | | | |

Sisällys

| | |
|---|-----------|
| 1 Johdanto | 5 |
| 1.1 Kantopuun korjuu ja energiakäyttö | 5 |
| 1.2 Kantopuun ominaisuudet..... | 5 |
| 1.3 Tutkimuksen tavoite | 6 |
| 2 Aineisto ja menetelmät | 7 |
| 2.1 Kannonosto | 7 |
| 2.2 Työaikatutkimus | 10 |
| 2.3 Kantojen lämpöarvon ja epäpuhtauksien määrittäminen | 11 |
| 3 Tulokset | 12 |
| 3.1 Kantopuun kertymät ja työajan menekki..... | 12 |
| 3.2 Kantomurskeen palakokojakaumat | 13 |
| 3.3 Lämpöarvo ja tuhkapitoisuus | 15 |
| 3.3.1 Seulottujen näytteiden lämpöarvo ja tuhkapitoisuus | 15 |
| 3.3.2 Seulomattomien näytteiden lämpöarvo ja tuhkapitoisuus | 16 |
| 3.3.3 Puhdistukseen käytetyn ajan vaikutus epäpuhtauksiin..... | 17 |
| 4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset | 18 |
| Kirjallisuus | 20 |

1 Johdanto

1.1 Kantopuun korjuu ja energiakäyttö

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 laske-matta. Vuonna 2007 kantojen nostossa oli runsaat 100 tela-alustaista kaivukonetta, joiden kannonnostolaitteista vajaassa puolessa oli hydraulinen halkaisuterä (Kärhä 2007).

Kantomurskeen seassa polttokattilaan kulkeutuvat epäpuhtaudet, lähinnä maa-aines, on poltto-tekniinen ongelma, joka voi pahimmillaan pysäyttää suuren lämpö- ja voimalaitoksen toiminnan. Epäpuhtaudet nostavat tuhkapitoisuutta ja laskevat polttoaineen lämpöarvoa. 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.

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, Kärhä ym. 2009b, Jouhiahio ym. 2010, Jouhiahio ja Mutikainen 2010). Kun tiedetään, miten kannon-noston puhdistamiseen käytetty ajankäyttö vaikuttaa kantopalojen puhtaustasoon käyttöpaikalla, ovat tarvittavat toimenpiteet helpompi mitoittaa kustannustehokkaasti. Kantojen noston paloittelun- ja puhdistustyön rationalisoinnissa saattaa olla mahdollisuus merkittäviinkin kustannussäästöihin.

1.2 Kantopuun ominaisuudet

Havupuilla puuaineen tiheys on kannossa ja juurissa korkeampi kuin runkopuussa (Kärkkäinen 2007). Kuusella kantopuun tiheys on rungon tyvellä hieman alle 400 kg/m³, josta tiheys lähtee kohoamaan juurten kärkiä kohti ollen enimmillään noin 460 kg/m³. Männyllä tiheys on rungon tyvellä jopa lähes 480 kg/m³ ja juurissa hieman alempi (Hakkila 1989). Kuusen ja männyn kantojen rakenne ja kuiva-aineen jakautuminen kantopuuhun ja juuriin eroavat toisistaan. Metsäntutkimuslaitoksessa kerätyssä aineistossa (Lindblad 2007, julkaisematon) kahdelta korjuukohteelta energiakäyttöön korjatun kantopuun kuivatuoretiheyden keskiarvo oli 453 kg/m³ ja keskihajonta 16 kg/m³.

Laurilan ja Lauhasen (2010) tutkimuksen mukaan nostotuoreiden kuusen kantojen kosteuden keskiarvo oli 53 prosenttia. Erkkilän ym. (2011) tutkimuksessa mäntykantojen kosteus heti noston jälkeen oli keskimäärin 43 prosenttia ja kuusikantojen noin 51 prosenttia. VTT:n vuosina 2009–2010 toteuttamassa männyn kantojen korjuuta ja kuljetusta koskeneessa tutkimuksessa kantojen kosteuden keskiarvo oli heti noston jälkeen männyllä 43 prosenttia ja kuusella 51,5 prosenttia (Erkkilä ym. 2011). Ruotsissa toteutetussa kokeessa (Anerud ja Jirjis 2011) kolmella eri menetelmällä korjattujen kuusen kantojen kosteus oli 41–47 prosenttia, kun kannot nostettiin kolme kuukautta hakkuun jälkeen.

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). Havupuiden suuren pihka- ja ligniinipitoisuuden vuoksi niiden lämpöarvo massayksikköä kohti on hieman lehtipuita korkeampi ja oksien ja neulasten lämpöarvo on hieman runkopuuta korkeampi (Hakkila 1989). Kannon ja juurten tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on kuusella 19,1 MJ/kg ja männyllä 19,5 MJ/kg ja 40 prosentin kosteudessa kuusella 17,4 MJ/kg ja männyllä 17,9 MJ/kg (Hakkila 1978). Pihkan osuus tuoreessa kantopuussa on runkopuuta korkeampi (Hakkila 1975 ja 1976), jolloin myös kantojen lämpöarvo on hieman runkopuun lämpöarvoa suurempi.

Kantopuun epäpuhtaudet ovat orgaanisia ja epäorgaanisia aineita. Epäorgaanisista ainesosista muodostuu poltettaessa tuhkaa. Uuteaineet (mm. pihka) kohottavat lämpöarvon lisäksi myös tuhkapitoisuutta (Hakkila ja Parikka 2002). Pitkään varastoidun kuusen kantopuun keskimääräinen tuhkapitoisuus Laurilan ja Lauhasen (2010) tutkimuksessa oli 1,7 prosenttia. Vierasaineiden, kuten maapartikkeleiden, kiinnittyminen kantopuuhun lisää tuhkapitoisuutta jopa 4–11 prosentin tasolle (Alakangas 2000). Tuhkapitoisuuden lisääntyminen siis ilmaisee epäpuhtauksien määrän lisääntymistä kantopuussa. Epäpuhtauksien lisääntyminen myös huonontaa lämpöarvoa.

Kantopuun epäpuhtauksien määrään vaikuttavat korjuun, kuljetuksen ja varastoinnin aikaisen mekaanisen puhdistumisen ja sääaltistusten lisäksi kantojen luontaiset ominaisuudet. Kannot eroavat muista energiapuutavaralajeista suuren läpimitan, pienen kuoriprosentin ja massa- ja pinnan suhteen. Varsinkin nuorilla kuusilla kuori kutistuu puuainetta enemmän (Kärkkäinen 2007), ja tällä saattaa olla vaikutusta kantoihin kiinnittyneiden maapartikkeleiden irtoamiseen.

Myös puulajilla ja kasvupaikalla on merkityksensä epäpuhtauksien määrään. Männyllä juuret kulkevat syvemmillä kuin kuusella. Lisäksi männyllä on paalujuuri pohjoisinta Suomea ja veden vaivaamia turvemaita lukuun ottamatta (Hakkila 1975 ja 1976). Kuusen ja männyn erilaiset kasvupaikkavaatimukset yhdessä kantojen erilaisen rakenteen kanssa saattavat aiheuttaa eroja epäpuhtauksien määrässä sekä kantojen noston yhteydessä, kuin myös puhdistumisessa varastointiaikana.

1.3 Tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli

- verrata epäpuhtauksien määrää eri kannonostomenetelmillä (kantohara ja kantoharvesteri)
- tutkia puhdistukseen käytetyn ajan vaikutusta epäpuhtauksien määrään
- tutkia epäpuhtauksien vaikutusta kantopuun lämpöarvoon.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Kannonnosto

Tutkimuksessa hyödynnettiin TTS:n koneellisen kannonnoston kustannustehokkuutta käsitelleen työntutkimuksen aineistoa (Jouhiaho ym. 2010). Kannonnosto oli toteutettu kummallakin tutkimuskohteella noin vuosi päätehakkuun jälkeen. Janakkalassa kannot oli nostettu syksyllä 2008 ja Kalvolassa syksyllä 2009. Tutkimuksessa kantoharaa edusti A. Hirvonen Oy:n kantohara Väkevä ja kantoharvesteria Tervolan Konepaja Oy:n Pallari KHM-140. Molemmat kannonnostolaitteet oli liitetty tekniikaltaan ja ulkoisilta mitoiltaan vastaaviin tela-alustaisiin 21 tonnin painoisiin kaivukoneisiin (Volvo EC 210B LC, Hyundai 210 LC-7, kuvat 1 ja 2).

Väkevä-kantoharassa oli rivissä neljä hankomaista piikkiä ja yksi piikkiriviin nähden kohtisuorassa kulmassa sijaitseva kannon halkaisupiikki, jolla suuriläpimittaisia kantoja voitiin pilkkoa pienempään kokoon nostotyön helpottamiseksi (kuva 3). Kaivukoneen kauhan kallistajan ansiosta myös piikkirivin ensimmäinen piikki soveltui samaan tarkoitukseen. Haran piikkirivin reunassa olevalla muokkauslevyllä voidaan tehdä kannonnoston yhteydessä maanmuokkausta. Laitteen leveys on 90 cm ja paino 950 kg.

Pallari KHM-140 kantoharvesterilla kannot voidaan halkaista laitteen kahdella hydraulisylinterillä liikuteltavalla halkaisuterällä ennen irrotusta ja nostaa maasta paloina (kuva 3). Myös maasta nostettujen kantojen pilkkominen kuljetuksen kannalta edullisiin pienempiin osiin on laitteella mahdollista. Laitteen hamarapuolella sijaitsevalla mätästyslevyllä voidaan tehdä maanmuokkausta. Kaivukoneeseen pikakiinnityksellä liitettävän laitteen leveys on 120 cm ja paino 1 750 kg.



Kuva 1. Kantohara Väkevä (A. Hirvonen Oy) ja kaivukone Volvo EC 210B LC. (Kuva: Aki Jouhiaho)



Kuva 2. Kantoharvesteri Pallari KHM-140 (Tervolan Konepaja Oy) ja kaivukone Hyundai 210 LC-7. (Kuva: Aki Jouhiaho)



Kuva 3. A. Hirvonen Oy:n kantohara Väkevä (vas.) ja Tervolan Konepaja Oy:n kantoharvesteri Pallari KHM-140 (oik.). (Kuvat: Aki Jouhiaho)

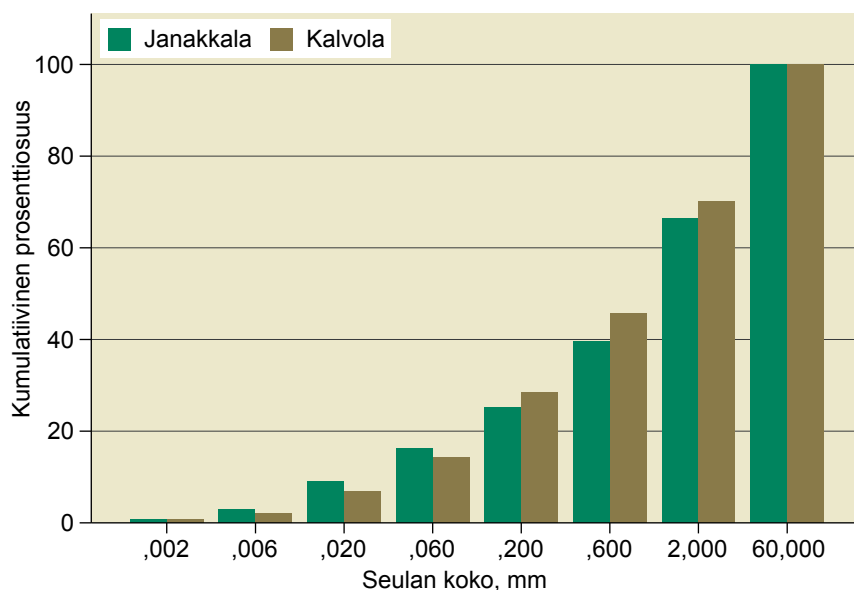
Laitteita tutkittiin kahdella kivennäismaalla sijaitsevalla kannonnostokohteella Janakkalassa ja Kalvolassa Etelä-Hämeessä. Tutkimuskohteilla toteutettujen kuusivaltaisten päätehakkuiden runkokuun kertymät olivat 253 ja 313 m³/ha (taulukko 1). Normaalin käytännön mukaisesti hakkuutahteet oli korjattu tutkimuskohteilta. Niin sanotulla kivisellä kohteella Janakkalassa oli runsaasti tela-alustaisen kaivukoneen etenemistä hidastavia suuria pintakiviä. Vähäkivisellä tutkimuskohteella Kalvolassa suuria pintakiviä oli selvästi vähemmän (taulukko 1). Kaivukoneiden kuljettajien kokemuksen mukaan noin puoli metriä korkeat kivet vaikeuttavat tai saattavat vaikeuttaa tela-alustaisen kaivukoneen siirtymistä. Sen sijaan alle 20 senttimetriä korkeat kivet eivät käytännössä vaikuta etenemiseen. TTS:n kannonnoston kustannustehokkuutta käsitelleen tutkimuksen tarpeita varten kivet luokiteltiin siten kahteen luokkaan eli vähintään 20 senttimetriä mutta alle 45 senttimetriä korkeisiin ja vähintään 45 senttimetriä korkeisiin kiviin. Vähäkivisellä kohteella Kalvolassa suuria vähintään 45 senttimetriä korkeita kiviä oli 20 kpl/ha ja kivisellä kohteella Janakkalassa 150 kpl/ha eli 7,5-kertainen määrä. Pienikokoisempia kiviä oli kivisellä kohteella kuusinkertainen määrä vähäkiviseen kohteeseen verrattuna.

Syksyllä 2011 molemmilta kohteilta otettiin määrävälein viisi maanäytettä, joista määritettiin kohteen maaperän raekoostumus laserdiffraktiolla (kuva 4). Raekoostumuksen perusteella molempien kohteiden maalajiksi määritettiin hiekkamoreeni.

Kannonnostokoneiden vertailussa koeruutujen sijoitteluun kiinnitettiin erityistä huomiota. Kunkin koneen koelaruudet sijoitettiin työkohteille vierekkäin, jotta työolosuhteet olisivat molemmilla koneilla mahdollisimman samanlaiset (kuva 5). Pienialaiset kosteikot ja ojat rajattiin

Taulukko 1. Puuston hehtaarikohtainen hakkuukertymä puulajeittain ja pintakivien hehtaarikohtaiset lukumäärät Janakkalassa ja Kalvolassa.

| | Hakkuukertymä, m ³ /ha | | | | Kivien lkm/ha | |
|-----------|-----------------------------------|-------|----------|----------|---------------|---------|
| | Kuusi | Mänty | Lehtipuu | Yhteensä | 20–44 cm | ≥ 45 cm |
| Kalvola | 237 | 1 | 15 | 253 | 140 | 20 |
| Janakkala | 257 | 44 | 12 | 313 | 840 | 150 |



Kuva 4. Maalajin raekoostumus massaprosentteina.

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| Ruutu 4 Kantoharvesteri | Ruutu 3 Kantoharvesteri |
| Ruutu 2 Kantohara | Ruutu 1 Kantohara |

Kuva 5. Koeruutujen sijoittelu tutkimuskohteille.

koeruutujen ulkopuolelle. Aikatutkimuskoealat muodostuivat 25 metriä pitkistä ruuduista, joiden leveys määräytyi kaivukoneen työskentelyleveyden mukaan. Kantoharan työskentelyleveys oli 14,8 metriä ja kantoharvesterin 15,9 metriä. Kauhan ulottuma oli molemmilla koneilla yhtä suuri, joten koneiden välinen ero työskentelyleveydessä johtui menetelmästä ja kuljettajien omaksu-
masta työtavasta. Kivisen kohteen aineisto hankittiin kummankin koneen osalta 14 koeruudulta, jolloin kivisen kohteen aineisto koostui yhteensä 28 koeruudusta. Vähäkivisen kohteen aineisto koostui kunkin koneen osalta 17 ruudusta eli yhteensä 34 ruudusta. Siten koko tutkimuksen aineisto kertyi 62 ruudulta eli yhteensä 2,4 hehtaarin alalta.

Nostettavien kantojen valinnassa kuljettajat noudattivat normaalia omaksumaansa työtapaa ja Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion suosituksia, joiden mukaan vanhat ja lahot kannot sekä halkaisijaltaan alle 15 senttimetrin kannot jätettiin korjaamatta. Molempien koneiden kuljettajilla oli useiden vuosien kokemus koneellisesta kannonnostosta.

Kanto- ja juuripuun kuivamassan määrittämisessä käytettiin Hakkilan (1976) kuivamassamalleja:

$$\text{Mänty: } m = -2 + 0,039d^2 \quad (1)$$

$$\text{Kuusi: } m = -7 + 0,051d^2 \quad (2)$$

jossa m = kanto- ja juuripuun kuivamassa, kg ja
 d = kantoläpimitta juurenniskan yläpuolella, cm.

Kuivamassa muunnettiin tilavuudeksi (m^3) jakamalla se kuivatuoretiheyksillä, jotka olivat männyllä 473 kg/m^3 ja kuusella 432 kg/m^3 (Hakkila 1976). Hakkilan kuivamassamalli ei sisällä alle viiden senttimetrin juurensia. Käytännössä myös alle viiden senttimetrin juuripaloja nostetaan ylös ja lisäksi kaatoleikkaus tehdään teoreettisen juurenniskan yläpuolelta, jolloin todellinen kertymä on mallilla määritettyä suurempi. Käytännön kokemusten mukaan kanto- ja juuripuun kertymä on 25–30 prosenttia runkupuun kertymästä (Hakkila 2004), kun se Hakkilan (1976) kuivamassamallin mukaan on 24 prosenttia. Tästä syystä Hakkilan kuivamassamallia korjattiin kannonnostotutkimuksissa jo vakiintuneeksi muodostuneen käytännön mukaan kertoimella 1,15 (Laitila ym. 2007, Kärhä ym. 2009a, Kärhä ym. 2009b, Jouhiaho ym. 2010, Jouhiaho ja Mutikainen 2010).

2.2 Työaikatutkimus

Työaikatutkimuksessa kannonnoston työvaiheet jaettiin seuraavasti:

- Siirtyminen työpisteestä toiseen
- Laitteen vienti kannolle
- Juurakon maasta irrotus
- Juurakon paloittelu ja puhdistus
- Kannon tai sen osan siirto kasaan
- Maanmuokkaus ja nostojäljen tasoitus

2.3 Kantojen lämpöarvon ja epäpuhtauksien määrittäminen

Kantopuun epäpuhtauksien määrän vertailu koetyömaiden ja kannonnostomenetelmien välillä tehtiin kantomurskenäytteiden lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden perusteella. Kantopuusta kasattiin molemmille työmaille noin 200 kannon suuruiset varastokasat kannonnostomenetelmittain. Lokakuussa 2010 työmaa- ja kannonnostomenetelmäkohtaiset kantopuuerät kuljetettiin terminaaliin, jossa kannot murskattiin kantopuuerittain. 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 murskekasa aukaistiin kauhakuormaajalla kasan vastakkaisilta puolilta ja kummaltakin puolelta otettiin neljä näytettä murskekasan sisäosasta.

Laboratoriossa jokaisesta näytteestä otettiin kaksi osanäytettä, joista toisesta määritettiin palakokojakauma Retsch Vibro -täryseulakoneella standardin SFS-EN 15149 mukaisesti. Seulujen 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 kohti. Näytteet kuivattiin lämpöarvon määrittämistä varten, jonka jälkeen niistä mitattiin kuivauksen jälkeinen tasapainokosteus (M_{eq}) huonetilassa. Kosteus määritettiin standardin CEN/TS 14774 (korvattu standardilla SFS-EN 14774) mukaisesti kuivaamalla näytettä 105 asteessa, jonka jälkeen kosteusprosentti laskettiin painohävikistä (gravimetrinen menetelmä). Lämpöarvo (3-5) määritettiin standardin SFS-EN 14918 mukaisesti polttamalla tunnettu määrä polttoainetta kalorimetripommissa puhtaassa hapessa ja mittaamalla syntyvä lämpömäärä (laite IKA C 5000). Tuhkapitoisuus määritettiin polttamalla kuivattu näyte 550 asteessa ja laskemalla painohävikki standardin SFS-EN 14775 mukaan. Lämpöarvoista laskettiin:

Kalorimetrinen lämpöarvo kuiva-aineessa (korjattu lämpöarvo)

$$Q_{gr} = Q * 100 / M_{eq}, \quad (3)$$

jossa Q = lämpöarvo
 M_{eq} = kuivauksen jälkeinen tasapainokosteus, %

Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa

$$Q_{net} = Q_{gr} - ((0,02441 * M_{vesi} / M_{vety}) * 6,25), \quad (4)$$

jossa 0,02441 = veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä vakiotilavuudessa (+25 °C), MJ/kg
 M_{vesi} = veden molekyylimassa, u
 M_{vety} = vedyn molekyylimassa, u
6,25 = vedyn osuus, %

Tehollinen lämpöarvo saapumiskosteudessa

$$Q_{net, ar} = Q_{net} * ((100-M)/100) - (0,02443 * M), \quad (5)$$

jossa 0,02443 = entalpiakerroin
 M = näytteen kosteus, %.

3 Tulokset

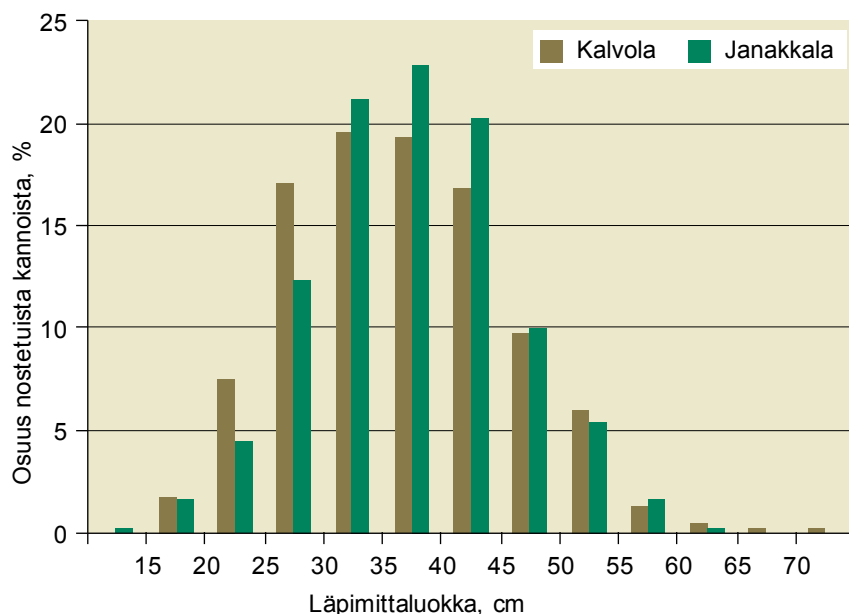
3.1 Kantopuun kertymät ja työajan menekki

Kalvolan (vähäkivinen) tutkimuskohteen kantojen keskiläpimitta oli 37 senttimetriä ja Janakkalan (kivinen) kohteen 38 senttimetriä (taulukko 2, kuva 6). Nostetut kannot olivat pääasiassa kuusia, joskin Janakkalassa kantoharvesterin aineistoon kertyi myös jonkin verran männyn kantoja. Kaikkiaan kantoja nostettiin tutkimuksessa 925 kappaletta.

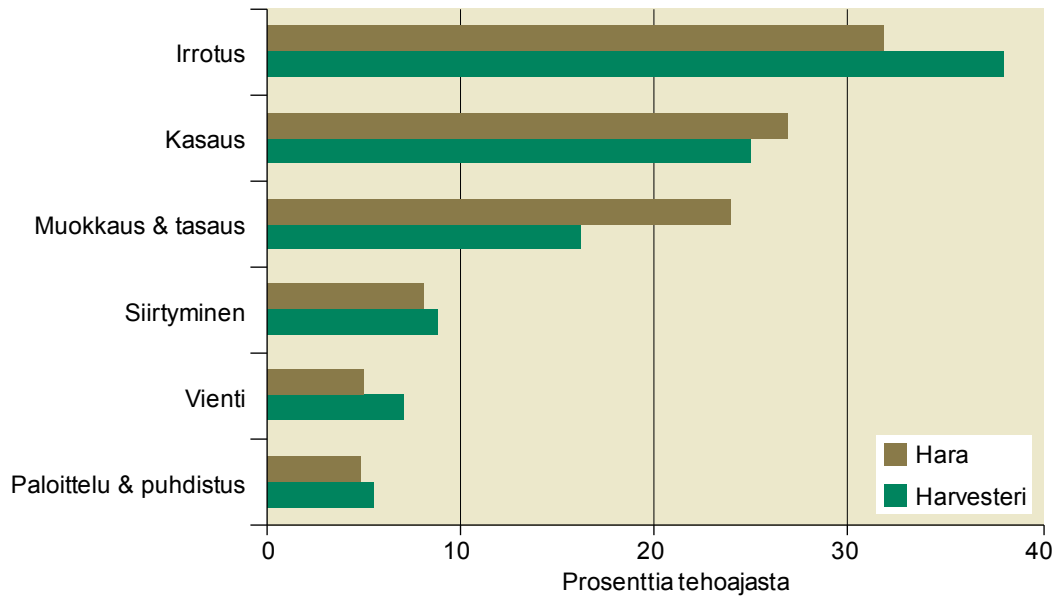
Molemmat tutkimuskohteet sisältävässä yhdistetyssä aikatutkimusaineistossa irrotukseen kului kummallakin laitteella eniten tehoaikaa (kuva 7). Kantoharalla irrotuksen osuus tehoajasta oli 32 prosenttia ja kantoharvesterilla 39 prosenttia. Toiseksi eniten tehoaikaa, eli noin neljännes, kului molemmilla laitteilla kasaustyövaiheeseen. Muut kannonnoston työvaiheet eli siirtyminen, laitteen vienti kannolle ja paloittelu-puhdistus edustivat kukin 5–9 prosentin osuuksia tehoajasta.

Taulukko 2. Tutkimuksessa nostettujen kantojen lukumäärä, keskiläpimitta ja tilavuus.

| Korjuukohtede | Kone | Kantojen lkm | Keski-lpm, cm | Tilavuus, m ³ |
|---------------|------------|--------------|---------------|--------------------------|
| Kalvola | Hara | 199 | 37 | 36 |
| | Harvesteri | 255 | 37 | 46 |
| Janakkala | Hara | 197 | 39 | 38 |
| | Harvesteri | 274 | 37 | 45 |



Kuva 6. Kantojen läpimittajakauma Janakkalassa ja Kalvolassa.



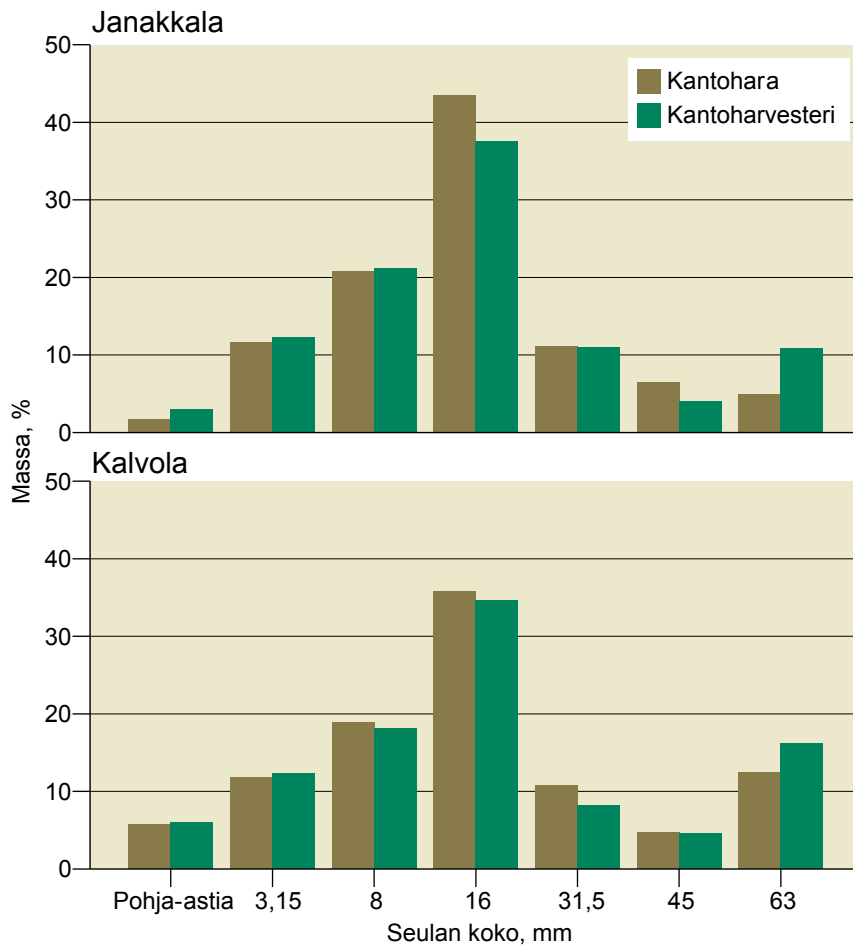
Kuva 7. Työvaiheiden tehoajanjakauma yhdistetyssä aikatutkimusaineistossa.

3.2 Kantomurskeen palakokojakaumat

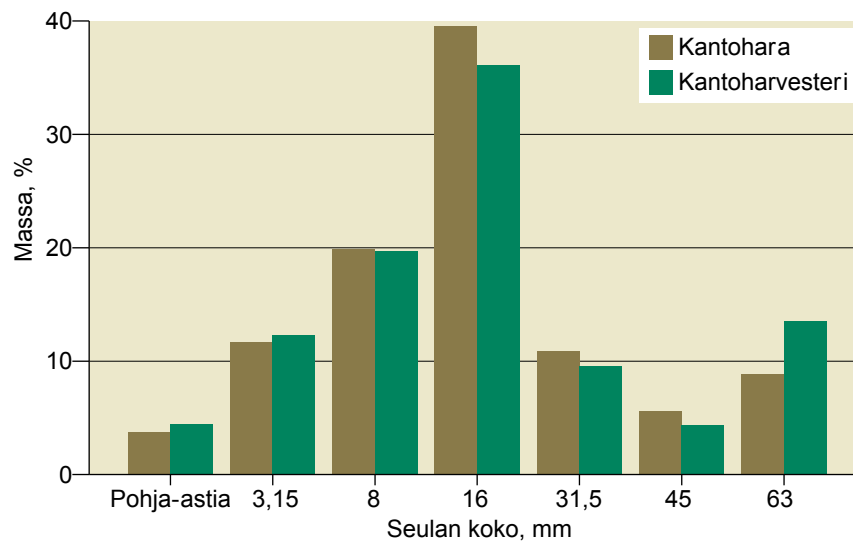
Kantomurskeella keskikokoisten (16 mm) jakeiden suhteellinen kuivamassaosuus oli hieman yli kolmanneksen molemmilla tutkimuskohteilla ja kannonnostomenetelmillä (kuva 8). Suuret (>31,5 mm) jakeet ja pienet jakeet (<16 mm) muodostivat kumpikin suuruusluokaltaan noin kolmanneksen palakokojakaumasta. Kalvolassa pohja-astiaan kertyvän pienen jakeen osuus oli suurempi kuin Janakkalassa.

Eri menetelmillä nostettujen kantojen palakokojakaumat erosivat toisistaan enemmän Janakkalassa, jossa keskikokoisen (>16 mm) jakeen osuus oli kantoharalla nostettujen kantojen murskeessa suurempi kuin kantoharvesterilla nostetuissa ja suurimpia paloja (>63 mm) oli huomattavasti enemmän taas kantoharvesterilla nostettujen kantojen murskeessa. Kalvolassa erot kannonnostomenetelmien välillä olivat pieniä.

Kuvassa 9 on esitetty molempien kannonnostopaikkojen yhdistetyt palakokojakaumat kannonnostomenetelmittain. Keskikokoisia ja suurehkoja (16–63 mm) jakeita oli enemmän kantoharalla nostettujen kantojen murskeessa, kun suurilla, yli 63 millimetrin jakeilla, kannonnostomenetelmien ero oli päinvastainen.



Kuva 8. Kantomurskeen palakokojakaumat kannonostomenetelmittain ja tutkimuskohteittain.



Kuva 9. Kantomurskeen palakokojakaumat kannonostomenetelmittain.

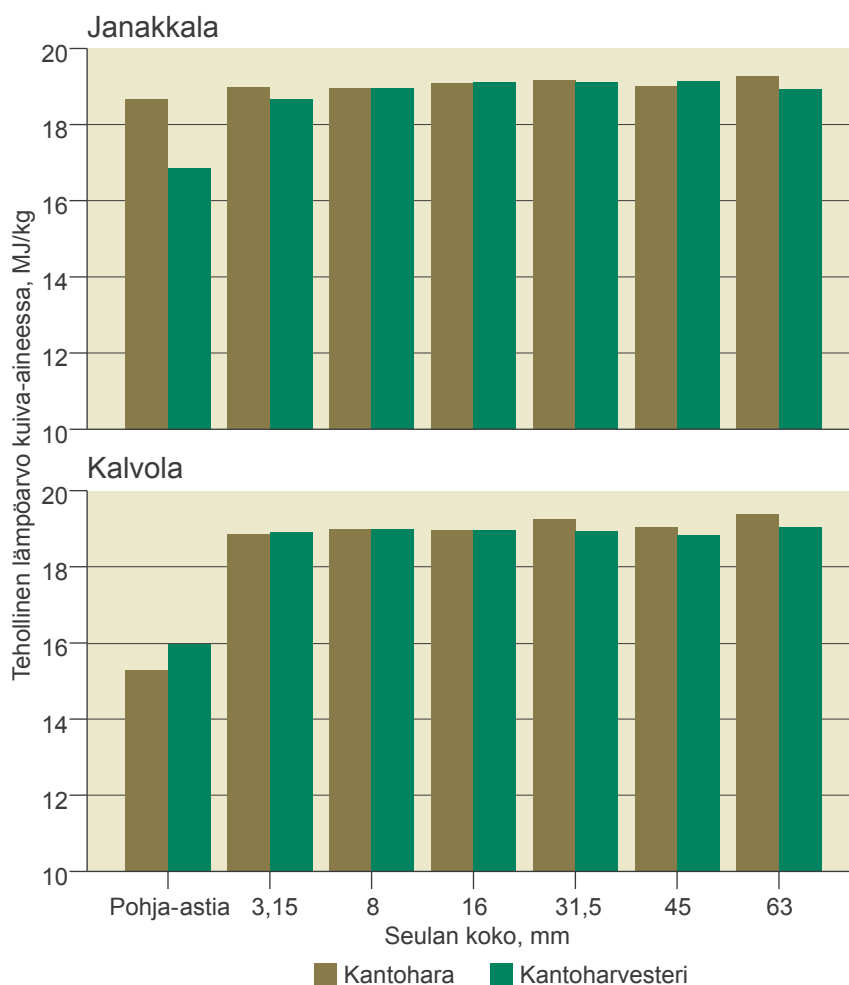
3.3 Lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

3.3.1 Seulottujen näytteiden lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

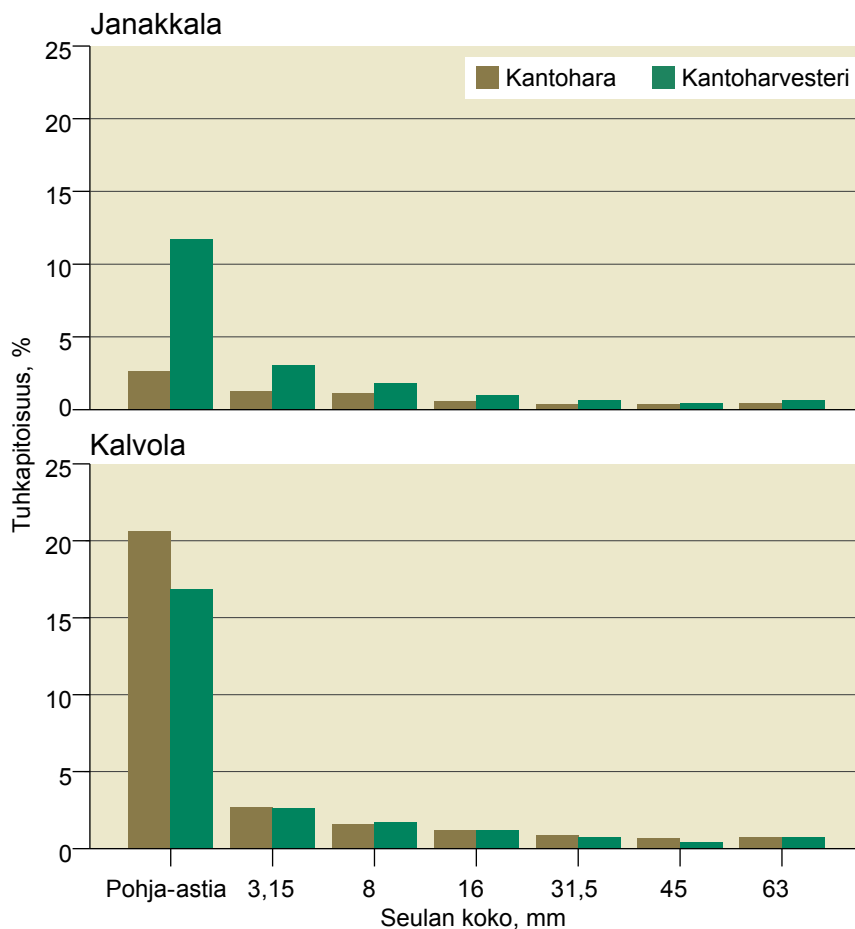
Palakooltaan erikokoisten jakeiden tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (kuva 10) oli 15,3–19,4 MJ/kg. Ainoastaan pienimmän jakeen (pohja-astia) lämpöarvo oli muita alempi; suuremmissa jakeissa lämpöarvon vaihtelu oli hyvin vähäistä. Tehollisessa lämpöarvossa ei ollut eroa kannonostomenetelmien ja tutkimuskohteiden välillä palakooltaan pienintä ositetta lukuun ottamatta (kuva 10).

Tuhkapitoisuus eri jakeilla oli 0,4–20,6 prosenttia ja se laski huomattavasti palakoon kasvaessa (kuva 11). Pohja-astian tuhkapitoisuus oli selvästi muita ositteita suurempi. Kalvolan tutkimuskohteella palakooltaan pienimmän ositteen tehollinen lämpöarvo oli alempi ja vastaavasti tuhkapitoisuus korkeampi kuin Janakkalan tutkimuskohteella.

Kantoharvesterilla korjatun kantuun tuhkapitoisuus Janakkalan tutkimuskohteella oli kaikilla palakokojakeilla samalla tasolla tai korkeampi kuin kantoharalla korjatun. Ero oli suurin pienimmällä palakoon ositteella, jossa tuhkapitoisuus kantoharvesterilla oli noin 12 prosenttia ja kanto-



Kuva 10. Seulottujen kantomurskenäytteiden tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa (MJ/kg) kannonostomenetelmän ja tutkimuskohteen mukaan.



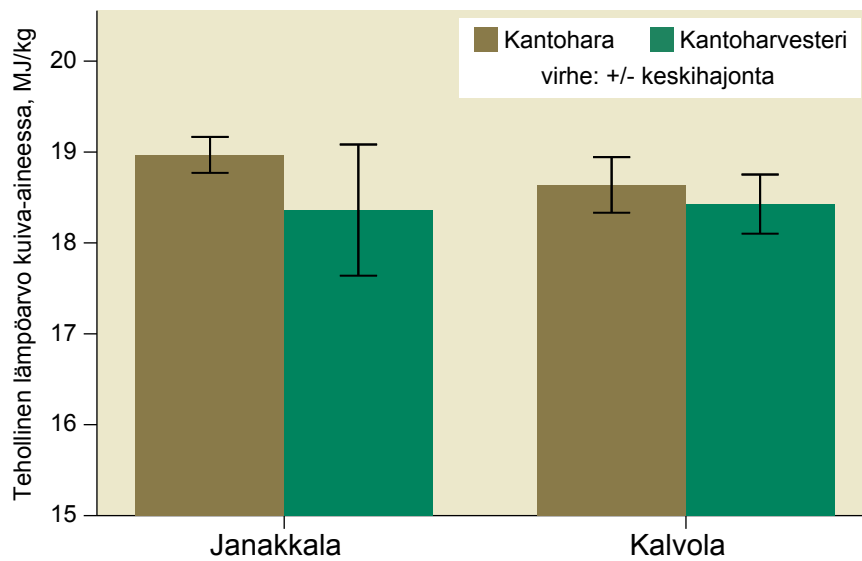
Kuva 11. Seulottujen kantomurskenäytteiden tuhkapitoisuudet kannonnostomenetelmän ja tutkimuskohteen mukaan.

haralla noin kolme prosenttia. Vastaava ero oli nähtävissä kantoharvesterilla korjatun kantuun alempana lämpöarvona (kuva 10). Vastaavia eroja kannonnostomenetelmien välillä ei havaittu Kalvolan tutkimuskohteella.

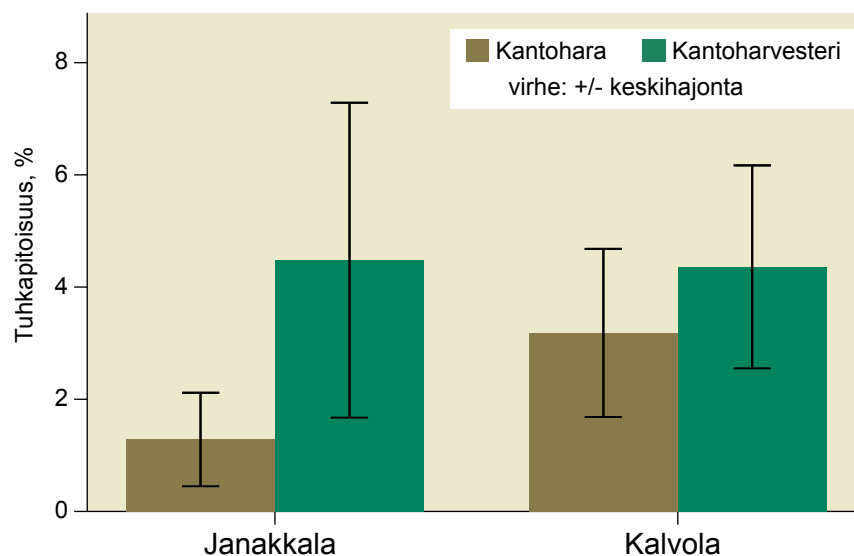
3.3.2 Seulomattomien näytteiden lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

Janakkalan tutkimuskohteella tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli kantoharalla korjatulla kantuulla keskimäärin 19,0 MJ/kg ja kantoharvesterilla 18,4 MJ/kg (kuva 12). Ero menetelmien välillä oli tilastollisesti erittäin merkitsevä ($p < 0,001$). Kalvolassa vastaavat arvot olivat 18,6 MJ/kg ja 18,4 MJ/kg. Tutkimuskohteilla yhteensä tehollisen lämpöarvon keskiarvo kuiva-aineessa oli kantoharalla nostetuilla kannoilla 18,8 MJ/kg ja harvesterilla nostetuilla kannoilla 18,4 MJ/kg. Lämpöarvon keskihajonta oli kantoharvesterilla 0,55 MJ/kg ja kantoharalla 0,33 MJ/kg.

Janakkalassa kantoharalla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli 1,3 prosenttia ja kantoharvesterilla nostettujen 4,5 prosenttia (kuva 13). Ero oli tilastollisesti merkitsevä ($p < 0,001$). Kalvolassa ero tuhkapitoisuudessa menetelmien välillä oli pienempi; kantoharalla tuhkapitoisuus oli 3,2 prosenttia ja kantoharvesterilla 4,4 prosenttia. Kantoharvesterilla tuhkapitoisuus molemmissa tutkimuskohteissa oli lähes sama, kun kantoharalla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli Kalvolassa yli kaksinkertainen Janakkalan tuhkapitoisuuteen verrattuna (kuva 13). Yleisesti ottaen kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus (keskiarvo 4,4 %) oli suurempi kuin kantoharalla



Kuva 12. Seulomattomien kantomurskenäytteiden tehollisen lämpöarvon keskiarvo ja keskihajonta kannonnostomenetelmittäin ja tutkimuskohteittain.

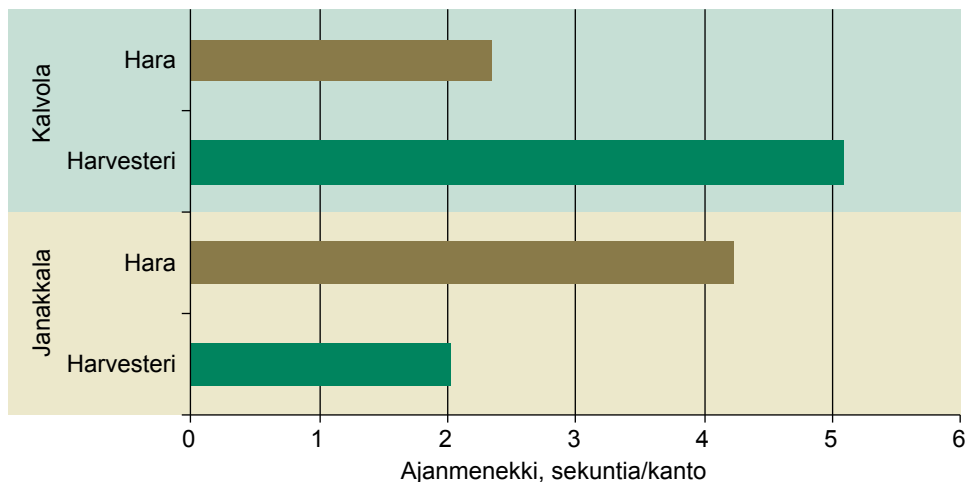


Kuva 13. Seulomattomien kantomurskenäytteiden tuhkapitoisuus ja sen keskihajonta kannonnostomenetelmittäin ja tutkimuskohteittain.

nostettujen kantojen (keskiarvo 2,2 %) ja kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuuden vaihtelu (keskihajonta 2,3 %) oli suurempi kuin kantoharalla nostettujen kantojen (keskihajonta 1,5 %) (kuva 13).

3.3.3 Puhdistukseen käytetyn ajan vaikutus epäpuhtauksiin

Janakkalan kivisellä tutkimuskohteella kantoharvesterilla ei tehty kantopalojen ravistelua käytännössä lainkaan, vaan kannot ainoastaan paloiteltiin. Tällä kantopuuerällä nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli suurin (4,5 %) (kuva 13). Samalla tutkimuskohteella kantohara käytti puhdistukseen kaksinkertaisen ajan (kuva 14) ja vastaavasti tuhkapitoisuus on huomattavasti alempi (1,3 %). Myös lämpöarvo (kuva 12) Janakkalassa erosi kannonnostomenetelmien välillä tilastollisesti merkitsevästi.



Kuva 14. Kantoharan ja kantoharvesterin kantokohtainen paloittelun ja puhdistuksen ajanmenekki tutkimuskohteittain.

Kalvolassa, vähäkivisellä tutkimuskohteella, kantoharvesteri käytti puhdistukseen kaksinkertaisen ajan kantoharaan nähden (kuva 14). Kantoharvesterilla nostettujen kantojen tuhkapitoisuus (kuva 13) oli silti korkeampi kuin kantoharalla nostettujen. Tehollinen lämpöarvo oli kantoharvesterilla korjatuilla kannoilla alempi kuin kantoharvesterilla nostetuilla (kuva 12).

4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tässä tapaustutkimuksessa tutkittiin kannonnostomenetelmän sekä puhdistukseen käytettävän ajan vaikutuksia kantuun epäpuhtauksien määrään. Tutkimusmenetelmä perustui kantomurskenäytteiden palakokojakauman, tehollisen lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden määrittämiseen sekä työaikatutkimukseen. Pienten jakeiden osuus, tehollisen lämpöarvon aleneminen ja tuhkapitoisuuden lisääntyminen indikoivat epäpuhtauksien määrän lisääntymistä.

Laurilan ja Lauhasen (2010) tutkimuksessa kuusen kantuun tehollinen lämpöarvo kolmen vuoden varastoinnin jälkeen oli 18,9 MJ/kg. Anerudin ja Jirjksen (2011) mukaan tuoreiden kuusen kantojen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa eri nostomenetelmillä oli 17,8 MJ/kg ja 18,5 MJ/kg ja reilun vuoden varastoinnin päätyttyä se oli 18,8 MJ/kg. Tässä tutkimuksessa kantuun tehollisen lämpöarvon keskiarvo kaikille havainnoille oli 18,7 MJ/kg, mikä vastasi aiemmissä tutkimuksissa saatuja havaintoja.

Palakokojakaumissa keskikokoiset jakeet (16–31,5 mm) muodostivat selvästi suurimman osuuden. Pienimmän jakeen (<3,15 mm) osuus massasta oli noin viisi prosenttia ja kahden pienimmän (<8 mm) alle 20 prosenttia. Jakeiden massaosuudet erosivat tutkimuskohteiden välillä, mutta kannonnostomenetelmien välillä selvää eroa ei ollut.

Koska palakooltaan pienimmän jakeen kuivamassaosuus oli pieni, epäpuhtauksien suuremman määrän merkitys koko kantuun ominaisuuksia ajatellen oli hyvin vähäinen. Pienimmän jakeen tehollinen lämpöarvo oli alempi ja tuhkapitoisuus suurempi kuin muiden ositteiden. Tämä ilmentää raekooltaan pienten epäpuhtauksien kertymistä tähän ositteeseen.

Anerudin ja Jirjksen (2011) tutkimuksessa varastoinnilla tai kannonnostomenetelmällä ei ollut tilastollisesti merkitsevää vaikutusta lämpöarvoon. Sen sijaan eri menetelmillä nostettujen kantojen tuhkapitoisuus erosi merkittävästi jokaisella tutkimuskohteella. Anerudin ja Jirjksen tutkimuksessa (2011) tuhkapitoisuus laski selvästi varastoinnin aikana ollen alussa 1,4–7 prosenttia ja reilun vuoden varastoinnin päätyttyä kaikilla menetelmillä nostettujen kantojen tuhkapitoisuus oli laskenut alle prosenttiin. Erkkilän ym. (2011) mukaan pilkottujen kuusen kantojen tuhkapitoisuus viikko noston jälkeen oli 1,1–4,2 prosenttia. Tässä tutkimuksessa kantopuuerien tuhkapitoisuudet olivat varastointiajan jälkeen hieman korkeampia (3,2–4,5 %). Metsäntutkimuslaitoksessa kerätyssä aineistossa (Lindblad 2007, julkaisematon) kantopuun tuhkapitoisuuden eräkohtainen keskiarvo käyttöpaikkaan toimitettaessa oli 2,0–5,9 prosenttia ja keskihajonta 4,5 prosenttia.

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 vaikuttaa ratkaisevasti kantopalojen puhtauteen heti kannonnoston jälkeen. Epäpuhtauksien lopullinen määrä käyttöpaikalla riippuu maalajin lisäksi kantojen käsittelystä, kuljetuksesta ja varastointiajan olosuhteista. 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, että Janakkalan kantojen epäpuhtaudet ovat vähentyneet noin vuoden pitemmän varastointiajan kuluessa. Tämän tutkimuksen aineisto oli kuitenkin verraten pieni, joten päätelmät kannonnostomenetelmän vaikutuksesta epäpuhtauksien määrään on tehtävä varauksin.

Työtavan vaikutuksen tutkimiseen liittyy tiettyjä haasteita. Paloittelu-puhdistus- ja kasaustyövaiheiden erottaminen toisistaan reaaliaikaisen kellotuksen yhteydessä on haastavaa, koska kantojen ravistelua voidaan tehdä myös kasauksen aikana. Lisäksi kantoharvesterilla on mahdollista kasauksen aikana tehdä myös kantojen paloittelua.

Kannonnostomenetelmien ja työtavan vaikutusten tutkimista epäpuhtauksien määrään tulisi jatkaa eri maalajeilla toteutettavilla kannonnostokohteilla. Erityisesti tutkimus tulisi suunnata kohteille, joissa puhdistuksen osuus kannonnostoon käytetystä ajasta saattaa nousta korkeaksi. Tämän tutkimuksen kannonnostokohteet sijaitsivat hiekkamoreenimailla, joissa huolellinenkin kantopalojen puhdistus oli verrattain nopeaa. Myös erilaisten toimenpiteiden, kuten palstalla kuivauksen ja tiensivavarastoinnin vaikutusta epäpuhtauksien määrään kantomurskeen hankintaketjun eri vaiheissa tulisi tutkia, jotta kantopalojen puhtauteen vaikuttavien tekijöiden merkitys hankintaketjussa tunnettaisiin ja kustannustehokkaimmat epäpuhtauksien hallintamenetelmät saataisiin käyttöön.

Kirjallisuus

- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. 172 s. + 17 s.
- 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.
- 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. 1975. Kanto- ja juuripuun kuoriprosentti, puuaineen tiheys ja asetoniutteiden määrä. *Folia Forestalia* 224. 14 s.
- Hakkila, P. 1976. Kantopuu metsäteollisuuden raaka-aineena. *Folia Forestalia* 292. 39 s.
- Hakkila, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. *Folia Forestalia* 342. 38 s.
- Hakkila, P. 1989. Utilization of Residual Forest Biomass. Springer Series on Wood Science, Springer Verlag. 568 s.
- Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999-2003. Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraaportti 5/2004. Tekes. 135 s.
- Hakkila, P., Nurmi, J. & Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energianlähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684. 68 s.
- Hakkila, P. & 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.
- Jouhiahio, A. & Mutikainen, A. 2010. Mäntykantojen nosto kantoharalla ja kantoharvesterilla. TTS tutkimuksen tiedote 9/2010 (745). 6 s.
- Jouhiahio, A., Rieppo, K. & Mutikainen, A. 2010. Kantoharan ja kantoharvesterin tuottavuus ja kustannukset. TTS tutkimuksen tiedote 2/2010 (738). 8 s.
- Kärhä, K. 2007. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. Summary: Production machinery for forest chips in Finland in 2007 and in the future. *Metsätehon katsaus* 28/2007. 4 s.
- Kärhä, K., Mutikainen, A. & Kortelahti, I. 2009a. Järvisen kannonnostolaitteen työntutkimukset päätehakkuukuusikossa. *Metsätehon tuloskalvosarja* 8/2009.
- Kärhä, K., Mutikainen, A. & Kortelahti, I. 2009b. Väkevä-kantopilkkuri Metsätehon ja TTS tutkimuksen pikatestissä. *Metsätehon tuloskalvosarja* 12/2009.
- Kärkkäinen, M. 2007. Puun rakenne ja ominaisuudet. *Metsäkustannus Oy*. 468 s.
- Laitila, J., Ala-Fossi, A., Vartiamäki, T., Ranta, T. & Asikainen, A. 2007. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen tuottavuus. *Metlan työraportteja* 46. 26 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.
- Ylitalo, E. 2012. Puun energiakäyttö 2011. Metsätilastotiedote (SVT Maa-, metsä- ja kalatalous) 16/2012. 7 s.