



Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen

Kirjoittajat: Ari Erkkilä, Kari Hillebrand, Jyrki Raitila, Matti Virkkunen, Antti Heikkinen, Ismo Tiihonen, Heikki Kaipainen

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Keski-Suomen metsäkeskus Ari Nikkola, PL 39 (Kauppakatu 19B), 40101 Jyväskylä		Asiakkaan viite
Projektin nimi Metsäenergian uudet mahdollisuudet ja niiden kehittäminen		Projektin numero/lyhytnimi 26121/Metsäenergia
Raportin laatija(t) Ari Erkkilä, Kari Hillebrand, Jyrki Raitila, Matti Virkkunen, Antti Heikkinen, Ismo Tiihonen, Heikki Kaipainen		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 52/2
Avainsanat Energiapuu, kanto, kuivuminen, varastointi, kuljetus		Raportin numero VTT-R-10151-10
Tiivistelmä <p>Projektin tavoitteina olivat energiapuun korjuun tehostaminen ensiharvennusleimikoista paalaustekniikan avulla, mäntykantojen nostoon sekä maa- ja kiviaineksen erottamiseen soveltuvan kantojen korjuuteknologian kehittäminen sekä varastoidun energiapuun laadun parantaminen ja välivarastohävikin vähentäminen.</p> <p>Kokopuun paalauksen optimaalinen toiminta-alue on ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7 – 10 cm. Kokopuun paalauksen suhteellinen vahvuus on kuitu- ja energiapuun yhdistetyssä hankinnassa, mutta kustannuskilpailukyky näyttää suhteellisen heikolta verrattuna esimerkiksi aines- ja energiapuun integroituun hankintaan kahden kasan menetelmällä.</p> <p>Energiapuupaalien keskimääräinen kuljetusmatka optimaalisilta leimikoilta Keski-Suomessa on 80 km, kun käyttöpaikka on Jyväskylässä. Suoran autokuljetuksen kuljetuskustannus tälle matkalle on 6,20 €/m³. Junakuljetus on autokuljetusta edullisempaa jo yli 65 km:n kuljetusmatkoilla, mikäli autolla tapahtuva alkukuljetusmatka on korkeintaan 30 km.</p> <p>Xteho-yksiotekantoharvesterin tehotuntituottavuus (4,7 m³/h) mäntykantojen nostossa oli 42 % parempi kuin kantoharan (3,3 m³/h). Mäntykantojen läpimitat olivat keskimäärin 28 cm. Suurimmat kannot olivat läpimitaltaan 45 cm. Myös kantoharalla voitiin nostaa ja puhdistaa mäntykantoja, mutta aikaa kului enemmän. Puuaineksen osuus nostettujen kantojen tuoremassasta oli molemmilla koneilla 95 – 96 %. Xteho oli läpimitaltaan 30 cm:n kannoilla noin 40 % ja 40 cm:n kannoilla lähes 60 % tehokkaampi kuusi- kuin mäntykantojen nostossa. Kuusen juurakot puhdistuivat helpommin. Tehotuntituottavuus oli yli 12 m³/h kuusikannon läpimitan ollessa 40 cm. Kantojen lähikuljetuksen tuottavuudet olivat 8,3 – 8,9 m³/h. Varastokausien 2009 – 2010 jälkeen mänty- ja kuusikantomurskenäytteiden tuhkapitoisuus oli vain 2 – 7 % ja kosteus 20 – 26 %. Mäntykantopalojen kosteus kolmen viikon kuivumisen jälkeen palstalla kesällä 2010 oli 22 – 26 %.</p> <p>Energiapuun kuivaus- ja varastointitutkimuksessa seurattiin kokopuun varastokasoja erilaisissa ympäristöissä. Ensimmäisen kevään ja kesän aikana energiapuun keskimääräinen kosteus aleni lähes 40 prosenttiin, mutta nousi talven aikana noin 5 %-yksikköä. Seuraavan vuoden loppusyksyllä kosteus oli alentunut noin 32 prosenttiin. Varastokasan sijainti ja ympäristö vaikuttavat energiapuun kuivumiseen merkittävästi. Terminaalissa kevään ja kesän aikana energiapuu kuivuu nopeammin kuin metsätien varressa, mutta kastuu myös helpommin syksyn ja talven aikana.</p> <p>Peitetyt energiapuukasat olivat ensimmäisen kesän jälkeen noin 6 %-yksikköä kuivempia kuin peittämättömät kasat. Seuraavana kesänä kosteusero oli 12 – 15 %-yksikköä ja syyskuun lopussa 9 – 11 %-yksikköä. Peitettynä energiapuun kosteus laski alle 30 prosentin. Kokopuupaalikaasa sekä kuivui että myös kastui hieman helpommin kuin irtokokopuukasa. Tulos perustuu hyvin suppeaan aineistoon ja tulosta on pidettävä vain suuntaa antavana.</p> <p>Mitatut varastohävikit olivat kahdesta neljään prosenttiin varaston kokonaismassasta. Varastohävikistä noin 60 % muodostuu isoista puunosista ja risuista. Kantopuun kosteuden muutoksia seurattiin sekä palstakasoissa että suurissa varastokasoissa, joille kummallekin muodostettiin laskentamallit kosteuden muutoksen ennustamiseen.</p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Jyväskylä 25.2.2011 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Ari Erkkilä, erikoistutkija	Jyrki Raitila, tiimipäällikkö	Jouni Hämäläinen, teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot VTT, (Koivurannantie 1), PL 1603, 40101 Jyväskylä		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Keski-Suomen metsäkeskus, VTT		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

Alkusanat

Tutkimusraporttiin on koottu VTT:n tulokset *Metsäenergian uudet mahdollisuudet ja niiden kehittäminen 2008 - 2010* -projektista, joka toteutettiin Keski-Suomen *Bioenergiasta elinvoimaa* (BEV) -klusteriohjelmassa.

Metsäkeskus Keski-Suomen johtamassa projektissa tutkimuksellinen kehittämistyö hankittiin VTT:stä kilpailutettuna ostopalveluna Metsäkeskuksen itse vastatessa hankkeen muista tehtävistä. VTT:n osuuteen osallistuivat vastuullisena johtajana erikoistutkija Ari Erkkilä, erikoistutkija Kari Hillebrand, tiimipäällikkö Jyrki Raitila, tutkijat Matti Virkkunen ja Antti Heikkinen sekä tutkimusinsinöörit Ismo Tiihonen ja Heikki Kaipainen. Mäntykantojen nostoon liittyvässä tutkimusosiossa avusti Mikkelin ammattikorkeakoulun opiskelija Hannu Havu. Energiapuun paalausketjun tutkimuksessa tehtiin yhteistyötä Metsäteho Oy:n tutkimushankkeen kanssa, jossa yhteyshenkilönä oli erikoistutkija Kalle Kärhä. Kantojen noston tutkimuksessa Metsäntutkimuslaitoksen varttunut tutkija Juha Laitila laati selvityksen nykyisten kannonnostomenetelmien soveltuvuudesta mäntykantojen nostoon.

Hankkeen päärahoittaja oli Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahasto. Muita rahoittajia olivat Vapo Oy, Jyväskylän Energia Oy, Stora Enso ja Metsähallitus. Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat puheenjohtajana Ari Eini (Metsäkeskus Keski-Suomi), Ari Nikkola (Metsäkeskus Keski-Suomi), Jyrki Raitila (Metsäkeskus/VTT), Ari Erkkilä (VTT), Markku Paananen (JAMK), Risto Janhunen (ELY-keskus), Heikki Savolainen (Metsähallitus), Kari Kuusniemi (Mhy Päijänne), Pauli Rintala (Metsänomistajien liitto Järvi-Suomi), Juhani Juvonen (Vapo Oy) ja Tapo Lehtoranta, myöhemmin Ahti Weijo (Jyväskylän Energia Oy).

Esitämme parhaat kiitokset työn tilaajalle, rahoittajille, ohjausryhmän jäsenille ja kaikille muille työhön osallistuneille.

Jyväskylä 25.2.2011

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	4
1.1 Metsähakkeen tuotanto ja käyttö Keski-Suomessa.....	4
1.2 Projektin tavoite	5
2 Energiapuun korjuu ensiharvennusleimikoista	5
2.1 Paalaintekniikan soveltuvuus ja korjuuketjun kannattavuus energiapuun korjuussa	5
2.2 Energiapuupaalien laadun parantaminen	7
2.2.1 Tausta.....	7
2.2.2 Toteutus.....	7
2.2.3 Tulokset	9
2.3 Energiapuupaalien kuljetuslogistiikka Keski-Suomessa.....	11
2.3.1 Energiapuupaalien kertymä ja autokuljetuskustannukset	11
2.3.2 Energiapuupaalien auto- ja rautatiekuljetuskustannusten vertailu	14
3 Kantojen uusi korjuuteknologia.....	15
3.1 Nykyisten kannonnostomenetelmien soveltuvuus mäntykantojen nostoon...	15
3.2 Mäntykantojen korjuu- ja kuljetustutkimus	17
3.2.1 Tausta ja tavoite.....	17
3.2.2 Kantojen noston aikatutkimukset	17
3.2.3 Kantojen lähikuljetuksen aikatutkimus	22
3.2.4 Kantojen laatu ja puhtaus	26
3.2.5 Tulosten tarkastelu.....	29
4 Energiapuun kuivaus ja varastohävikin vähentäminen.....	31
4.1 Kuivaus- ja varastointitekniikoiden vaikutukset energiapuun kosteuteen ja varastohävikkiin	31
4.1.1 Vallinnut säätila.....	32
4.1.2 Energiapuun kuivuminen varastossa	32
4.1.3 Varastohävikki.....	37
4.1.4 Kantojen kuivuminen.....	38
4.2 Yhteenveto aikaisemmin tehdyistä energiapuun kuivaus- ja varastointitutkimuksista.....	42
4.3 Välivarastossa olevien kantojen ja muun energiapuun kosteuden mittausselityksen selvittäminen.....	42
5 Johtopäätökset	45
Yhteenveto	47
Lähdeviitteet	51
Liite	

1 Johdanto

1.1 Metsähakkeen tuotanto ja käyttö Keski-Suomessa

Metsästä saatavan bioenergian käyttö on viime vuosina kasvanut ripeästi ja kasvu on koostunut varsinkin päätehakkUILTA korjattavasta latvusmassahakkeesta. Keski-Suomessa käytetään metsähaketta (hakkuutähteet, kannot ja runkopuu) Suomen maakunnista eniten eli 820.000 m³ (1,6 TWh) (Metsätilastotiedote 2009). Keski-Suomen Metsäkeskuksen tekemien Tapion energiapuun korjuusuositusten mukaisten laskelmien perusteella maakunnan alueella on vuoteen 2025 mennessä korjattavissa 1,8 Mm³ (3,5 TWh) metsähaketta vuosittain. Vaikka potentiaalia on vielä runsaasti käyttämättä, on huomattava, että kuusen päätehakkuit vähenevät vuoden 2025 jälkeen selvästi. Tällöin edullisimman jakeen, kuusen hakkuutähteet, osuutta on vaikeampi kasvattaa nykyisestä. Kokonaisuutena energiapuun korjuun kannattavuutta ja metsähakkeen laatua on tarve vielä parantaa hintakilpailukyvyyn lisäämiseksi.

Suhteellisesti eniten hyödyntämätöntä energiapuupotentiaalia on nuorissa kasvatusmetsissä. Pääasiallisena ongelmana ovat korkeat korjuukustannukset ja korjuutyön laatu. Korjuuta tehostamalla voidaan kustannuksia pienentää ja samalla kasvattaa taloudellisesti korjattavissa olevaa energiapuumäärää. Oikealla leimikon kohdevalinnalla, koulutuksella ja neuvonnalla voidaan välttää korjuusta aiheutuvia vaurioita.

Nykyisin kantoja nostetaan lähes yksinomaan kuusivaltaisilta leimikoilta, vaikka Tapion energianpuun korjuusuositusten mukaan myös mäntykannot voidaan nostaa puolukkatyyppin (VT) ja sitä rehevämpien maapohjien leimikoilta aiheuttamatta liian suuren ravinnehävikin riskiä (Äijälä ym. 2010). Syyksi sille, miksei mäntykantoja juurikaan ole kerätty, on yleensä esitetty, että mäntyjen kannot ovat kuusten kantoja lujemmin kiinnittyneet maaperään ja vaikeammin puhdistettavissa. Viime vuosina markkinoille on kuitenkin tullut laitteita, jotka soveltuvat periaatteessa kaikkien kantojen irrottamiseen. Latvusmassan ja kantopuun korjuu muodostavat kokonaisen korjuuketjun, sillä kannonnosto edellyttää hakkuutähteiden keruuta palstalta. Näin ollen kyseisten korjuuketjujen kehittäminen lisää hyödynnettävissä olevan energiapuun määrää niin kantojen kuin latvusmassan osalta.

Energiapuun pitkäaikainen varastointi vaikuttaa puuaineksen kosteuteen sekä varastohävikkiin. Kaatotuoreen puun kosteus on 50 - 60 %, mikä energiakäytön kannalta on yleensä liian korkea. Suurissa laitoksissa kostea polttoaine ei välttämättä ole niin suuri ongelma, mutta pienissä aluelämpölaitoksissa ja kiinteistölämpökeskuksissa poltettavan puupolttoaineen tulee olla kuivaa. Poltettaessa haketta alle 1 MW:n tehoisissa laitoksissa kosteus ei saisi ylittää 40 %. Puupolttoaineen käyttö pienissä laitoksissa edellyttääkin tavallisesti kuivaamista jossakin tuotantoketjun vaiheessa. Kuivauksella lisätään puun lämpöarvoa ja alennetaan suhteellisia kuljetuskustannuksia (€/MWh). Toisaalta puun varastointi ja puun siirtely aiheuttavat varastohävikkiä.

Aikaisemmissa tutkimuksissa, kuten myös käytännössä, on huomattu, kuinka energiapuun kuivauksella ja varastoinnilla voidaan vaikuttaa polttoaineen laatuun. Laatuominaisuuksista tärkein on kosteus. Jos puun kosteutta pystytään alentamaan 55 %:sta 40 %:iin, puun alkuperäinen vesimäärä puolittuu, jolloin tehollinen lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti kasvaa lähes 10 %.

1.2 Projektin tavoite

Tämä tutkimus oli osana *Metsäenergian uudet mahdollisuudet ja niiden kehittäminen 2008 - 2010* –hanketta, jonka yleisenä tavoitteena oli lisätä ja kehittää energiapuun hankintaa ja korjuuta Keski-Suomen lisääntyviä käyttötarpeita vastaaviksi. Hankkeen tavoitteisiin pyrittiin tutkimus- ja kehittämistyön sekä laajan tiedotuksen ja koulutuksen avulla.

Tutkimus- ja kehittämistyön tarkempina tavoitteina olivat ensinnäkin energiapuun korjuun tehostaminen ensiharvennusleimikoista ja etenkin nuoren metsän hoitokohteista paalausmekaniikan avulla. Toiseksi pyrkimyksenä oli edistää kantojen korjuuteknologiaa, joka soveltuu myös mäntykantojen nostoon sekä maa- ja kiviaineksen erottamiseen kyseisistä kannoista ja juurakoista. Kolmantena tavoitteena oli tutkimuksen avulla parantaa varastoidun energiapuun laatua ja vähentää välivarastohävikkiä.

2 Energiapuun korjuu ensiharvennusleimikoista

2.1 Paalainetekniikan soveltuvuus ja korjuuketjun kannattavuus energiapuun korjuussa

Tehtävä toteutettiin yhteistyössä Metsäteho Oy:n johdolla käynnissä olleen ”Aines- ja energiapuun hankinnan integrointi paalausmenetelmällä” – tutkimushankkeen kanssa. Tulokset on raportoitu tarkemmin Metsätehon raportissa 211 ”Kokopuun paalaus -tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset” (Kärhä ym. 2009).

Tutkimushankkeessa selvitettiin Fixteri II -kokopuupaalaimen perustuvan aines- ja energiapuun hankinnan kilpailukykyä. Hankkeen tavoitteet olivat *i*) selvittää kokopuupaalien ominaisuudet ja niiden yhteys puustotunnuksiin, *ii*) tuottaa tuottavuusperusteet kokopuun paalaukseen sekä kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetukseen ja *iii*) määrittää hankintakustannukset kokopuun paalaus -tuotantoketjussa ja verrata kustannuksia muiden aines- ja energiapuun hankintaketjujen kustannuksiin sekä selvittää optimaalinen käyttöalue kokopuun paalaus -tuotantoketjulle.

Tutkimuksessa mitattujen kokopuupaalien keskiläpimitta oli 65 cm ja keskipituus 268 cm. Paalauksen aikatutkimuskoealoilta korjattujen kokopuupaalien tuoremassa oli keskimäärin 476 kg. Paalien kiintotilavuus oli keskimäärin 495 dm³, josta oksien osuus oli keskimäärin 17 %. Poistuman keskijäreiden kasvaessa kokopuupaalien koko kasvoi.

Tutkimuksessa Fixteri II -kokopuupaalaimen tehotuntuottavuus oli huomattavasti korkeampi kuin ensimmäisen prototyypipaalaimen (Fixteri I).

Poistuman keskikoon kasvu 20 dm^3 :stä 75 dm^3 :ään lähes kaksinkertaisti kokopuun paalauksen tehotuntuottavuuden Fixteri II -paalaimella: kun poistuma oli 20 dm^3 , kokopuun paalauksen tehotuntuottavuus oli $3,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ja 75 dm^3 :n kokopuulla $6,1 \text{ m}^3/\text{h}$.

Kokopuun paalauksen tuottavuuden huomattavaa paranemista voidaan selittää sillä, että uudella Fixteri-hakkuulaitteella pystyttiin syöttämään puut hakkuun ja taakan keruun jälkeen suoraan paalaimen ilman erillistä välikasausta ja kuormausta. Lisäksi paalaimen kuljettaja hyödynsi hakkuutyössä tehokkaasti joukkokäsittelyä: joukkokäsittelyprosentti oli keskimäärin 80 % ja keskimääräinen taakkakoko oli 2,9 puuta/taakka. Työvaiheita pystyttiin myös lomittamaan hyvin toisiinsa.

Kokopuiden paalaus suurensi taakkakokoa kuormaus- ja purkutyössä sekä kasvatti kuormakokoa metsäkuljetuksessa. Aikatutkimuksessa kuormakoko oli keskimäärin 22 kokopuupaalia. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus oli $23,8 \text{ m}^3$ tehotunnissa, kun kuormakoko oli 22 kokopuupaalia (paalin koko $0,5 \text{ m}^3$), kokopuukertymä $60 \text{ m}^3/\text{ha}$ ja metsäkuljetusmatka 300 m.

Kuormakoon kasvattaminen 22 kokopuupaalista 29 kokopuupaaliin lisäsi metsäkuljetuksen tuottavuutta $2,8 \text{ m}^3$ tehotunnissa, kun metsäkuljetusmatka oli 300 metriä. Vastaavasti kuormakoon pieneneminen 22 kokopuupaalista 15 kokopuupaaliin laski tuottavuutta $4,0 \text{ m}^3$ tehotunnissa. Kun kuormakoko oli 22 kokopuupaalia, kokopuupaalin koon pieneneminen $0,5 \text{ m}^3$:stä $0,4$ kiintokuutiometriin laski metsäkuljetuksen tuottavuutta 300 metrin metsäkuljetusmatkalla $4,8 \text{ m}^3$ tehotunnissa. Vastaavasti paalin kiintotilavuuden kasvu $0,5$:stä $0,6$ kiintokuutiometriin paransi metsäkuljetuksen tuottavuutta $4,8 \text{ m}^3$ tehotunnissa.

Kaukokuljetuksessa kokopuupaalien kuormausta ja purkua hidasti pieni taakkakoko (paalit olivat lyhyitä) pitkään (5 m) kuitupuuhun verrattuna, vaikka kuormakoko olikin likimain sama. Pitkällä kuitupuulla vetoautoon mahtui yksi puunippu ja perävanuun kaksi nippua. Kokopuupaaleilla vetoautoon oli kuormattava kaksi paalinippua ja perävanuun kolme, jotta saavutettiin likimain sama kuormakoko kuin pitkällä kuitupuulla. Viiden paalinipun sitomiseen ja kuormaliinojen avaamiseen meni puolestaan enemmän aikaa kuin kolmen kuitupuunipun sitomiseen ja liinojen avaamiseen. Lisäksi kokopuupaaleilla kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen on varattava huomattavasti enemmän aikaa kuin karsitulla kuitupuulla.

Tutkimuksessa laskettiin kokopuun paalaus -tuotantoketjun kustannukset ja niitä verrattiin vaihtoehtoisten tuotantoketjujen kustannuksiin pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun hankinnassa. Matalimmat kuitupuun hankintakustannukset saavutettiin aines- ja energiapuun integroidussa hankinnassa kahden kasan menetelmällä. Integroidussa hankinnassa myös kokopuuhakkeen kokonaiskustannukset olivat kilpailukykyiset. Energiapuupaaleista tehdyn polttihakkeen hankintakustannukset olivat korkeammat kuin erilliskorjatun tai integroidusti korjatun kokopuuhakkeen hankintakustannukset.

Tehdyt vertailulaskelmat osoittivat, että kokopuun paalaus -tuotantoketju on sitä kilpailukyisempi, mitä pienirunkoisempaa korjattava ensiharvennuskuitupuun on. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että kokopuun paalauksen optimaalinen

toiminta-alue on ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7 – 10 cm. Kokopuun paalauksen suhteellinen vahvuus on nimenomaan kuitu- ja energiapuun yhdistetyssä hankinnassa. Tehdyt kustannuslaskelmat osoittivat, että kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky pelkän energiapuun hankinnassa on heikko.

Vaikka kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky näyttää suhteellisen heikolta verrattuna esimerkiksi aines- ja energiapuun integroituun hankintaan kahden kasan menetelmällä, uudet puunkäyttäjät (esim. biojalostamot) saattavat luoda uusia mahdollisuuksia kokopuun paalaukseen perustuvalla tuotantoketjulle. Tämän vuoksi on ensiarvoisen tärkeää, että pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun korjuun kehitystyöhön panostetaan monella rintamalla; yksi mielenkiintoinen kehityslinja nyt ja tulevaisuudessa on kokopuun paalaus.

2.2 Energiapuupaalien laadun parantaminen

2.2.1 Tausta

Energiakäyttöön menevien nippujen kosteuden alentaminen jo metsässä tai tienvarsivarastolla kasvattaa kuljetettavan kuorman energiatiheyttä. Energiapuun kuivumista edistää puun kuoren riittävä rikkominen tai osittainen poistaminen paalauksen yhteydessä. Osittaisen kuorinnan vaikutusta karsitun energiapuun kuivaukseen on aiemmin tutkittu Tekesin rahoittamassa tutkimushankkeessa (Erkkilä et al. 2009, Röser et al. 2010). Kuoren riittävä poistaminen tai rikkominen nopeutti kuivumista verrattuna käsittelemättömän koivu- ja mäntyrungon kuivumiseen. Kokopuupaalien kuivuminen voisi samoin tehostua poistamalla tai rikkomalla kuorta riittävästi.

2.2.2 Toteutus

Kuoren rikkoutumista pyrittiin lisäämään syöttörullien puristuspainetta kasvattamalla, jolloin syöttörullien piikit (Kuva 2) rikkovat runkojen kuorta tavanomaista enemmän. Kokeissa valmistettiin vertailuksi tavanomaisia energiapuupaaleja ja suuremmalla syöttörullien puristuspainella käsiteltyjä paaleja kuivumis seuranta varten. Syöttörullien normaali käyttöpaine on normaalisti 13 baria. Korkeampi paine syöttörullille oli 23 baria, jota suurempi paine olisi katkonut runkoja. Paaleista otettiin alkukosteus- ja loppukosteusnäytteet. Paaleja myös punnittiin (Kuva 1). Seurannan lopussa otettiin kosteusnäytteiden lisäksi kustakin paalista näytteet, joista määritettiin irronneen tai rikkoutuneen kuoren osuus. Kustakin paalista sahattiin poikkileikkauksena klapit, joiden molemmista päistä mitattiin ympärysmitta ja ehjän kuoren mitta. Näistä laskettiin rikkoutuneen tai poistetun kuoren osuus. Paalit valmistettiin 17.6.2009, kuljetettiin varastokasaan 24.6.2009 ja seuranta lopetettiin 28.9.2010. Seurantapaaleiksi valittiin koivupaaleja ja mänty paaleja.



Kuva 1. Fixterillä valmistetun paalin punnitus 17.6.2009. Kuva: Ari Erkkilä



Kuva 2. Fixterin syöttörullat kokeiden aikana. Kuva: Ari Erkkilä



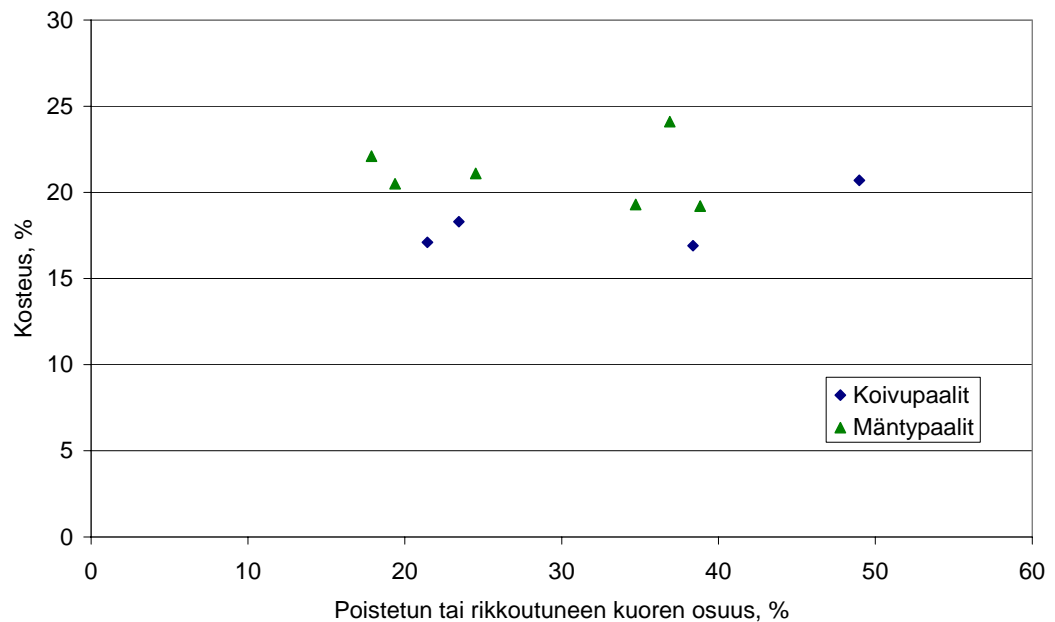
Kuva 3. Kosteusnäytteiden sahaaminen seurannan lopussa. Kuva: Ari Erkkilä

2.2.3 Tulokset

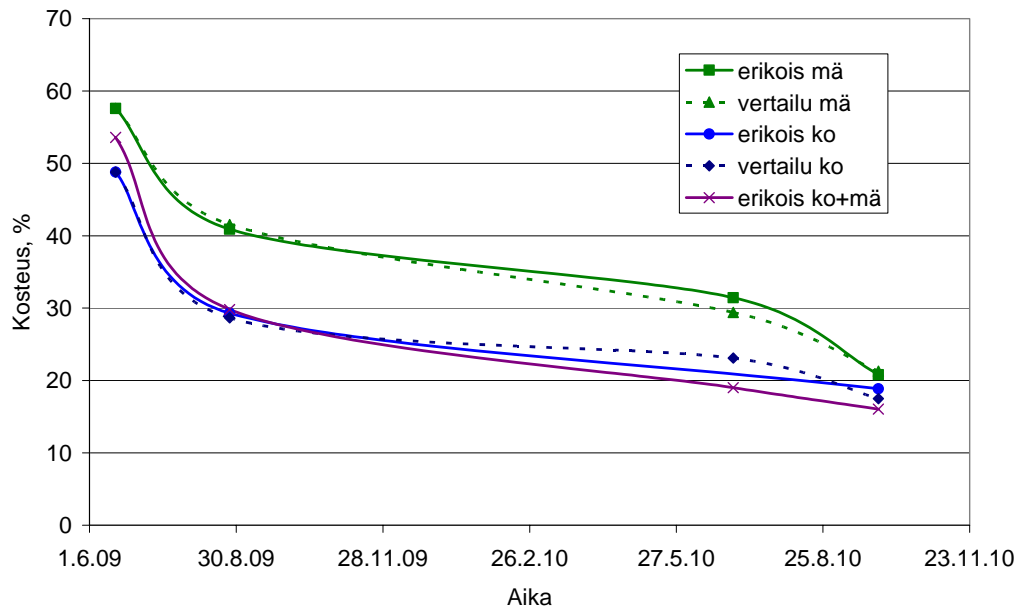
Seurantapaalien tiedot ja kuivumistulokset ovat taulukossa (Taulukko 1) ja kuvissa (Kuva 4 ja Kuva 5).

Taulukko 1. Seurantapaalien alku- ja loppukosteudet sekä rikutun tai kuoriutuneen pinnan osuus.

Paali	puulaji	syöttörullan puristupaine bar	alkukosteus %	loppukosteus %	rikotun tai poistetun kuoren osuus %	runkojen keskiläpimitta cm
V1	koivu	13	48.8	16.9	38.4	7.0
V2	koivu	13	48.8	18.3	23.4	6.9
V3	koivu	13	48.8	17.3		
E1	koivu	23	48.8	20.7	49.0	7.6
E2	koivu	23	48.8	17.1	21.4	7.1
E3	koivu + mänty	23	53.6	16.1		
V4	mänty	13	57.6	24.1	36.9	7.7
V5	mänty	13	57.6	19.3	34.7	7.1
V6	mänty	13	57.6	20.5	19.4	6.8
E4	mänty	23	57.6	21.1	24.5	7.8
E5	mänty	23	57.6	19.2	38.8	7.4
E6	mänty	23	57.6	22.1	17.9	7.5



Kuva 4. Seurantapaalien loppukosteudet ja kuoriutumisasasteet.



Kuva 5. Seurantapaalien kuivuminen 17.6.2009 – 28.9.2010. Tavanomaista suuremmalla syöttörullien puristuspaineella valmistetut paalit: erikois mä, erikois ko sekä erikois ko+mä.

Kuoren rikkoutumiseen ja irtoamiseen vaikuttaa syöttörullien ohella myös kolme rullaketjua, jotka pyörittävät paalia sidontavaiheessa. Paalissa ulommaisina olevat rungot kuoriutuvat ketjujen kohdilta etenkin nila-aikana. Kuoriutumistasetta ei mitattu ketjujen työstämästä kohdasta. Suuremmalla syöttörullien puristuspaineella ei saatu johdonmukaisesti aikaan suurempaa irronneen kuoren osuutta. Kuoriutuneen pinnan osuus oli tavanomaisesti valmistetuissa koivupaaleissa keskimäärin 30,9 % ja mäntypaaleissa 30,3 %. Suurempaa syöttörullien painetta käytettäessä kuoriutuneen pinnan osuus oli koivupaaleissa 35,2 %, ja mäntypaaleissa 27,0 %. Seurannassa olleiden paalien poistetun tai rikutun kuoren osuuden vaikutusta paalien loppukosteuteen ei voinut havaita. Runkojen keskiläpimittojen pieneltäkin vaikuttavat erot vaikuttavat myös osaltaan kuivumiseen. Talvella puun ollessa jäässä kuori ei irtoa yhtä hyvin, jolloin syöttörullien puristuspaineen vaikutus voi tulla paremmin esiin.

Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu manuaalisesti karsitun koivurungon kuivumisen nopeutuvan jo 5 – 10 %:n kuoriutumisen vaikutuksesta. Mäntyrunngolla kuivumisen selvään nopeutumiseen tarvitaan yli 30 %:n kuoriutuminen (Erkkilä ym. 2009, Röser ym. 2010).

Paalien loppukosteudet olivat kahden kuivumiskauden pituisen seurannan lopussa energiakäyttöön sopivan alhaiset, 16 – 24 %. Runkojen puuainese sisältö oli silmämääräisesti jonkin verran pehmentynyt alkuperäisestä. Kosteus lienee muhinut jossain vaiheessa paalien sisällä. Paalien sisällä olevat oksat ja risut heikentävät kokopuupaalien ilmanvaihtoa (Kuva 6).



Kuva 6. Mäntypaalin poikkileikkaus seurannan lopussa. Kuva: Ari Erkkilä

2.3 Energiapuupaalien kuljetuslogistiikka Keski-Suomessa

2.3.1 Energiapuupaalien kertymä ja autokuljetuskustannukset

Paalauksen avulla voidaan alentaa energiapuun kuljetuskustannuksia tiiviimmän kuorman, kuorman suuremman energiasisällön ja tehokkaamman logistiikkaoptimoinnin avulla.

Energiapuupaalien kuljetuskustannusten selvittämiseksi Keski-Suomessa laskettiin keskimääräinen energiapuun kuljetusmatka kustakin Keski-Suomen kunnasta Keljonlahden voimalaitokselle (Taulukko 2). Jokaisesta kunnasta valittiin 2 - 3 edustavaa mittauspistettä eri puolelta kuntaa ja näiden keskiarvona saatiin kullekin kunnalle keskimääräinen kaukokuljetusmatka. Matka käyttöpaikalle mitattiin Google Maps -ohjelmalla. Paalien kuljetuskustannusten laskemiseen käytettiin METLA:n Juha Laitilan laatimaa kokopuupaalauksen kustannuslaskentaohjelmaa.

Energiapuupaalien kertymä perustuu Keski-Suomen Metsäkeskuksen energiapuuselvityksessä kerättyihin tietoihin. Tässä kohdeleimikoiksi valittiin rinnankorkeusläpimitaltaan 7 - 12 cm:n ja 8 - 11 cm:n leimikot, joilta poistettavan puuston rinnankorkeusläpimitta oli 7 - 10 cm. Lämpimitaltaan 7 - 10 cm poistuman on todettu olevan optimaalinen Fixteri-menetelmällä toteutettavalle energiapuun korjuulle (Kärhä ym. 2009).

Taulukko 2. Kunnittainen keskimääräinen energiapuupaalien kaukokuljetusmatka Keljonlahdelle ja energiapuun kertymä Keski-Suomen energiapuupaalileimikoilta, kun leimikon rinnankorkeuslähimittaluokka on 8 – 11 cm tai 7 – 12 cm, ja poistettavan puuston rinnankorkeuslähimitta joko 7 – 10 cm tai ilman rajoitetta.

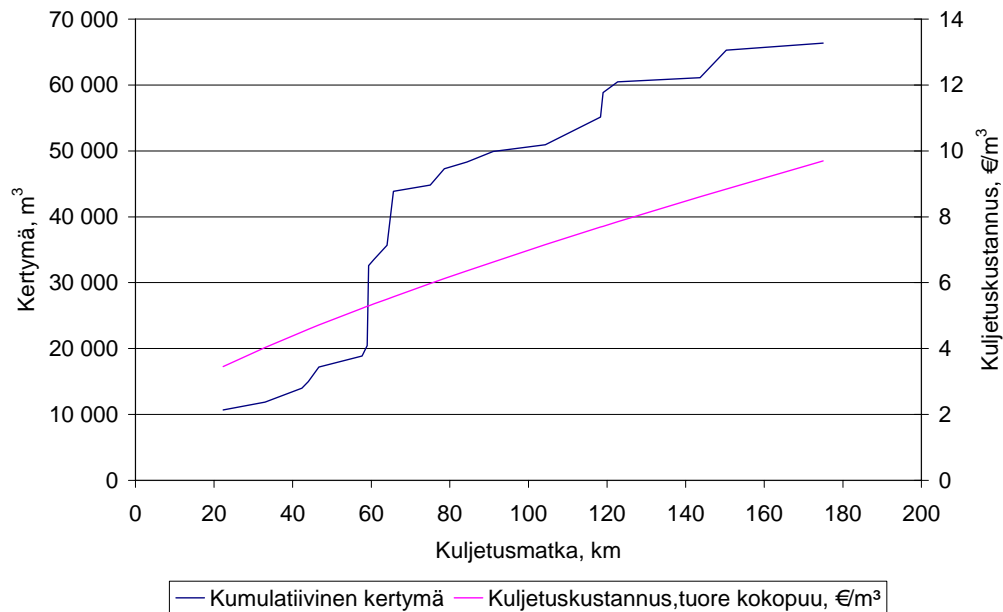
Kunta; kuljetusmatkan laskentapisteen	Kauko- kuljetus matka, km	Kertymä energiapuupaalileimikoista, k-m ³ /vuosi		
		keskim. d 1,3-luokka ja poistettavan puuston d 1,3		
		8 – 11 cm 7 – 10 cm	7 – 12 cm 7 – 10 cm	7 – 12 cm Ei raj.
Jyväskylä; (Korpilahti), Muurame	22	10 677	16 860	26 682
Petäjävesi; Piesalankylä, Keskusta, Koskensaari	33	1 176	2 391	6 155
Laukaa; Äijälä, Simuna, Lievestuore	42	2 135	4 432	10 850
Uurainen; Jokela, Niinimäki, Kutula	44	1 006	1 575	3 621
Toivakka; Ruuhimäki, Taka-Toivakka, Taipale	47	2 197	2 677	6 468
Luhanka; Myllymäentie, Vaherjärvi, Klemettilä	58	1 677	2 422	4 375
Hankasalmi; Ristimäki, Keskusta, Kovalanmäki	59	1 586	3 858	5 263
Jämsä; Ehunsalmi, Rapsula, Vuorenpää	59	12 144	11 949	18 973
Multia; Väätäiskylä, Hallanperä, Sahrajärvi	61	929	2 769	7 287
Äänekoski; Iisjärvi, Keskusta, Mutapohja	64	2 133	3 219	12 949
Joutsa; Niemistenkylä, Niinistönmäki, Etu-Ikola	66	8 205	10 173	18 645
Konnevesi; Istunmäki, Keskusta, Ala-Tankonen	75	956	3 341	8 116
Keuruu; Saarikylä, Simsiö, Asunta	79	2 465	6 389	25 006
Saarijärvi; Kukko, Karvaslampi, Markkula	84	1 036	3 504	18 956
Kuhmoinen; Myllykylä, Ryytijärvi, Vehkajärvi	91	1 585	3 942	15 614
Kannonkoski; Mannila, Hilmonkoski, Keskusta	104	1 009	1 252	8 598
Karstula; Vahanka, Kaihlamäki, Keskusta	118	4 213	9 784	25 495
Viitasaari; Kärnä, Kotvala, Jouhtenontie	119	3 741	6 302	27 039
Kyyjärvi; Nurmioentie, Kiminki, Keskusta	123	1 628	3 013	15 252
Kivijärvi; Risuperä, Puralankylä, Keskusta	144	616	3 445	8 192
Pihtipudas; Elämäjärvi, Pyöräspä, Keskusta	150	4 189	6 458	20 733
Kinnula; Valkeinen, Hiilinki, Keskusta	175	1 063	1 460	5 026
Kertymä yhteensä		66 367	111 215	299 296

Kuva 7 esittää 8 – 11 cm:n leimikoilta poistettavan 7 - 10 cm energiapuun poistumaa ja kuljetuskustannusta kuljetusmatkan funktiona. Kertymän kuvaaja ei ole lineaarinen, sillä kertymä kasvaa hyppäyksittäin aina uuden kunnan tullessa laskelmaan mukaan. Tällä lähimittarajoitteella vuotuinen kokonaiskertymä Keski-Suomesta on 66.400 m³.

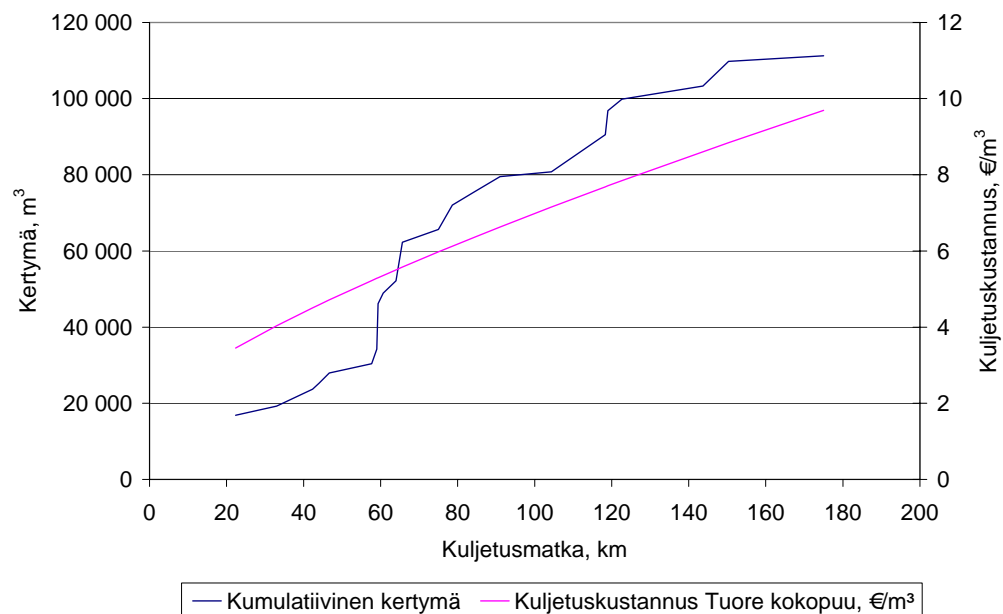
Kuva 8 esittää energiapuun kertymää 7 - 12 cm:n läpimittaluokassa. Poistettavan puuston läpimitta laskelmassa on 7 - 10 cm. Tällä läpimittarajoitteella vuotuinen kokonaispoistuma Keski-Suomessa on 111.200 m³.

Kuva 9 esittää 7 - 12 cm leimikoilta korjattavan puuston kertymää ilman läpimittarajoitetta. Tällä oletuksella Keski-Suomen vuotuinen energiapuukertymä olisi 299.000 m³.

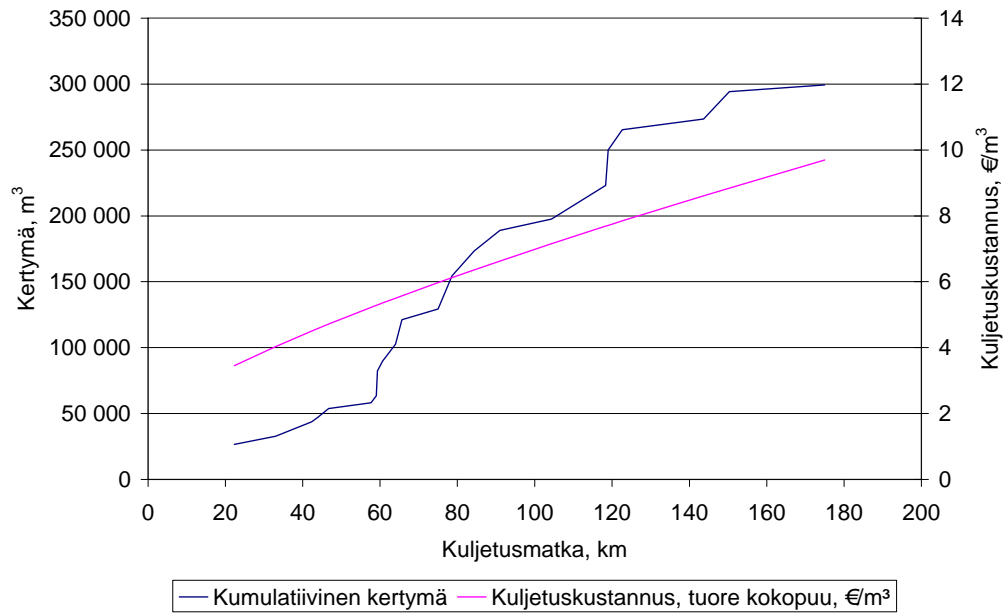
Keskimääräinen kuljetusmatka energiapuupaaleille Keski-Suomessa on 80 km. Suoran autokuljetuksen kuljetuskustannus tälle kuljetusmatkalle on 6,2 €/m³.



Kuva 7. Energiapuun kertymä ja autokuljetuskustannus läpimitaltaan 8 - 11 cm:n leimikoilta Keski-Suomessa. Poistuman läpimitta 7 - 10 cm.



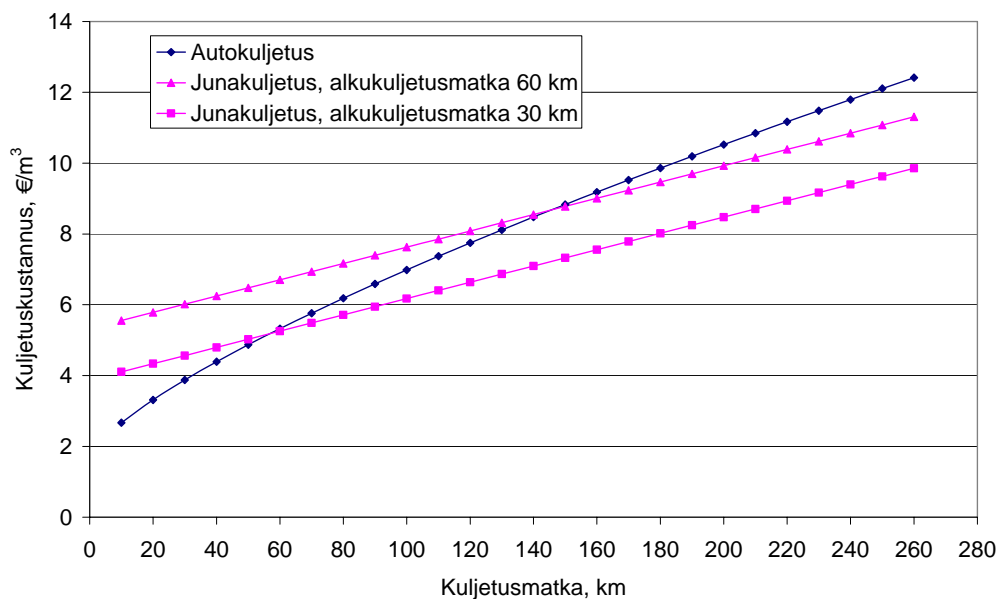
Kuva 8. Energiapuun kertymä ja autokuljetuskustannus läpimitaltaan 7 - 12 cm:n leimikoilta Keski-Suomessa. Poistuman läpimitta on 7 - 10 cm.



Kuva 9. Energiapuun kertymä ja autokuljetuskustannus läpimitaltaan 7 - 12 cm:n leimikoilta Keski-Suomessa ilman poistuman läpimittarajoitetta.

2.3.2 Energiapuupaalien auto- ja rautatiekuljetuskustannusten vertailu

Auto- ja rautatiekuljetusten kustannusvertailua varten laskettiin paalien kuljetuskustannukset METLA:n Juha Laitilan laatimalla Energiapuupaalien kustannuslaskentaohjelmalla 10 - 260 kilometrin kuljetusmatkoille. Samalla mallilla laskettiin myös rautatiekuljetuksen vaatima alkukuljetuskustannus (30 ja 60 km). Rautatiekuljetuksen kustannuksena käytettiin Metsätehon katsauksen 2009 puutavaran rautatiekuljetuskustannusta 2,3 snt/m³/km (Kariniemi 2009). Kuva 10 esittää auto- ja rautatiekuljetuksen kustannuksia kuljetusmatkan funktiona.



Kuva 10. Auto- ja rautatiekuljetuksen kustannukset kuljetusmatkan funktiona.

Junakuljetus muodostuu edullisemmaksi kuljetusmuodoksi vasta yli 150 km:n kaukokuljetusmatkoilla, mikäli autolla tapahtuva alkukuljetusmatka on 60 km. Alkukuljetusmatkan ollessa 30 km junakuljetus on autokuljetusta edullisempaa kaukokuljetusmatkan ollessa yli 65 km. Keski-Suomen tapauksessa rautatiekuljetus muodostuisi kilpailukykyiseksi kuljetusmuodoksi Pihtiputaan (7 - 12 cm:n leimikoilta 7 - 10 cm:n poistuma 6 460 m³/a) ja Kinnulan (7 - 12 cm:n leimikoilta 7 - 10 cm:n poistuma 1 460 m³/a) alueilla sekä Kivijärven ja Viitasaaren kuntien pohjoisosissa. Lyhyemmällä 30 km alkukuljetusmatkalla rautatiekuljetus olisi kannattavaa myös Kannonkosken (7 - 12 cm:n leimikoilta 7 - 10 cm:n poistuma 1 250 m³/a) ja Saarijärven alueilla (7 - 12 cm:n leimikoilta 7 - 10 cm:n poistuma 3 500 m³/a).

3 Kantojen uusi korjuuteknologia

3.1 Nykyisten kannonnostomenetelmien soveltuvuus mäntykantojen nostoon

Juha Laitila Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun toimintayksiköstä teki selvityksen nykyisten kannonnostomenetelmien soveltuvuudesta mäntykantojen nostoon (Laitila 2008).

Männyn ja kuusen rakenne-eroilla on merkitystä nostotekniikan kannalta. Kuusen paksut ja pinnanmyötäiset sivujuuret mahdollistavat työskentelytekniikan, jossa juurakon puuaines pilkotaan ja nostetaan paloittain juurenniskasta repäisemällä. Työtapa on käytössä etenkin silloin, kun kantoja nostetaan haramenetelmällä. Paalujuurisella männyllä, jolla huomattava osa puuaineksesta on kannossa tai sen maanalaisessa jatkeessa edellä kuvattu työtapa ei toimi. Kantojen maasta irrotus suoralla nostolla vaatii huomattavasti enemmän voimaa kuin kannon irtivääntäminen tai vipuaminen. Stenzelin (1946) mukaan vipuavassa nostossa tarvitaan 1/3 - 1/4 suoran ylösnoston voimasta (Ahonen & Mäkelä 1972). Juurakon vanhetessa nostovoiman tarve pienenee nopeasti, kun hienoituuret lahoavat ja hajoavat (Hakkila 1976). Kantoihin kohdistuvan tärinän on todettu vähentävän nostovoiman tarvetta 34 % - 50 % (Koivulehto 1969, Hakkila 1989).

Kantojen korjuun vaikeimpana työvaiheena pidetään kantojen nostoa, ja konekehittely onkin pääosin keskittynyt siihen. Käytettävät työmenetelmät ja -laitteet ovat periaatteeltaan samoja kuin jo 1970-luvulla ja nostotyön tuottavuuden kasvu on perustunut laitteiden käytettävyyden parantumiseen ja peruskoneiden tehon kasvuun. Nykyisten kaivukoneiden ja pilkkovien kannonnostolaitteiden voima oletettavasti riittää nostamaan ja paloitlemaan männyn kantoja. Ongelmaksi saattaa muodostua se, että kannon ylösnostossa puomin koukistusliike aiheuttaa juurakon irtoamisen sijasta koneen kallistumisen. Epävakaas hidastaa työtä ja lisää koneeseen ja kuljettajaan kohdistuvaa rasitusta. Ongelma voidaan ratkaista siirtymällä raskaampaan peruskonekalustoon tai paloitlemalla kantoa nostotyön yhteydessä useammasta kuin yhdestä suunnasta. Kannon paloittelu kertakäsittelynä parantaa myös tuottavuutta. Nostovoiman tarvetta voidaan myös pienentää möyhentämällä maata kannon ympäriltä nostolaitteen piikeillä ennen varsinaisen nostotyön aloittamista. Koska männyn kannoilla nostovoiman tarve on suurempi (Ahonen & Mäkelä 1972) kuin kuusen

kannoilla, niin kaivukoneen puomi ja nostosylinterit, samoin kuin nostolaitteen rakenteet joutuvat aiempaa kovemmalle rasitukselle.

Huomattavasti vähemmälle huomiolle laitetekniikan kehittelyn osalla on jäänyt kantojen paloittelu kaukokuljetuksen edellyttämään palakokoon ja juurakoiden tehokas puhdistus maa-aineksesta. Kokonaisten juurakoiden pinotiheys on suurusluokkaa 0,1 ja pilkonnalla pinotiheys voidaan nostaa 2-4 -kertaiseksi (Hakkila 1976), mikä on selvä hyödyntämispotentiaali, kun autokuorman kantavuudesta nykyään jää käyttämättä 10 tonnia kuormaa kohti huonon pilkonnin ja pinotiheyden vuoksi. Pinotiheyteen vaikuttavat mm. juurakon alkuperäinen koko, pilkkomismenetelmä, palakokojakauma, kuormaustapa ja ladonnan huolellisuus (Hakkila 1976). Pilkonnin ja puhdistuksen osuus on nykyisellä korjuukalustolla lähes puolet nostotyön tehoajanmenekistä. Puhdistus- ja pilkontatyö perustuu pitkälti yksittäisen kantopalan käsittelyyn, kun nykykaluston hydraulikan tehoilla pystyttäisiin prosessoimaan huomattavasti suurempia käsittely-yksiköitä pelkästään laitteita ja menetelmiä kehittelemällä.

Metsäkuljetuksessa pätevän puhdistusmenetelmän puute on estänyt tehokkaampien kuormaus- ja purkumenetelmien käyttöönoton ja tuottavuuden tehostumisen taakkakoon kasvun kautta. Kantojen korjuun ehdoton edellytys, kilpailukykyisten korjuukustannusten ohella on, että polttoaineen laatu pystytään pitämään loppukäyttäjän vaatimalla tasolla myös kantojen puhtauden osalta.

Tehdyn selvityksen perusteella nykyisistä kantojen korjuulaitteista parhaiten mäntykantojen korjuuseen vaikutti soveltuvan Karelian Puu ja Metalli Oy:n kehittämä mäntykantojen korjuuketju, johon kuuluu yksiotekantoharvesteri kantojen nostoon sekä kuormatraktoriin asennettava hydraulisesti laajennettava kuormatila ja ravistava piikkikahmari-tyyppinen kuormauskoura metsäkuljetukseen.

Karelian Puu ja Metalli Oy:n kehittämällä kannon nosto- ja pilkonalalaitteella kanto pilkkoontuu noston yhteydessä neljään tasakokoiseen palaan. Laitte voidaan asentaa sekä kaivukoneeseen että metsäkoneeseen ja se soveltuu sekä männyn että kuusen kannoille. Nostolaitteen etuna on, että kantojen nosto ja pilkonta työvaiheet liittyvät jouhevasti toisiinsa ja kanto pilkkoontuu aina neljään likimain tasakokoiseen kappaleeseen. Pilkonta edistää kantopalojen puhdistumista ja kasvattaa kuorman tiivyyttä metsä- ja kaukokuljetuksessa. Laitteella ei voi tehdä maanmuokkausta. Periaatteena on että kanto prosessoidaan nostokuopan päällä, jolloin maa-aines varisee takaisin nostokuoppaa ja nostojälki tasoittuu. Laitteen tuottavuudesta ei ollut saatavilla aiempaa tutkimustietoa.

Karelian Puu ja Metalli Oy:n kehittämässä puhdistavassa kuormauskourassa on yksinkertaisella tavalla ratkaistu kantojen metsäkuljetuksen kaksi pääongelmaa, eli kourataakan pieni koko ja kantojen sisältämän maa-aineksen puhdistus. Piikkikahmarissa kantopalojen puhdistus perustuu kantopaloihin kohdistuvaan iskuun ja puhdistus tapahtuu kourataakassa, kun kantopaloja kuormataan metsätraktorin kuormatilaan. Kourataakan iskupuhdistustoiminto on automatisoitu ja koneen kuljettaja pystyy säätämään puhdistusajan pituutta nappia painamalla. Kuormaus- ja purkutaakan kokoa on puolestaan saatu kasvatettua normaalia leveämmällä kouralla. Samaa kouraa on mahdollista käyttää myös latvusmassan metsäkuljetuksessa ja väliaikaisesti myös ainespuun metsäkuljetuksessa.

Kouratyyppin tuottavuudesta kantopuun metsäkuljetuksessa tai kouralla puhdistettujen kantopalojen puhtaudesta ei ollut olemassa julkista tutkimustietoa.

3.2 Mäntykantojen korjuu- ja kuljetustutkimus

3.2.1 Tausta ja tavoite

Mäntykantojen korjuuketjun tutkimus toteutettiin vuonna 2009 Joensuussa ja vuonna 2010 Toivakassa. Nykyisten kannonnostomenetelmien kartoituksen perusteella valittiin kokeelliseen tutkimukseen Karelian Puu ja Metalli Oy:n kehittämä korjuuketju.

Aikatutkimusten avulla määritettiin kantojen noston ja lähikuljetuksen tuottavuudet ensin Joensuussa päätehakkuuaukolta, jossa oli puoliksi mänty- ja puoliksi kuusikantoja. Toivakassa nostettiin vain mäntykantoja. Toivakassa oli vertailulaitteena samalla kohteella kantohara. Tutkimuksissa mitattiin nostokoneen ajanmenekki eri työvaiheisiin, määritettiin nostettujen kantopalojen koko ja puhtaus sekä mitattiin maaperän käsittelyjäljen kokoa.

Tutkimuksessa mitattiin maa-aineksen irtoamista ja määrää kannoissa noston jälkeen ja lähikuljetuksen yhteydessä metsässä. Joensuun kantojen tuhkapitoisuus määritettiin myös käyttöpaikkamurskauksen yhteydessä.

3.2.2 Kantojen noston aikatutkimukset

3.2.2.1 Menetelmät ja laitteet

Joensuun kohde sijaitsi vähäkivisellä kivennäismaalla, joka oli hakattu kesällä 2008. Kohteella oli jo voimakasta heinän kasvua. Kasvupaikkaominaisuuksiltaan kohde oli mustikkatyyppiä (MT). Kantojen nosto tapahtui 1.7.2009 ja metsäkuljetus 8.7.2009.

Toivakassa koko palstan koko oli 3,2 hehtaaria, josta tutkimusalueeksi erotettiin 1,4 hehtaaria. Kohde oli hakattu edellisenä syksynä ja hakkuukertymä oli ollut 210 m³/ha. Tutkimusalue oli puolukkatyyppin kuivahko mäntykangas (VT). Maaperältään palsta oli keskikarkeaa moreenia. Palstan reuna-alueet olivat huomattavan kivisiä ja ne rajattiin koealueen ulkopuolelle. Toivakassa tutkimus toteutettiin kantojen noston osalta 17.–18.6.2010. Kannot siirrettiin tien varteen ajokoneella 9.7.2010.

Sekä Joensuussa että Toivakassa kantoja nostettiin Xteho-yksiotekantoharvesterilla, jonka on kehittänyt Sakari Mononen Karelian Puu ja Metalli Oy:stä (Kuva 11). Laitetta valmistaa Kareliatech Oy. Xteho-yksiotekantoharvesterin alustakoneena oli tela-alustainen Volvo EC210C, jonka teho on 110 kW ja työpaino 22 – 23 tonnia. Toivakassa oli vertailukoneena kantohara, joka oli asennettu tela-alustaiseen New Holland 215 E -kaivinkoneeseen, jonka työpaino on 23 tonnia ja teho 118 kW (Kuva 12).

Molemmissa tutkimuksissa ennen noston alkamista numeroitiin kannot (yli 15 cm) ja mitattiin kantojen kuorenalusläpimitat ristikkäismittauksena, ensin pienin mitta ja sen jälkeen 90°:n kulmassa. Lahot kannot jätettiin nostamatta.

Aikatutkimuksissa määritettiin nostokoneiden ajanmenekki eri työvaiheisiin. Koneiden työajat mitattiin kannoittain ja rekisteröitiin suoraan tietokoneelle. Erotellut työvaiheet olivat: 1) työpistesiiirtyminen, 2) kouran vienti kannolle, 3) nosto- ja puhdistus (Joensuussa eroteltuna, Toivakassa yhdessä), 4) kannon siirto karheelle tai kasalle, 5) jäljen tasoitus, 6) näytteiden järjestely ym. apuaika sekä 7) keskeytykset ja tauot. Mittauksessa huomioitiin näytekantojen takia koneen tekemät järjestelyt ja ylimääräiset työt. Siirtymismatkat kantojen välillä arvioitiin. Tutkimus valokuvattiin ja videoitiin.

Tapion hyvän metsänhoidon suositusten (Äijälä ym. 2010) mukaan kantoja nostettaessa tulee välttää tarpeetonta kivennäis- ja turvemaan paljastamista ja maan sekoittamista. Kannonnoston jälkiä voidaan hyödyntää istutuksessa, kunhan istutuspaikkoja tulee tarvittava määrä taimille. Aikatutkimuksissa ei tehty istutusmuokkausta.

Koneen nostojäljistä tehtiin otanta. Nostokuopasta mitattiin pisin läpimitta, jonka jälkeen mitattiin pisimmän läpimitan puolivälistä kohtisuora läpimitta. Viimeiseksi mitattiin kuopan suurin syvyys. Kuoppien kokoon vaikuttaa kannon koko ja se kuinka laajalle alueelle juuret ovat levinneet. Kone ja kuljettaja vaikuttavat myös paljon siihen miltä nostojälki näyttää, koska kuopan päällä tapahtuva ravistelu palauttaa osan maa-aineesta takaisin kuoppaan. Xteho-yksiotekantoharvesterin kuljettaja tasoitteli kuoppaa kannon juurilla siirtämällä irtomaata takaisin kuoppaan. Kantoharan kuljettaja tasoitteli kuopan laitteen haraosalla.



Kuva 11. Xteho-yksiotekantoharvesterin ominaisuuksia kantojen nostossa tutkittiin Joensuussa ja Toivakassa. Kuvat Toivakasta. Kuvat: Ari Erkkilä



Kuva 12. Kantohara oli vertailukoneena mäntykantojen nostossa Toivakassa. Kuvat: Ari Erkkilä

3.2.2.2 Tulokset

Joensuussa tutkimusalueen pinta-ala oli 0,68 ha, josta Xteho-yksiotekantoharvesterilla nostettiin mäntykantoja 145 kpl ja kuusikantoja 148 kpl. Kantotiheys oli 431 kantoa/ha. Kantojen läpimittojen avulla laskettu mänty- ja kuusikantojen kertymä oli 53 m³/ha.

Toivakassa nostettiin Xteho-yksiotekantoharvesterilla 279 mäntykantoa 0,80 ha:n pinta-alalta (kantotiheys 349 kantoa/ha). Kantojen läpimittojen avulla laskettu kertymä oli 25 m³/ha. Kantoharalla nostettiin vastaavasti 175 männyn kantoa 0,63 ha:n pinta-alalta (kantotiheys 278 kantoa/ha). Kantojen läpimittojen avulla laskettu kertymä oli 19 m³/ha. Joensuun palstalla mäntykannot olivat huomattavasti järeämpiä kuin Toivakassa (Taulukko 3).

Molemmissa kohteissa koneiden kuljettajat olivat erilaisissa koneiden kuljetuksissa kokeneita. Yksiotekantoharvesteri oli Joensuun kokeissa 2009 vielä uutuus, jolla työaika oli kertynyt vasta kevätkaudella.

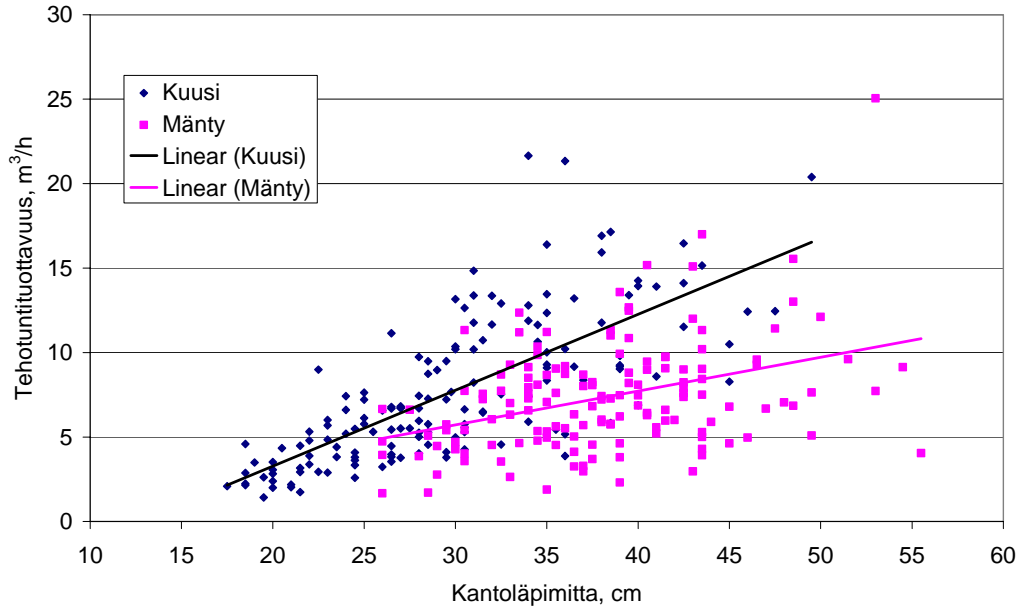
Kantojen tilavuus laskettiin läpimittojen mukaan kantopuun tilavuusyhtälöiden avulla (Hakkila 1976). Kantojen kuivamassat muutettiin kiintotilavuudeksi käyttäen kuusikannolle kuivatuoretiheyttä 432 kg/m³ ja mäntykannoille 473 kg/m³. Saantoja korjattiin kertoimella 1,17 kuusikannoille ja hieman pienemmällä kertoimella 1,12 mäntykannoille. Kerrointa käytettiin, koska tilavuusyhtälö ei ota huomioon alle 5 cm:n paksuisia juurenosia ja kaatosahaus on koneellisessa korjuussa juurenniskan yläpuolella (Laitila ym. 2007).

Taulukko 3. Keskiarvotunnuslukuja kuusi- ja mäntykantojen nostolle Joensuussa sekä mäntykantojen nostolle Toivakassa.

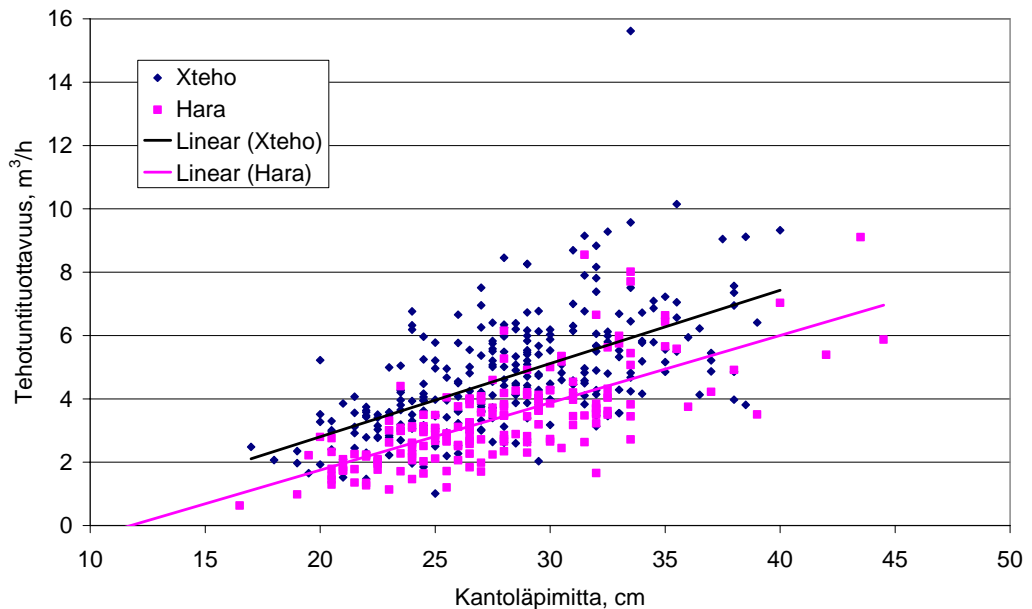
Laite	Puulaji	Kantojen lukumäärä	Kantojen läpimitta	Kokonaisaika kantoa kohti	Kannon tilavuus	Tehotuntituottavuus
		kpl	cm	s	m ³	m ³ /h
Xteho	kuusi	148	29,8	55,7	0,110	7,7
Xteho	mänty	145	38,2	75,2	0,134	7,5
Xteho	mänty	279	28,1	57,5	0,070	4,7
hara	mänty	175	27,5	77,7	0,067	3,3

Kuva 13 ja Kuva 14 esittävät kantoläpimitan vaikutusta tehotuntituottavuuteen Joensuun ja Toivakan kokeissa. Kuva 15 ja Kuva 16 esittävät työvaiheiden ajanmenekkejä kantojen nostossa Joensuun ja Toivakan kokeissa.

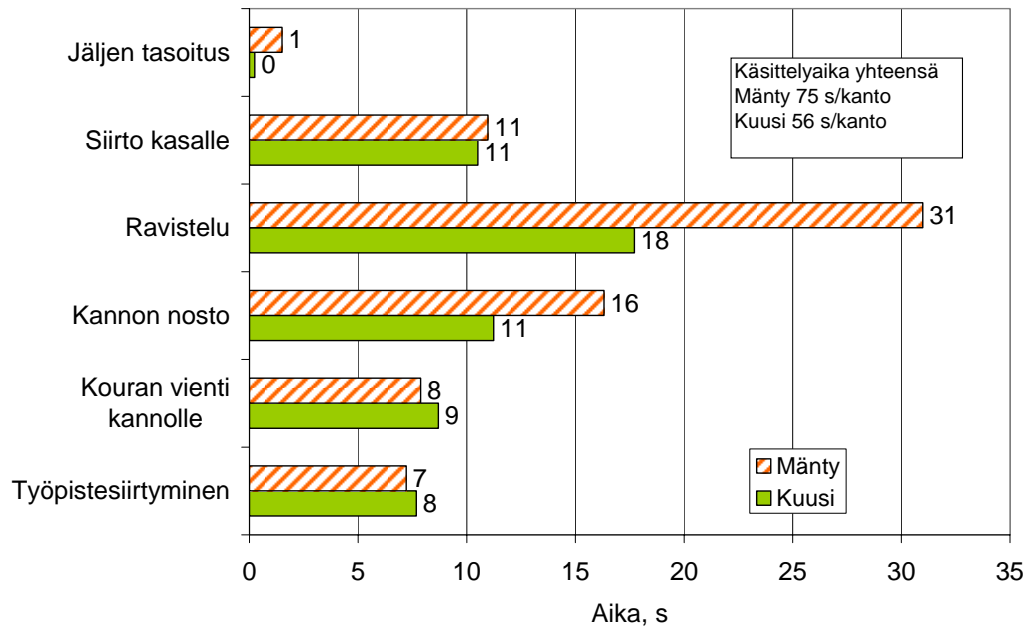
Taulukko 4 esittää kantojen irrotusjälkien mittoja Toivakassa.



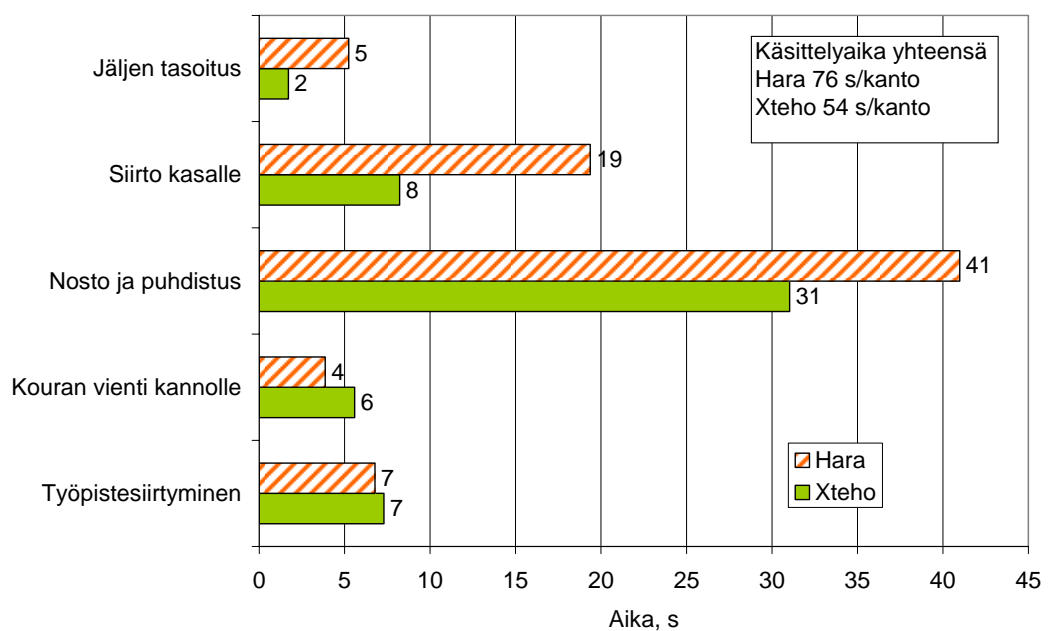
Kuva 13. Kantoläpimitan vaikutus Xteho-yksiotekantoharvesterin tehotuntituottavuuteen kuusi- ja mäntykantojen nostossa Joensuussa 2009.



Kuva 14. Kantoläpimitan vaikutus Xteho-yksiotekantoharvesterin ja kantoharan tehotuntituottavuuteen mäntykantojen nostossa Toivakassa 2010.



Kuva 15. Työvaiheiden ajanmenekki keskimäärin kantoa kohti mänty- ja kuusikantojen nostossa Xteho-yksiotekantoharvesterilla Joensuussa 2009. Kantojen keskiläpimitta männyllä 38,2 cm ja kuusella 29,8 cm.



Kuva 16. Työvaiheiden ajanmenekki keskimäärin kantoa kohti mäntykantojen nostossa Toivakassa 2010. Kantojen keskiläpimitta kantoharalla nostetuissa kannoissa 27,5 cm ja Xteholla 28,1 cm.

Taulukko 4. Kantojen irrotusjälkien mittoja Toivakassa 2010.

	Xteho			Hara		
	Leveys	Pituus	Syvyys	Leveys	Pituus	Syvyys
	46	65	14	109	158	4
	68	128	12	79	100	17
	66	92	10	86	185	18
	74	105	14	82	142	27
	117	132	16	114	166	19
	74	152	34	152	182	12
	62	80	9	62	157	28
	68	78	17	112	192	13
	64	92	16	80	136	23
	88	110	2	68	152	28
K.a	73	103	14	94	157	19

3.2.3 Kantojen lähikuljetuksen aikatutkimus

Joensuussa kantojen lähikuljetus tapahtui Ponsse Elk –ajokoneella, joka oli varustettua laajenevalla kuormatilalla ja ravistavalla kouralla (Kuva 17). Kuormatilan leveys laajeni aina viiteen metriin saakka. Kuormatilan pituus oli 4,4 metriä. Työvaiheina eroteltiin Joensuussa: 1) ajo kuormaukseen, 2) kuormaus, 3) ajo purkuun sekä 4) purku. Ajomatkat kuormaukseen, kuormausmatka ja matka purkuun sekä koura taakkojen lukumäärä kuormauksessa ja purkamisessa laskettiin tai mitattiin ja kulunut aika kelloitettiin. Kuljettajalla oli 10 vuoden kokemus eri koneiden ajosta, eniten motosta, mutta ajokoneesta vain vähän.



Kuva 17. Joensuussa kannot kuormattiin ravistelevalla kouralla metsäperävaunuun, jonka kuormatila laajenee. Kuva: Ari Erkkilä



Kuva 18. Toivakassa kuljetettiin kannot tienvarteen Ponsse Elephant -ajokoneella, jossa oli kuormatilan pohjalle asennettu putkimatot. Kuva: Jyrki Raitila

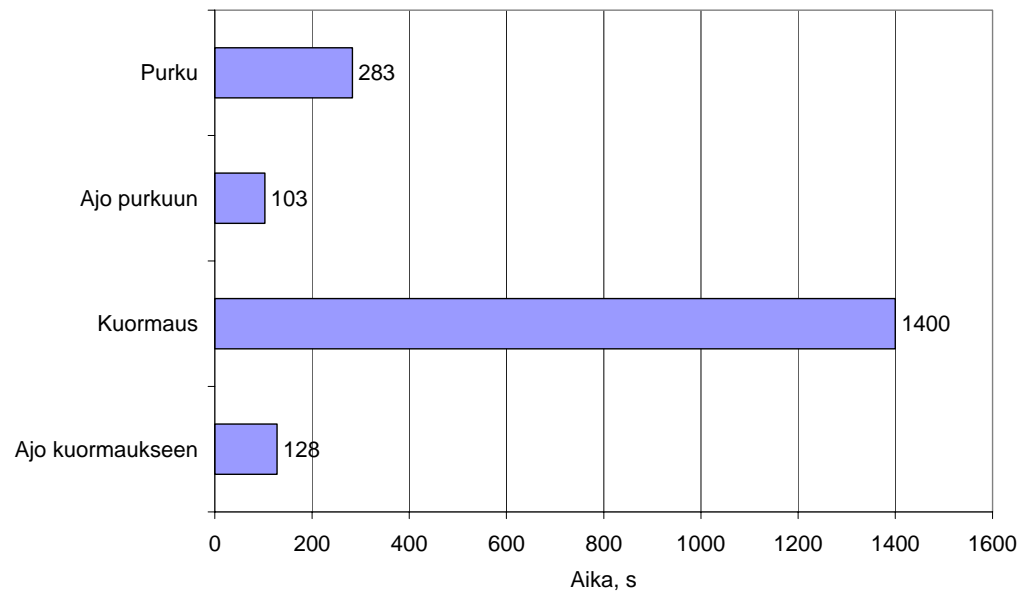
Toivakassa kannot kuljetettiin Ponsse Elephant -ajokoneella, jonka oma paino on 17,9 - 20 tonnia riippuen varusteista. Koneen maksimi kuormankantokyky on 18 tonnia ja tehoa koneessa on 205 kW. Koneessa oli tavaratilaan laitettavat putkimatot, jotka estivät kantojen putoamisen pankkojen välistä. Pankot laitettiin leveimpään asentoonsa kantojen kuljetusta varten.

Työvaiheet kelloitettiin kannettavalla tietokoneella, jossa oli kellotukseen soveltuva ohjelma. Kellotuksessa seurattiin kuljettajan tekemiä työvaiheita. Niitä olivat: 1) kouranvienti karheelle tai kasalle, 2) taakan otto, 3) kouran tuonti, 4) taakan jätö, 5) materiaalin lajitteluaika, 6) ajoaika, keskeytykset, 7) huollot ja tauot. Myös ajomatka huomioitiin joka kuormalle. Koneen työskennellessä laskettiin myös koontikourataakat ja purkutaakat kappalemäärinä. Lähikuljetuksen tuottavuus on laskettu nostettujen kantoläpimittojen perusteella. Kaikki nostetut kannot kuljetettiin varastoon molemmissa kohteissa.

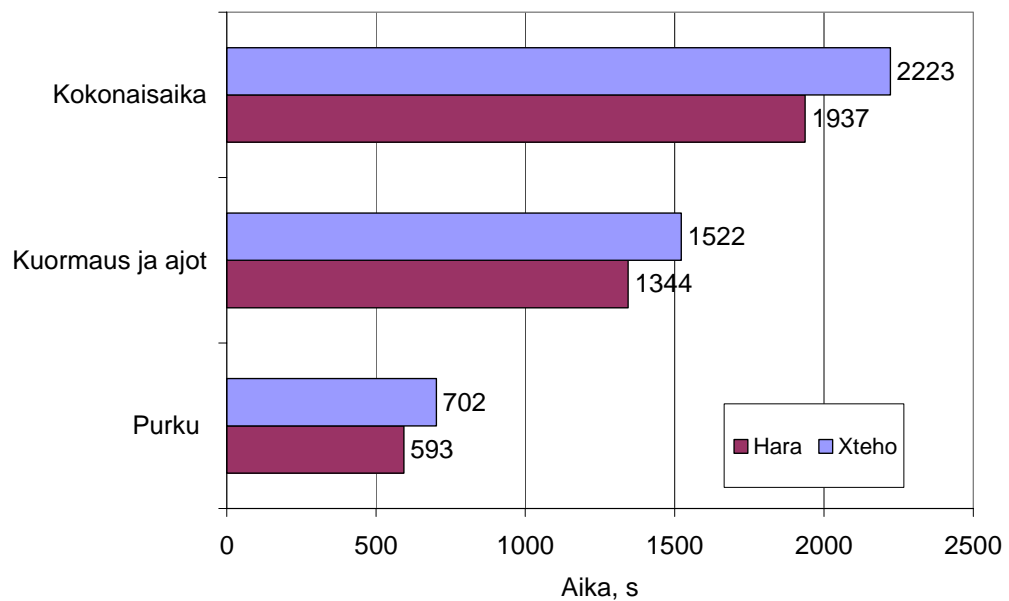
Joensuussa kuormia kertyi yhdeksän, joista kahdeksan täyttä kuormaa. Ajettu kantomäärä oli 36 kiintokuutiometriä. Toivakassa kuormia kertyi yhteensä seitsemän. Xteholla nostetut kannot (20 kiintokuutiometriä) ajettiin neljässä kuormassa, joista kolme oli täysisiä. Kantoharakoneen kannoista tuli kaksi täyttä kuormaa ja yksi vajaa kuorma (12 kiintokuutiometriä). Taulukko 5 esittää työvaiheiden keskimääräiset ajanmenekit ja muut mittaustiedot kuormaa kohti. Ajanmenekit ja kourataakkojen lukumäärät ovat täysien kuormien keskiarvoja. Kuvat havainnollistavat työvaiheiden ajanmenekkejä ja suhteellisia osuuksia lähikuljetuksessa (Kuva 19, Kuva 20, Kuva 21).

Taulukko 5. Työvaiheiden keskimääräinen ajanmenekki täysiiä kuormia kohti sekä muita mittaustietoja mäntykantojen lähikuljetuksessa Toivakassa 2010 sekä mänty- ja kuusikantojen lähikuljetuksessa Joensuussa 2009.

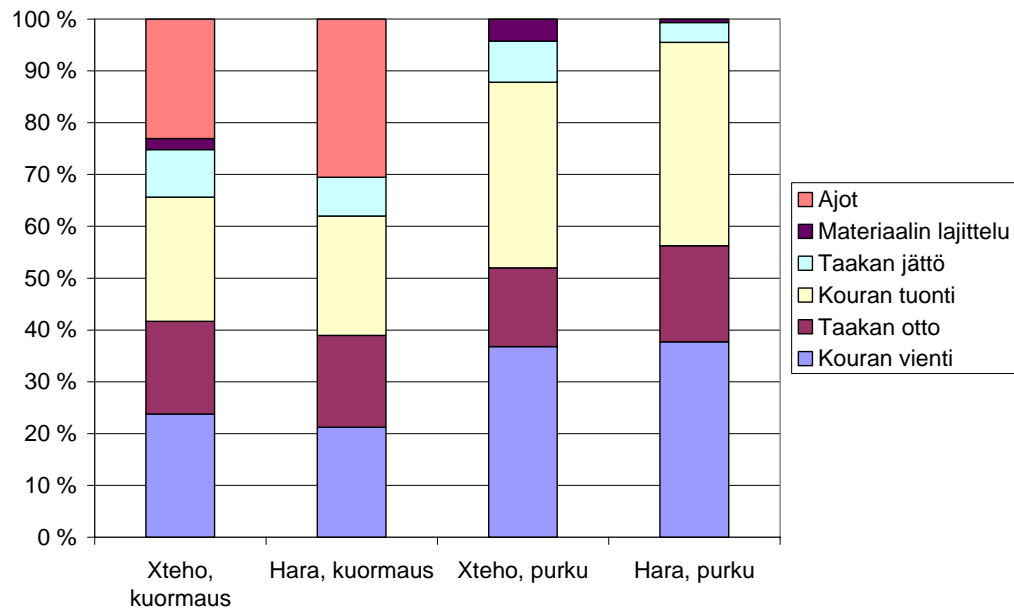
Toivakka, Xteho	Kouran vienti	Taakan otto	Kouran tuonti	Taakan jättö	Materiaalin lajittelu	Ajo	Teho- työaika yht.
Kuormaus							
Työvaihe aika, s	362	272	365	139	33	351	1522
Kuormakoko, m ³	5.5						
Ajomatkat yht., m	230						
Kourataakat, kpl	68						
Työpistesiiirtymisiä, kpl	13						
Purku							
Työvaihe aika, s	258	107	252	55	30		702
Kourataakat, kpl	39						
yhteensä							2223
Tuottavuus, m ³ /h	8.9						
Toivakka, Hara	Kouran vienti	Taakan otto	Kouran tuonti	Taakan jättö	Materiaalin lajittelu	Ajo	Teho- työaika yht.
Kuormaus							
Työvaihe aika, s	285	238	310	101	0	410	1344
Kuormakoko, m ³	4.7						
Ajomatkat yht., m	298						
kourataakat	56						
työpistesiiirtymisiä	13						
Purku							
Työvaihe aika, s	224	110	233	23	4		593
Kourataakat	37						
yhteensä							1937
Tuottavuus, m ³ /h	8.7						
Joensuu, Xteho					Kuormaus	Ajo	Teho- työaika yht.
Kuormaus							
Työvaihe aika, s					1400	231	1631
Kuormakoko, m ³	4.4						
Ajomatkat yht., m	193						
Kourataakat, kpl	63						
Työpistesiiirtymisiä, kpl							
Purku							
Työvaihe aika, s							283
Kourataakat, kpl	19						
yhteensä							1914
Tuottavuus, m ³ /h	8.3						



Kuva 19. Keskimääräinen lähikuljetuksen työvaiheiden ajanmenekki kuormaa kohti Joensuussa. Keskimääräinen kuormakoko oli $4,4 \text{ m}^3$.



Kuva 20. Lähikuljetuksen kuormakohtaisen kokonaisajan jakautuminen kuormaukseen ja siihen liittyviin ajoihin sekä purkuun Toivakassa. Keskimääräiset kuormakoot olivat kantoharalla nostettuja kantoja ajettaessa $4,7 \text{ m}^3$ ja Xteholla nostettuja kantoja ajettaessa $5,5 \text{ m}^3$.



Kuva 21. Työvaiheiden suhteellinen osuus lähikuljetuksen tehotyöajasta Toivakassa.

3.2.4 Kantojen laatu ja puhtaus

Sekä Joensuussa että Toivakassa nostetuista kannoista tutkittiin kantojen puhtautta ja kosteutta. Joensuun kohteesta maa-ainesmäärät tutkittiin neljästä kannosta (2 kuusikantoa ja 2 mäntykantoa) sekä noston että metsäkuljetuksen jälkeen. Joensuussa näytekannot pilkottiin jonkin verran tavanomaista pienemmiksi, jotta ne sopivat paremmin jatkokuljetukseen. Tällä saattoi olla palstalla olevien näytekantojen kuivumisesta nopeuttava vaikutus.

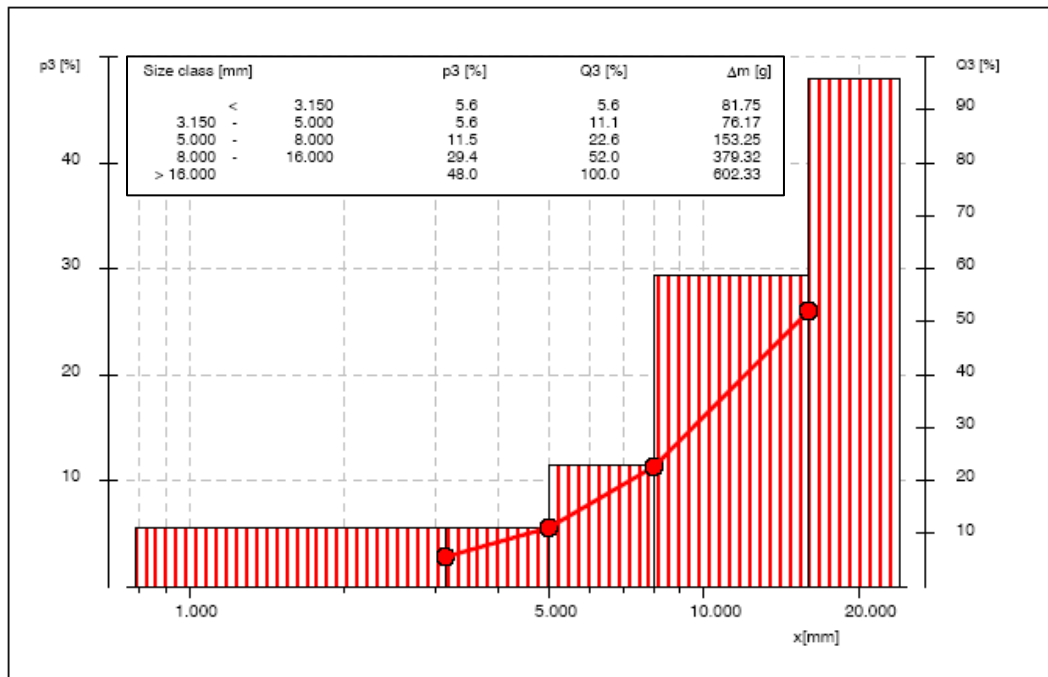
Toivakassa kummankin koneen nostamista kannoista otettiin kymmenen koekantoa maa-ainesmääritykseen heti noston yhteydessä. Koneet nostivat kannot ravistelun jälkeen pressujen päälle. Kannot pilkottiin moottorisahalla suursäkkeihin sopiviksi paloiksi. Pilkonnessa irronnut aines otettiin pressun päältä mukaan. Säkit kuljetettiin VTT:lle Jyväskylään, jossa kannot punnittiin ja erotettiin mekaanisesti puuaines, humus, hiekka ja kivet erilleen ja määritettiin jakeiden kosteudet. Kannoista otettiin edustavat kosteusnäytteet poraamalla reikiä useisiin kohtiin ja paloihin. Porauslastuista määritettiin kosteus uunikuivausmenetelmällä.

Metsäkuljetuksen jälkeen otettiin Toivakassa Xteho-yksiotekantoharvesterin nostamista kannoista kolme suursäkillistä kannon paloja. Pusseihin ei saatu saman kannon kaikkia osia, koska ajokone keräsi kantopalat karheelta. Kannot kuitenkin kerättiin tasaisesti kolmesta ajokoneen kuormasta. Kantoharakoneen nostamista kannoista otettiin näytteet yhteen suursäkkiin ja kolmeen pienempään säkkiin. Kaikki säkit tuotiin VTT:lle puhdistettavaksi. Puhdistus tapahtui edellä kuvatulla tavalla.

Nostettujen kantopalojen puhtaudessa tutkitulla nosto- ja metsäkuljetusketjulla päästiin hyvään tulokseen jo viikon kuivumisen (huom. lyhyt aika) ja ravistelun avulla. Kantopaloista erotettiin kivi- ja maa-aines mekaanisesti käsityökaluin ja

laskettiin tuloksista arvio kokonaistuhkapitoisuudesta. Laskennassa oletettiin puhtaan puuaineksen tuhkapitoisuuden olevan 0,5 % kuiva-aineesta ja hiekan tuhkapitoisuuden olevan 100 % kuiva-aineesta. Pilkottujen kuusikantojen laskettu kokonaistuhkapitoisuus viikon kuivumisen jälkeen oli 1,1 – 4,2 % ja pilkottujen mäntykantojen 3,9 – 4,2 %. Kantoja oli pilkottu tavanomaista enemmän noston yhteydessä.

Syksyllä 2010 varastokasasta toimitettiin murskaukseen kantoja yksi täysperävaunurekallinen. Kuormassa oli sekaisin kuusi- ja mäntykantoja. Murskaimen tuotehinnalta otettiin pyöräkuormaajan kauhalla viisi erillisnäytettä. Kukin näyte levitettiin kauhasta pressun päälle, josta näyte saatiin puolitettua säkkiin siten, että hiekat ja kantomurske olivat samassa suhteessa kuin murskaimen tuotekuljettimelta tullessaan. Neljä erillisnäytettä seulottiin kokonaan neljällä seulalla (16, 8, 5 ja 3,15 mm), joista yhdistettiin yli ja alle 5 mm:n jakeet, joille tehtiin kosteus- ja tuhkamääritykset (Kuva 22). Näiden avulla laskettiin painotettu tuhkapitoisuus (Taulukko 6). Näytteiden käsittelyn ja analysoinnin teki Enas Oy.



Kuva 22. Esimerkki kantomurskenäytteen seula-analyysistä. Näyte 1. (Enas Oy)

Taulukko 6. Kantomurskenäytteiden jakeiden osuudet ja kosteudet sekä tuhkapitoisuudet.

Näyte 1	alle 5 mm	yli 5 mm	Näyte 4	alle 5 mm	yli 5 mm
määrä, g	631.7	4539.6	määrä, g	221.1	2446.4
kosteus, m-%	16.8	20.9	kosteus, m-%	17.8	19.6
k-aine, g	525.6	3590.8	k-aine, g	181.7	1966.9
tuhka, m-%	39.4	1.5	tuhka, m-%	14.7	0.6
painotettu tuhka, m-%	6.3		painotettu tuhka, m-%	1.8	
Näyte 2	alle 5 mm	yli 5 mm	Näyte 5	alle 5 mm	yli 5 mm
määrä, g	439.9	3665.2	määrä, g	142.0	2219.8
kosteus, m-%	17.6	26.2	kosteus, m-%	14.4	20.2
k-aine, g	362.5	2704.9	k-aine, g	121.6	1771.4
tuhka, m-%	49.9	1.2	tuhka, m-%	34.6	1.9
painotettu tuhka, m-%	7.0		painotettu tuhka, m-%	4.0	

Taulukko 7 sisältää tutkittujen näytekantojen ominaisuuksia. Puuaineksen määrä on osuus kannon tuoremassasta ilman kiviä. Kivien määrä oli satunnainen, minkä vuoksi kivien massaa ei otettu laskentaan. Taulukko 8 esittää lämpöarvomääritysten tulokset Joensuun kohteessa nostetuista mäntykannoista otetuille näytteille

Taulukko 7. Nostettujen kantojen puuaineksen kosteus ja sen vaihteluväli, puuaineksen osuus tuoremassasta ilman kiviä sekä humuksen ja hiekan kosteudet. Kivien määrä vaihteli 0 – 4,5 kg/kanto.

Paikka	Puulaji	Laite	Kuivumis- aika vrk	Puuaineksen osuus %	Kosteus keskiarvo %	Kosteus min. %	Kosteus max. %
Joensuu	kuusi	Xteho	0	96.5	51.5	46.9	56.0
	kuusi	Xteho	7	98.6	46.6	43.0	50.1
	mänty	Xteho	0	90.4	42.0	36.3	47.6
	mänty	Xteho	7	97.7	32.3	32.0	32.6
Toivakka	mänty	Xteho	0	95.3	40.4	30.4	47.5
	mänty	Xteho	22	96.4	22.4	17.2	26.5
	mänty	kantohara	0	95.2	47.1	39.9	53.1
	mänty	kantohara	21	95.8	26.0	15.3	26.0

Paikka	Puulaji	Laite	Kuivumis- aika vrk	Puuaineksen kosteus %	Humuksen kosteus %	Hiekan kosteus %
Joensuu	kuusi	Xteho	0	51.5		27.3
	kuusi	Xteho	7	46.6	29.9	24.5
	mänty	Xteho	0	42.0		13.5
	mänty	Xteho	7	32.3	26.0	7.5
Toivakka	mänty	Xteho	0	40.4	34.4	13.6
	mänty	Xteho	22	22.4		3.8
	mänty	kantohara	0	47.1	38.3	15.9
	mänty	kantohara	21	26.0		3.7

Taulukko 8. Mäntykantonäytteiden lämpöarvoja. Molemmat näytteet Joensuusta, kantojen läpimitta noin 40 cm. (Enas Oy)

Analyyysi	Tulos	Yksikkö
Kokonaiskosteus	29.1	m-%
Kalorimetrinen lämpöarvo	20.12	MJ/kg k-a
Tehollinen lämpöarvo	18.77	MJ/kg k-a
Tehollinen lämpöarvo	5.213	MWh/t k-a
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	12.59	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	3.498	MWh/t
Analyyysi	Tulos	Yksikkö
Kokonaiskosteus	33.2	m-%
Kalorimetrinen lämpöarvo	22.15	MJ/kg k-a
Tehollinen lämpöarvo	20.80	MJ/kg k-a
Tehollinen lämpöarvo	5.778	MWh/t k-a
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	13.09	MJ/kg
Tehollinen lämpöarvo saapumistilassa	3.635	MWh/t

3.2.5 Tulosten tarkastelu

Kantojen hyödyntäminen energiakäyttöön on pääasiallisesti rajoittunut kuusten kantoihin. Tehtyjen kokeiden perusteella myös mäntykantojen irrotukseen ja puhdistukseen on kehitetty toimivat laitteet ja menetelmä. Mittaustulosten mukaan Xteho-yksiotekantoharvesterin tuottavuus (4,7 m³/h) mäntykantojen nostossa oli 42 % parempi kuin perinteisen kantocharan tuottavuus (3,3 m³/h). Vertailututkimus tehtiin kohteella, jossa mäntykantojen läpimitta oli molemmilla koneilla keskimäärin 28 cm. Kantoläpimitat vaihtelivat 17 – 45 cm:n välillä. Kantojen puhtaus oli yhtä hyvä molemmilla laitteilla nostettuna. Puuaineksen osuus tuoremassasta oli molemmilla koneilla nostetuissa kannoissa 95 – 96 %. Kantochara käytti noin 30 % enemmän aikaa nosto- ja puhdistusvaiheeseen sekä yli kaksinkertaisen ajan kantopalojen siirtämisessä kasalle kuin yksiotekantoharvesteri samoihin työvaiheisiin. Myös nostojäljen tasoittamiseen kului aikaa enemmän kuin yksiotekantoharvesterilla. Työpistesiiirtyminen ja kouran vienti kannolle sujuivat kantocharalla keskimäärin vähän nopeammin kuin yksiotekantoharvesterilla. Kantotiheys oli kantocharan koalueella pienempi (278 kantoa/ha) kuin yksiotekantoharvesterin koalueella (349 kantoa/ha). Kantotiheys vaikuttaa työpistesiiirtymisen ajanmenekkiin. Työpistesiiirtymisen osuus kantocharan tehotyöajasta oli noin 9 % (7 sekuntia). Edellä mainitun kantotiheyseron vaikutus tuottavuuksien eroon on pieni, arviolta 1 – 2 %. Yksiotekantoharvesterilla syntyi leveydeltään noin 20 % ja pituudeltaan noin 30 % pienempi sekä syvyydeltään noin 20 % matalampi kannon nostojälki kuin kantocharalla nostettaessa. Ellipsin muotoon sovitettaessa pinta-ala on noin puolet pienempi.

Xteho-yksiotekantoharvesteri soveltuu mäntykantojen lisäksi hyvin myös kuusen kantojen nostoon. Kuusen kantojen nostossa Xteho-yksiotekantoharvesterin tehotuntituottavuus oli läpimitaltaan 30 cm:n kannoilla noin 40 % ja 45 cm:n kannoilla noin 60 % parempi kuin mäntykantojen nostossa. Tehotuntituottavuus oli yli 12 m³/h kuusikannon läpimitan ollessa 40 cm. Mänty- ja kuusikantojen nostoverailussa ei ollut mukana muuta nostolaitetta. Parempi tuottavuus kuusikantojen nostossa johtui kuusikannon nopeammasta puhdistuvuudesta.

Kummassakaan korjuukohteessa kasvaneilla männyillä ei ollut syvälle ulottuneita paalujuuria, jotka olisivat haitanneet merkittävästi irrottamista. Yksiotekantoharvesterilla nostettuna mäntyjen juuristot olivat pikemminkin partasutia muistuttavia pehkoja, joiden mukana irtosi paljon maa-ainesta. Ravistelutoiminnon avulla maa-aines putosi irrotuskuoppaan.

Tulosten mukaan myös kantoharalla voitiin nostaa mäntykantoja. Suurimmat kannot kohteella olivat läpimitaltaan 45 cm. Kannot myös puhdistuivat hyvin, mutta aikaa kului enemmän kuin yksiotekantoharvesterilla nostettaessa. Ravistustoiminnolla varustetun yksiotekantoharvesterin käyttöön oppinee helpommin kuin kantoharan sujuvaan käyttöön. Toivakassa kesällä 2010 molemmissa koneissa oli kokeneet kuljettajat. Joensuussa vuonna 2009 yksiotekantoharvesterin kuljettajalla oli laitteen käyttökokemusta ennättänyt kertyä pari kuukautta.

Tehotuntituottavuuteen vaikuttavat puulajin lisäksi useat muut seikat kuten kantojen läpimitta, kantojen määrä pinta-alayksikköä kohti, maalaji, kivisyys, kasvillisuuspeite, maan muokkaus ja nostokuoppien tasoitus. Nämä vaikuttavat esimerkiksi kannolta toiselle siirtymisiin kuluvaan aikaan, kantopalojen puhdistumiseen ja yhdellä kannon irrotuksella saatavaan tilavuuteen. Esimerkiksi yksiotekantoharvesterin tehotuntituottavuus mäntykantojen nostossa vaihteli välillä 1 – 25 m³/h riippuen eri tekijöistä. Tästä syystä suoraa vertailua muissa tutkimuksissa saatuihin tuottavuuksiin ei voi luotettavasti ja tasapuolisesti tehdä varsinkin, kun kantojen puhtautta ei ole muissa tutkimuksissa selvitetty. Työtehoseuran tutkimuksessa on verrattu samalla kohteella mäntykantojen ja kuusikantojen nostoa (Jouhiahho & Mutikainen 2010). Kuusikantojen noston tuottavuus eräällä kantoharalla oli 40 cm:n läpimitalla 27 % suurempi kuin mäntykantoja nostettaessa ja 50 cm:n läpimitalla ero oli 40 %. Toisella työkohteella kyseisessä tutkimuksessa olleen kantoharvesterin tuottavuus oli kuusikantoja nostettaessa 40 cm:n läpimitalla 25 % suurempi ja 50 cm:n kannoilla 30 % suurempi kuin mäntykantoja nostettaessa.

Lähikuljetuksen tuottavuuteen vaikuttavat puolestaan mm. kuormatraktorin varustus, kuljetusmatkat ja hehtaarikertymä sekä varastokasan tekotapa. Tämän tutkimuksen kokeissa lähikuljetuksen tuottavuudet olivat 8,3 – 8,9 m³/h. Keskimääräinen kuormakoko yksiotekantoharvesterin kantoja kuljetettaessa oli Joensuussa 4,4 m³ ja Toivakassa 5,5 m³ ja kantoharan kantoja kuljetettaessa Toivakassa 4,7 m³. Kuormakoot olivat pieniä verrattuna aiempien tutkimusten tuloksiin. Lähikuljetuksen keskimääräisiä kuormakokoja ovat muissa tutkimuksissa olleet esimerkiksi 8,6 m³ (Laitila ym. 2007) ja 11 m³ (Laitila 2010). Pienet kuormakoot ja pienet kertymät huomioon ottaen lähikuljetuksen tuottavuudet olivat samaa luokkaa aiempien tutkimusten kanssa.

Nostetut ja varastoidut kannot olivat tehtyjen määritysten mukaan sopivia polttoon. Kantojen puhdistumiseen vaikuttaa palstalla kuivumisaika ennen lähikuljetusta ja pitkäaikaisvarastointi tien varressa. Mikäli kuivumisaika on liian lyhyt, hiekka ja humus eivät ennätä kuivua juuriston onkaloissa eivätkä irtoa kuormaukseen liittyvien ravistelujen yhteydessä yhtä hyvin kuin kuivuttuaan irtoaisivat. Yhden viikon kuivumisaika Joensuun kohteella vaikutti liian lyhyeltä. Yli vuoden kestäneen varastokauden jälkeen mänty- ja kuusikantomurskenäytteiden tuhkapitoisuus oli kuitenkin vain 2 – 7 % ja kosteudet olivat 20 – 26 %. Toivakassa nostettujen mäntykantopalojen kosteus

kolmen viikon kuivumisen jälkeen palstalla oli 22 – 26 %. Mäntykantojen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli Joensuun kahdesta kannosta määritettynä 18,8 ja 20,8 MJ/kg.

4 Energiapuun kuivaus ja varastohävikin vähentäminen

Energiapuun kuivaus ja varastohävikin tutkimus koostui seuraavista osatehtävistä:

- kuivaus- ja varastointitekniikoiden vaikutukset energiapuun kosteuteen ja varastohävikkiin
- yhteenveto aikaisemmin tehdyistä pienkokopuun, paalattujen hakkuutähteiden ja irtonaisten hakkuutähteiden kuivaus- ja varastointitutkimuksista
- välivarastossa olevien kantojen ja muun energiapuun kosteuden mittausten menetelmän selvittäminen.

4.1 Kuivaus- ja varastointitekniikoiden vaikutukset energiapuun kosteuteen ja varastohävikkiin

Tehtävässä tutkittiin eri tekijöiden vaikutusta välivarastoidun energiapuun laatuun ja varastohävikkiin. Energiapuun kuivaus ja varastointi tehtiin tienvarsivarastoissa sekä avoimella paikalla terminaalissa (Kuva 23). Metsätien varressa olleet varastot sijoitettiin kuivumisolosuhteiltaan sekä huonoon että hyvään ympäristöön. Varastointikokeita tehtiin sekä irtonaisissa kokopuukasoissa että paalatuissa kokopuunippukasoissa. Varastokasat peitettiin peittopaperilla siten, että noin puolet kasasta oli peitetty. Erilaisissa varastointitekniikoissa otettiin huomioon kasojen sijainti, ympäristö ja peittäminen. Kantojen kuivumista tarkastellaan erikseen kohdassa 4.1.3.



Kuva 23. Energiapuun varastokasoja metsätien varressa huonossa kuivumisympäristössä ja avoimella paikalla terminaalissa (oikealla). Kuvat: Kari Hillebrand

Yhteensä tutkittuja energiapuukasoja oli 11 kpl. Kokopuukasoja oli viisi, joista kolme sijaitsi metsätien varressa ja kaksi avoimella paikalla terminaalissa. Paalattuja kokopuunippukasoja oli kuusi, joista neljä sijaitsi metsätien varressa ja kaksi terminaalissa. Puulajiltaan kokopuu- ja paalikasat olivat etupäässä mäntyä. Ainoastaan yhdessä paalikasassa metsätien varressa pääpuulajina oli koivu. Kaikki varastokasat sijaitsivat Kangasniemen ympäristössä.

Varastokasat tehtiin sekä talvi- että kesäaikana. Vallinnut paikallinen sää mitattiin kuivumisaikana sääasemilla (Kuva 24), jota verrattiin pitkän ajan sään keskiarvoihin. Energiapuun laadun muutoksia seurattiin 21 kuukauden ajan. Kosteusnäytteitä otettiin kokeen alussa ja lopussa sekä tietyin välein varastointijakson aikana. Yhteensä kosteusnäytteitä otettiin yhdeksän kertaa. Yleensä kosteusnäytteet otettiin kasan profiilin keskivaiheelta, aina eri kohdasta kasaa, kasan peitetystä ja peittämättömästä osasta (Kuva 24). Kosteusmääritykset tehtiin laboratoriossa.



Kuva 24. Sään mittaamiseen käytetty sääasema, taustalla puoliksi peitetty varastokasa. Kosteusnäytteiden ottoa kasasta (oikealla). Kuvat: Kari Hillebrand

Varastohävikkiä, varastokasan pohjalle jäävän puuaineksen määrää, mitattiin kolmessa erillisessä kohteessa. Varastokasat olivat talven yli olleita kasoja, jotka oli purettu seuraavana syksynä. Varastokasan pohjalle jääneen puuaineksen osuus määritettiin koko kasan osuudesta.

4.1.1 Vallinnut säätila

Liitteessä 1 on esitetty vallinnut säätila varastoalueilla metsätien varressa ja terminaalissa. Kuviin on piirretty kumulatiivinen haihdunta- ja sadesumma vuosina 2009 ja 2010 sekä pitkän aikavälin keskiarvot (Korhonen 2007).

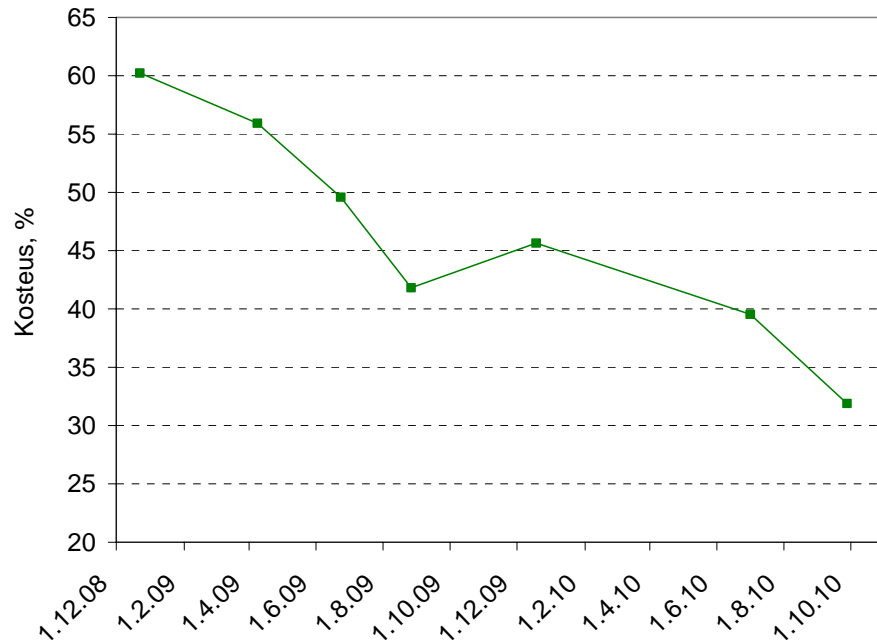
Metsätien varressa sääasema oli varastokasojen vieressä, jotka sijaitsivat varjoisassa paikassa (Kuva 24). Varastopaikka sijaitsi notkokohdassa. Terminaalissa sääasema sijaitsi varastoalueella avonaisessa ympäristössä.

Haihduntasumma terminaalissa oli noin kaksinkertainen verrattuna metsätien varressa olleeseen haihduntaan. Metsätien varressa haihduntaa rajoitti puustoinen ja varjoisa ympäristö. Metsätien varressa puusto toisaalta osittain suojasi varastokasoja sateelta. Sadesumma metsätien varressa olikin vain puolet terminaalissa mitatusta sadesummasta. Terminaalissa haihdunta oli pitkän aikavälin keskiarvon suuruinen. Sadesummat vuosina 2009 ja 2010 olivat selvästi pitkän aikavälin keskiarvoja pienempiä.

4.1.2 Energiapuun kuivuminen varastossa

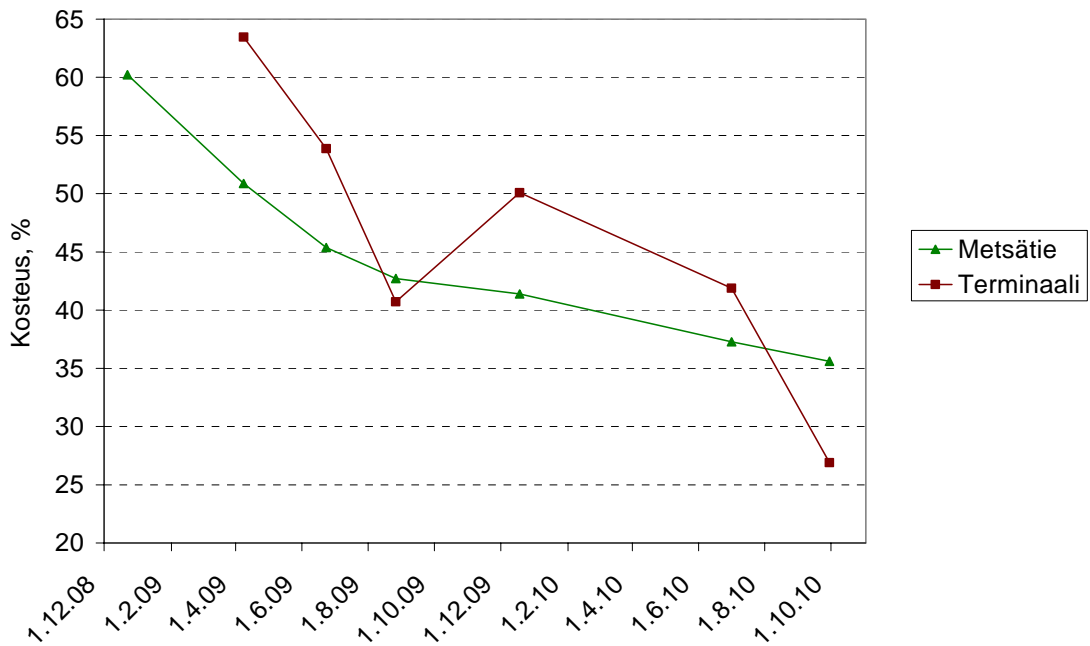
Energiapuun kuivumista vallinneissa sääoloissa voidaan aluksi tarkastella koko tutkimusaineiston perusteella riippumatta varastokasojen tekoajankohdasta, tekotavasta, puulajista, sijainnista tai peittämisestä. Tämä antaa hyvän käsityksen

energiapuun keskimääräisestä kuivumisnopeudesta. Kuva 25 esittää välivarastossa olevan puun kosteuden alenemisen ajan funktiona. Talvella lähtökosteus oli korkea, 60 %, johtuen osittain näytteiden lumisuudesta. Ensimmäisen kevään ja kesän aikana keskimääräinen kosteus aleni lähes 40 prosenttiin, mutta nousi seuraavan talven aikana noin viisi prosenttiyksikköä. Seuraavan kesän ja syksyn aikana kosteus pieneni lähes 30 prosenttiin. Täten energiapuun varastoinnilla saavutetaan jo yhden normaalikesän kuivumisjakson aikana tavoiteltu noin 40 prosentin kuivuustaso.



Kuva 25. Energiapuun kuivuminen varastossa laskettuna koko tutkimusaineiston perusteella.

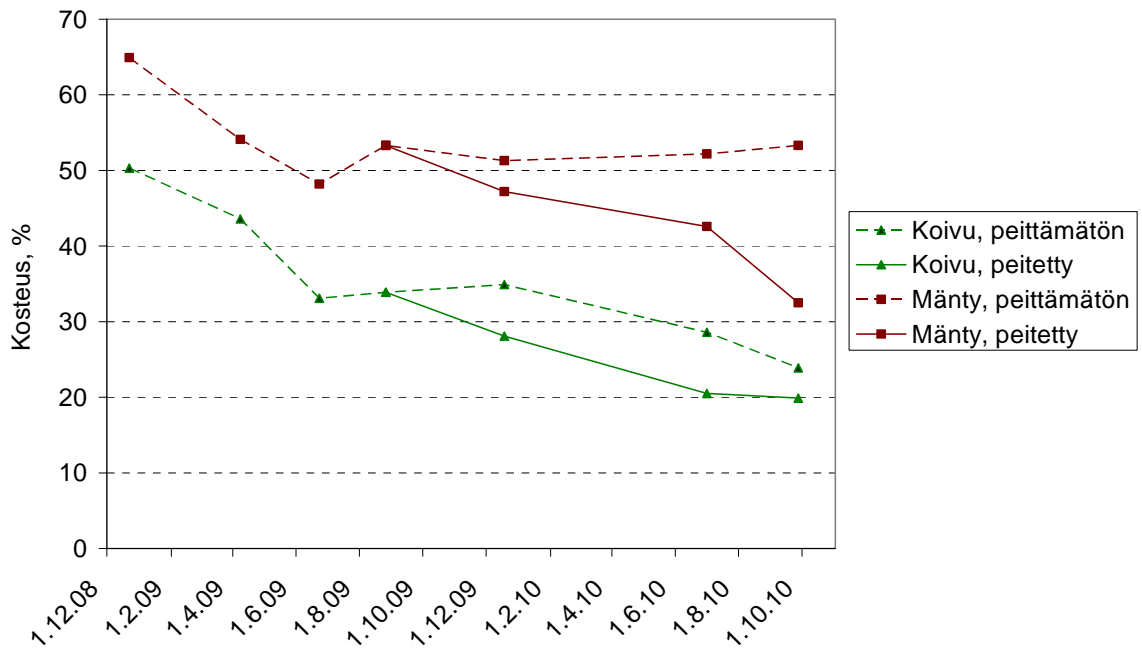
Varastokasan sijainti ja ympäristö vaikuttavat kuitenkin energiapuun kuivumiseen merkittävästi. Metsätien varressa kuivumisolosuhteet eivät vaihtele yhtä voimakkaasti kuin avoimella paikalla ja puun kosteuden aleneminen on siten tasaisempaa kuin terminaalissa. Terminaalissa kevään ja kesän aikana energiapuu kuivuu nopeammin kuin metsätien varressa, mutta kastuu myös helpommin syksyn ja talven aikana (Kuva 26). Ensimmäisen kesän jälkeen varastokasojen kosteudet olivat lähes samat riippumatta kasojen sijainnista, johtuen osittain myös metsätien varressa olleiden kasojen pitemmästä talvikuivumisjaksosta. Seuraavana talvena terminaalissa olleet kasat kastuivat noin 10 prosenttiyksikköä ja heinäkuun alussa terminaalissa olleet kasat olivat vielä noin viisi prosenttiyksikköä märempiä kuin metsätien varressa olleet kasat. Hyvän loppukesän ja syksyn johdosta terminaalikasat kuivuivat kuitenkin lähes 25 prosenttiin, metsätien varressa olleiden kasojen kosteuden jäädessä noin kahdeksan prosenttiyksikköä märemmiksi.



Kuva 26. Energiapuun kuivuminen metsätien varressa ja terminaalissa (koko aineisto).

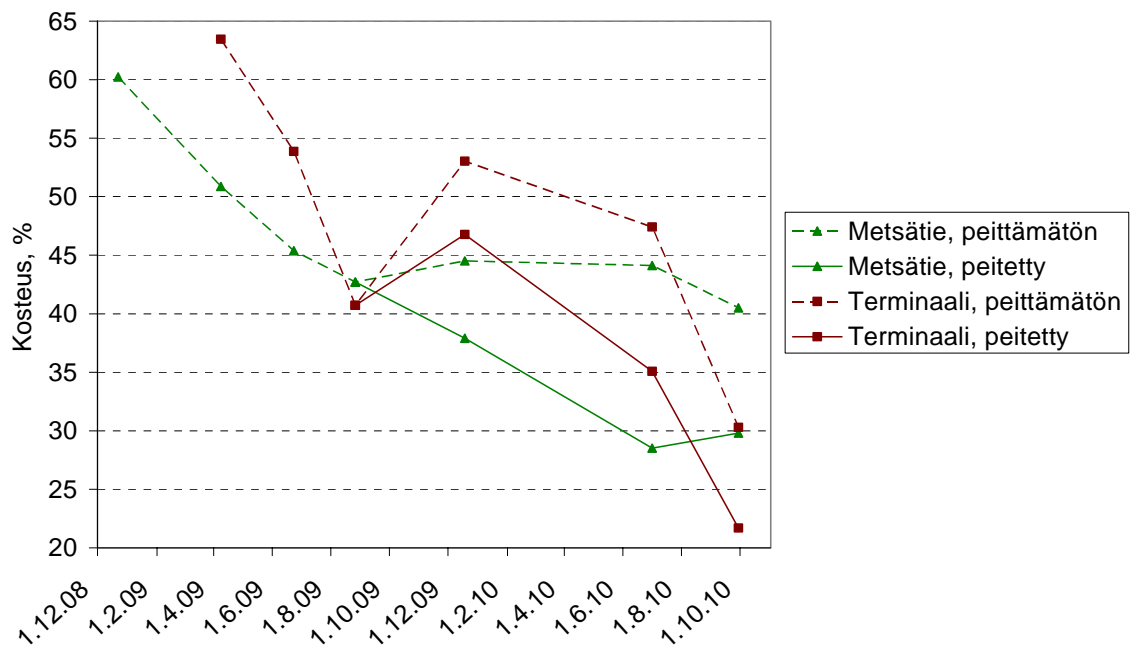
Verrattaessa kuivumisympäristön vaikutusta metsätien varressa, kuivuivat avoimella paikalla olleet varastokasat ensimmäisen kesän aikana noin kahdeksan prosenttiyksikköä kuivemmiksi kuin notkossa, kosteahkossa paikassa olleet kasat. Toisen kesän jälkeen ero oli noin neljä prosenttiyksikköä.

Puulajilla on myös suuri vaikutus kuivumiseen. Kun samassa, huonossa kuivumisympäristössä (notkopaikka) koivupaalien kosteus saavutti kesäkuun lopussa ensimmäisenä kesänä 34 %:n ja toisena kesänä 20 %:n kosteuden (peitetty kasan osa), olivat vastaavat kosteudet mäntypaaleilla 48 % ja 32 % (Kuva 27). Kuivumiskäyrien tasoero kosteudessa johtuu eri puulajien luontaisesta kosteudesta. Koivu on jo lähtökosteudeltaan selvästi kuivempi kuin mänty ja tämä tasoero heijastuu koko kuivumisjakson ajan. Koska männyn alkukosteus on selvästi suurempi kuin koivun, on männystä haihtunut saman kuivumisjakson aikana kuitenkin noin 47 % enemmän vettä kuin koivusta.



Kuva 27. Mänty- ja koivupaalien kuivuminen metsätien varressa huonossa kuivumisympäristössä.

Kasojen peittämisen vaikutusta energiapuun kuivumiseen tutkittiin peittämällä jokaisesta kasasta puolet syyskuun alussa 2009 ja seuraamalla kosteuden muutoksia kasojen peittämättömissä ja peitetyissä osissa. Kasojen peittäminen suojaasi kasoja kastumiselta syksyn ja talven aikana. Joulukuussa 2009 mitatut peitetyt energiapuukat olivat noin 6 prosenttiyksikköä kuivempia kuin peittämättömät kasat (Kuva 28). Saatu tulos on yhtenevä aiempien tutkimusten kanssa (Hillebrand & Nurmi 2004; Nurmi & Hillebrand 2007). Terminaalissa varastokasat kastuivat kuitenkin syksyn ja talven aikana selvästi enemmän kuin metsätien varressa. Ero peitettyjen ja peittämättömien kasojen välillä oli kuitenkin samansuuruinen kuin metsätien varressa olleissa kasoissa. Syynä terminaalissa olleiden kasojen voimakkaaseen kastumiseen saattaa olla sadeveden ja tuiskulumen helppo pääsy kasaan aukealla paikalla, joka nostaa kasan kosteutta. Seuraavan vuoden heinäkuussa kosteusero peitettyjen ja peittämättömien varastokasojen välillä oli vielä suurempi, 12 – 15 %-yksikköä ja syyskuun lopussa 9 – 11 %-yksikköä. Peitetyissä kasojen osissa energiapuun kosteus aleni jo alle 30 prosenttiin.



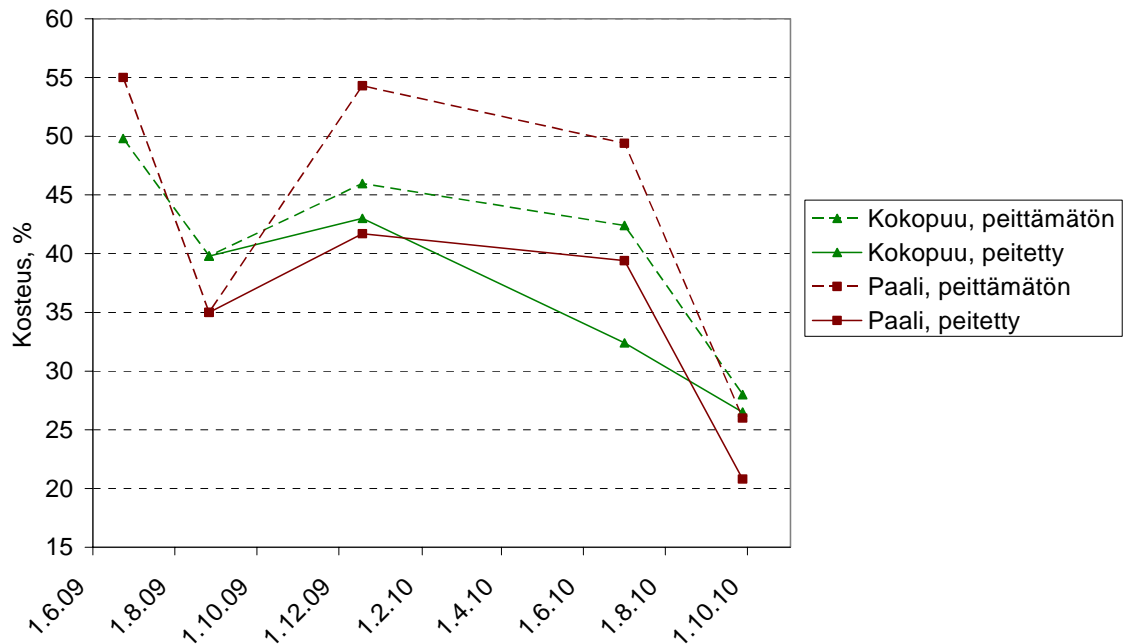
Kuva 28. Varastokasan peittämisen vaikutus energiapuun kosteuden muutoksiin erilaisissa kuivumisympäristöissä (koko aineisto). Kasojen peittäminen tehtiin syyskuun alussa 2009.

Puutavaralajin (kokopuu vs. kokopuupaali) vaikutusta kuivumiseen seurattiin sekä metsätien varressa että terminaalissa. Pääpuulajina kaikissa kasoissa oli mänty. Kummassakin paikassa tutkimuksessa oli kuitenkin käytössä vain yksi vertailukasapari, joten saadut tulokset perustuvat hyvin suppeaan aineistoon ja ovat siten vain suuntaa antavia. Lisäksi metsätien varressa kokopuukasa sijaitsi hieman paremmassa kuivumisympäristössä kuin paalikasa. Terminaalissa tarkasteltavat kasat sijaitsivat vierekkäin.

Metsätien varressa kokopuukasa ja kokopuupaalikasa kuivuivat ensimmäisen kevään ja alkukesän aikana samaan tahtiin. Loppukesällä paalikasa oli noin viisi prosenttiyksikköä kosteampi kuin kokopuukasa, mikä todennäköisesti johtuu paalikkasan huonommasta kuivumisympäristöstä. Muodostunut kosteusero kasojen välillä säilyi vuoden loppuun asti. Seuraavan vuoden heinäkuun alussa kasojen kosteudet olivat lähes samat.

Terminaalissa ensimmäisen kesän aikana paalikasa kuivui nopeammin kuin kokopuukasa (Kuva 29), paalikkasan kosteuden ollessa kesän lopussa n. 35 % ja kokopuukasan n. 40 %. Molemmat kasat kastuivat kuitenkin voimakkaasti loppusyksyn ja talven aikana, riippumatta siitä olivatko kasat peitetty vai ei. Kastuminen oli voimakkaampaa paalikkasassa. Tämä saattaa johtua paalikkasan kapeammasta leveydestä. Kuitenkin kesän aikana muodostunut kosteusero kasojen välillä säilyi koko talven ajan. Seuraavan vuoden kevään ja kesän aikana kokopuukasa kuivui kuitenkin voimakkaammin kuin paalikasa ja kosteus kokopuukasassa sekä peitettyssä että peittämättömässä osassa oli noin seitsemän prosenttiyksikköä alhaisempi kuin paalikkasassa vastaavissa kohdissa. Syyskuun lopussa 2010 kosteudet kasoissa olivat noin 27 %. Selvää vastausta näiden kahden puutavaralajin keskinäisestä kuivumisnopeudesta ei tämän suppean aineiston perusteella pysty varmuudella sanomaan. Tulosten mukaan kuitenkin kasojen

peittäminen selvästi auttaa pitämään kasat kuivempina molemmilla puutavaralajeilla.

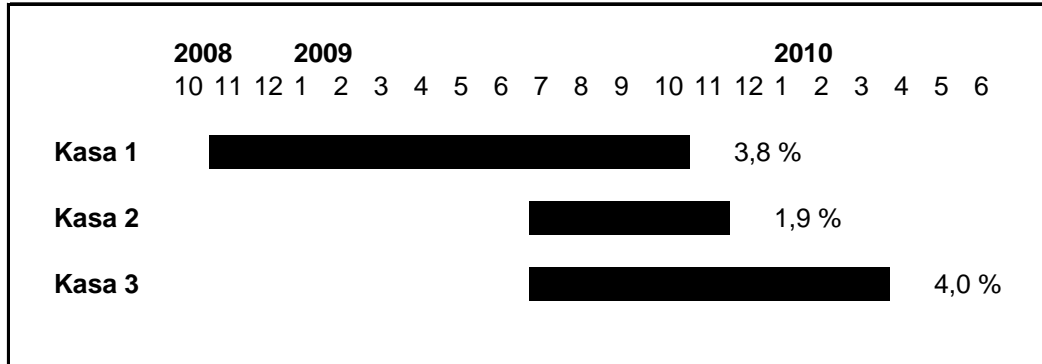


Kuva 29. Terminaalissa kuivuneiden kokopuukasan ja kokopuupaalikasan kosteuden muutos tarkasteltuna ajanjaksona.

4.1.3 Varastohävikki

Kokopuuvarastojen varastohävikki (varaston purkamisen yhteydessä maahan varaston pohja-alalle jäävä puuainees) mitattiin kolmessa eri kohteessa. Kussakin kohteessa varaston maapohja-alasta erotettiin ensin 10 x 10 metrin ala, josta kerättiin kaikki suurempi puuainees pois punnitusta varten. Tämän jälkeen ko. alalta erotettiin 2 x 2 metrin ala, josta kerättiin kaikki loput risut ja neulas, jotka punnittiin. Lopuksi mitattiin varaston kokonaispinta-ala, jonka perusteella punnittu näytemassa suhteutettiin koko varaston pohjapinta-ala vastaavaksi. Näin saatua varastohävikkiä vastaavaa puuaineesen massaa verrattiin varaston alkuperäiseen kokonaismassaan, jonka perusteella laskettiin varastohävikkiprosentti.

Kuva 30 esittää kunkin varastokasan aikajanaa tekoajankohdasta varaston purkuun sekä laskettua varastohävikkiä. Talvella puretun varaston hävikki on mitattu seuraavana keväänä, jotta kaikki puuainees on saatu irti maasta. Mitatut varastohävikit ovat kahdesta neljään prosenttiin varaston kokonaismassasta. Varastohävikistä noin 60 % muodostuu isommista puista ja risuista ja loput ohuista risuista ja neulasista.



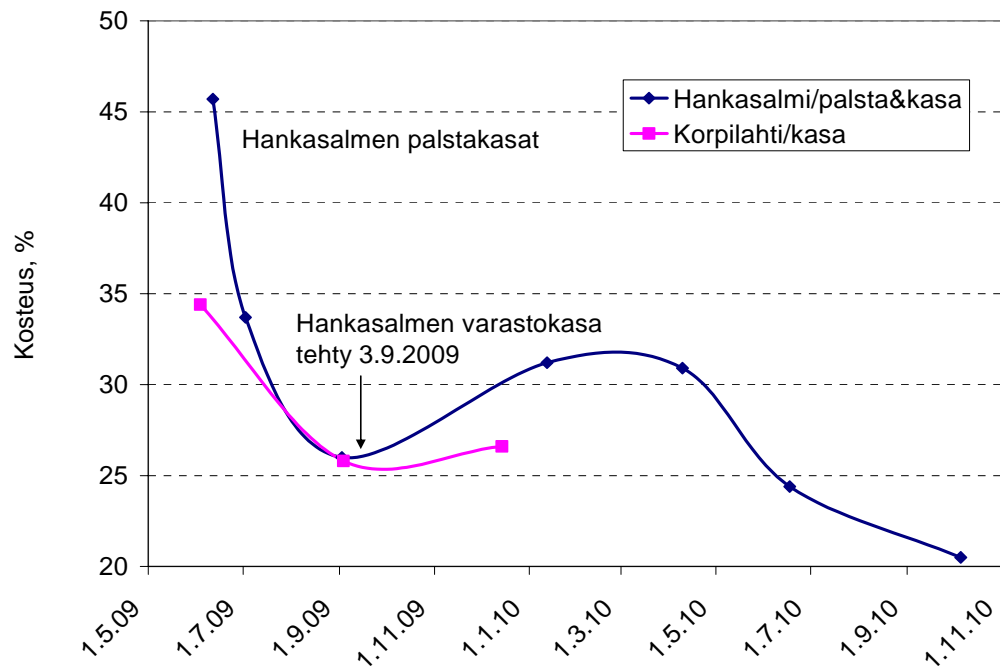
Kuva 30. Varastohävikin mittauksessa olleiden eri varastokasojen aikajana tekoajankohdasta varaston purkuun ja kasojen varastohävikki prosentteina varaston kokonaismassasta.

4.1.4 Kantojen kuivuminen

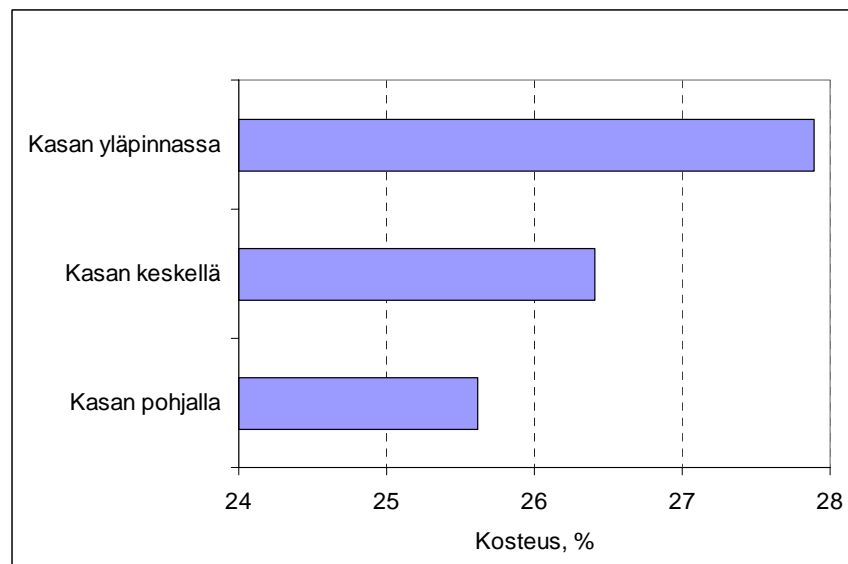
Kantojen kosteuden muutosta seurattiin kahdessa kohteessa, Korpilahdella ja Hankasalmella. Korpilahdella seurannassa oli lokakuussa 2008 nostetut kannot. Varastokasa oli tehty toukokuussa 2009, josta ensimmäinen kosteusnäyte kasan pintakannoista otettiin kesäkuun alussa. Hankasalmella kannonnosto tapahtui kesäkuun alussa 2009, jolloin nostetut kannot kasattiin ensin pieniin palstakasoisiin. Kantojen annettiin kuivua palstakasoissa kesän yli ja varastokasa tehtiin syyskuun alussa. Korpilahdella varastokasa sijaitsi metsätien varressa itä-länsisuunnassa. Näkymä etelään oli avoin, mutta kasan toisella sivustalla (pohjoispuolella) oli tiheä metsikkö. Hankasalmella kannonnosto- ja varastoalue oli avoin ja sijaitsi heti kantatien varressa.

Palstalla olleista kantokasoista otettiin säännöllisin välein kosteusnäytteitä ennen varastokasan tekoa. Kustakin palstakasasta otettiin useita näytteitä eri kannoista ja kannon eri osista, joista määritettiin kunkin palstakasan keskimääräinen kosteus. Kosteusnäytteet otettiin porakoneeseen kiinnitetyllä 20 mm:n puuporalla. Saatujen kosteuksien avulla määritettiin sitten kaikkien palstakasojen keskikosteus. Varastokasojen kosteus mitattiin kasassa olleiden pintakantojen kosteuksien perusteella. Varastokasan purkamisen yhteydessä kosteuksia mitattiin sekä pintakannoista että kasan poikkileikkauksesta, eri korkeuksilta varastokasaa.

Kuva 31 esittää kantojen keskikosteuden muutosta seurantajakson aikana. Korpilahdella kannot olivat kuivuneet noin 35 %:iin kesäkuun alkuun mennessä. Kosteusero kasan etelä- ja pohjoissivujen välillä oli kuitenkin suuri. Varastokasan eteläpuolella kantojen mitattu keskikosteus oli 30,9 % ja pohjoispuolella 37,9 %. Kannot kuivuivat hyvin kesän aikana ja kosteus tipahti syksyyn mennessä noin 26 %:iin, mutta nousi muutamalla prosenttiyksiköllä alkutalven aikana. Kuva 32 esittää varastokasan purkamisen yhteydessä mitatut kasan profiilin keskikosteudet. Kosteudet mitattiin kasan kolmesta poikkileikkausprofiilista kasan keskikohdasta, kasan ylä-, keski- ja alaosasta. Kosteusero kasan eri osissa oli noin 2,5 prosenttiyksikköä.



Kuva 31. Kantojen kosteuden muutos seurantajakson aikana Korpilahdella ja Hankasalmella. Hankasalmen palstakasat koottiin varastokasaksi syyskuun alussa 2009.



Kuva 32. Korpilahden kantokasan kosteusprofiili varaston purkamisen yhteydessä 15.12.2009.

Hankasalmella kantojen kosteus noston jälkeen oli noin 46 %. Palstakasoissa kannot kuivuivat nopeasti ja syyskuun alussa niiden keskikosteus juuri ennen varastokasan tekoa oli noin 26 %, eli sama kuin Korpilahdella. Talven aikana varastokasan pintakannoista mitattu keskikosteus nousi 32 %:iin, mutta laski seuraavan kesän ja syksyn hyvien kuivumisolojen ansiosta lähes 20 %:iin. Kanan kosteusprofiili mitattiin lokakuun alussa 2010 kasan kolmesta poikkileikkauksesta. Keskikosteus oli kasan yläosassa (noin metrin etäisyydellä

kasan yläpinnasta) 21,0 %, keskikohdassa 17,4 % ja kasan alaosassa (noin metrin etäisyydellä kasan pohjasta) 18,3 %. Täten loppusyksyllä kasan pinnasta mitatut kosteudet ovat hyvin lähellä kasan poikkileikkauksesta mitattuja kosteuksia.

Kantojen kosteusmittauksien ja säähavaintojen perusteella laadittiin ennustemalli kantojen kosteuden muutokselle. Laskentamalli laadittiin erikseen palstakasoille ja isommalle varastokasalle. Mallin muuttujina käytettiin sääasemalla mitattuja kumulatiivisia haihdunta- ja sadesummaa. *Palstakasoille* kannon kosteuden muutos vallinneissa (tai ennustetussa) sääoloissa voidaan laskea kaavasta (1)

$$w \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ka}}) = w_i - 0,005906 \cdot \sum E + 0,005435 \cdot \sum P, \quad (1)$$

jossa $w_i \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ka}}) =$ kantojen lähtökosteus = 0,8416 kg/kg = 45,7 %,
 $\sum E \text{ (mm)}$ = haihduntasumma tarkastelujaksolla
 $\sum P \text{ (mm)}$ = sadesumma tarkastelujaksolla.

Kuva 33 esittää mallilla (1) laskettua (ennustettua) palstalla olleiden kantojen kosteuden muutosta vallinneissa sääoloissa sekä mitatut kosteudet.



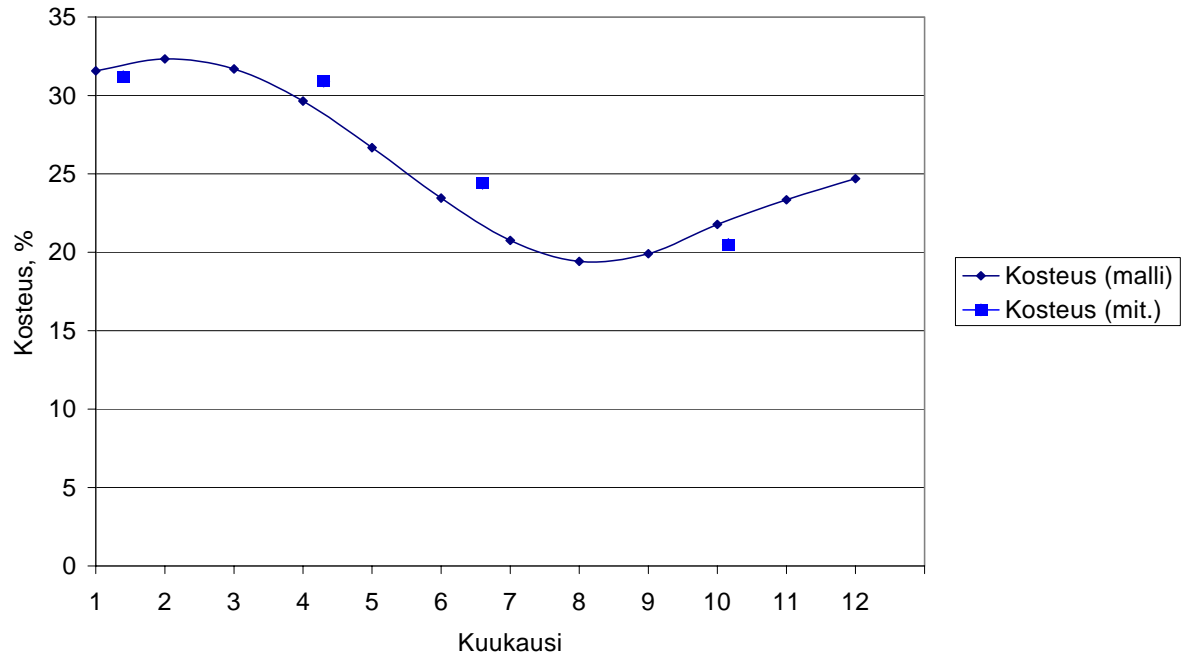
Kuva 33. Ennustemallilla laskettu palstalla olleiden kantojen kosteuden muutos ja kantojen mitattu keskikosteus. Säätietoina käytetty mitattuja päivittäisiä arvoja.

Varastokasan kantojen kosteus voidaan laskea vastaavasti kaavan (2) avulla:

$$w \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ka}}) = w_i - 0,0008434 \cdot \sum E + 0,0005861 \cdot \sum P, \quad (2)$$

jossa $w_i \text{ (kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ka}}) =$ kantojen lähtökosteus = 0,4368 kg/kg = 30,4 %.

Kuva 34 esittää mallilla (2) laskettua (ennustettua) varastokasassa olleiden kantojen kosteuden muutosta vallinneissa sääoloissa sekä mitatut kosteudet. Alku- ja loppuvuoden haihdunnan säätietoina on käytetty pitkän aikavälin keskiarvoista ekstrapoloituja arvoja, kesäaikana mitattuja arvoja. Talviaikana sadantana on käytetty lumen vesi-arvoa. Tästä johtuen mallin 2 tarkkuus ei ole aivan yhtä hyvä kuin mallin 1.



Kuva 34. Ennustemallilla laskettu varastokasassa olleiden kantojen kosteuden muutos ja kantojen mitattu keskikosteus. Säätieloina käytetty kuukausiarvoja.

Kaavoja 1 ja 2 voidaan käyttää kantojen kuivumisen arviointiin, kun kantojen lähtökosteudet eivät poikkea paljon mallinnuksessa käytetyistä arvoista. Kuivumismalleja muodostettaessa on oletettu, että haihdunta ja sade ovat riippumattomia muuttujia. Koska luonnossa haihdunta ja sade ovat kytköksissä toisiinsa, ei laskenta välttämättä anna oikeaa tulosta, jos kaavoihin sijoittaa mielivaltaisesti, toisistaan riippumattomasti, joko haihdunnan tai sateen kumulatiivisen arvon. Lisäksi on muistettava, että mallit pätevät vain sillä kosteusalueella, mitä mallinnuksessa on käytetty. Kantojen kosteuden muutoksen tarkempi ennustaminen edellyttäisi huomattavasti tiuhempaa näytteiden ottoa kuivumisen seurannan aikana, johon tässä projektissa ei ollut mahdollisuutta. Tällöin monimuuttujamallinnus antaisi luotettavamman ennustemallin ja kantojen alkukosteuskin voitaisiin valita vapaammin.

4.2 Yhteenveto aikaisemmin tehdyistä energiapuun kuivaus- ja varastointitutkimuksista

Tehtävässä laadittiin katsaus aikaisemmin tehtyihin energiapuun kuivaus- ja varastointitutkimuksiin, koskien nuorista metsistä saatavaa pienkokopuuta, hakkuutähteistä paalattuja risutukkeja ja päätehakkuualalta kerättyjä hakkuutähteitä. Yhteenveto on julkaistu erillisenä tutkimusraporttina (Hillebrand 2009).

Aikaisempien tehtyjen tutkimusten mukaan pienkokopuu kuivuu hyvin varastossa kesäaikana. Jos varastokasa on tehty avoimelle paikalle, alenee kosteus yhden kesän aikana alle 40 %:iin. Talven aikanakaan varastokasassa oleva pienkokopuu ei kastu vastaavasti kuten esim. hakkuutähteet. Pienkokopuun varastokasojen peittämisellä saadaan noin kuusi prosenttiyksikköä kuivempaa polttohaketta kuin ilman kasojen peittoa, joka on samaa suuruusluokkaa kuin risutukkien kohdalla (4,5 prosenttiyksikköä). Pienkokopuun varastokasan peittämisellä ei siten ole yhtä suurta vaikutusta kuin hakkuutähteillä, joissa peitetyissä kasoissa tähteen kosteus pysyy 10 - 15 prosenttiyksikköä alhaisempana kuin peittämättömissä kasoissa. Varjossa sijaitsevien pienkokopuutarastokasojen kosteus on 7 - 17 prosenttiyksikköä suurempi kuin avoimella paikalla olevien kasojen kosteus.

Kuivattaessa hakkuutähteitä palstalla ennen varastokasan tekoa, tavoitekosteuden ollessa 35 - 40 %, optimikuivausaika on yhdestä kolmeen viikkoa sääoloista riippuen. Tänä aikana hakkuutähteet kuivuvat alle 40 prosentin kosteuteen ja niiden neulas- ja klooripitoisuus pienenee noin puoleen, jonka jälkeen kuivat hakkuutähdekourakasat kannattaa siirtää tienvarsivarastoon sateelta suojaan.

4.3 Välivarastossa olevien kantojen ja muun energiapuun kosteuden mittaamenetelmän selvittäminen

Tehtävässä koottiin tietoa mahdollisista yksinkertaisista mittaamenetelmistä, joilla voidaan arvioida välivarastossa olevan kantopuun ja muun energiapuun kosteus. Mittaamalla kantokasan pinnassa olevien muutamien kantojen kosteus ja käyttämällä muodostettuja laskentamalleja olisi siten mahdollista ennustaa riittävällä tarkkuudella koko kantokasan keskimääräinen kosteus.

Mittaamenetelmäksi valittiin kosteuden pikamittaus puun pinnalta, jolloin se olisi helposti toteutettavissa esim. varastoalueella. Pikakosteusmittarivertailuun valittiin neljä erilaista mittaria: WSAB Lignomat Mini X, Testo 606-2, Humimeter BLW ja Merlin PM 1-E (Kuva 35 ja Kuva 36). Näistä kolme ensimmäistä perustuu vastusmittaukseen ja neljäs, Merlin PM 1-E, sähkökentän mittaukseen. Mittareiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa (Taulukko 9). Vastusmittaukseen perustuvissa mittareissa mitataan mitta-anturien vastus, jonka avulla saadaan laskettua mitta-antureiden välinen puunkosteus. Vastusmittarit vaativat lämpötilakompensoinnin ja puulajitiedon, joka kertoo mitattavan puun tiheyden. Sähkökenttään perustuvissa mittareissa mitta-anturilla muodostetaan puuhun sähkökenttä, jonka energiahäviötä mitataan. Mittaus vaatii tiedon puulajista.



Kuva 35. WSAB Lignomat Mini X – kosteusmittari (vasemmalla) ja Testo 606-2 – kosteusmittari (oikealla). Kuvat: Antti Heikkinen



Kuva 36. Humimeter BLW– kosteusmittari (vasemmalla) ja Merlin PM 1-E– kosteusmittari (oikealla). Kuvat: Antti Heikkinen

Taulukko 9. Testattujen mittarien ominaisuuksia.

	Lignomat Mini X	Testo 606-2	Humimeter BLW	Merlin PM1-E
Mittattava suure	Kosteus	Kosteus, lämpötila, RH	Kosteus, lämpötila	Kosteus, erillinen lämpötila- ja RH
Mittausalue	6 - 75 %	7 - 55 %	10 - 60 %	5 - 99 %
Mittauslämpötila °C	0 - 50 °C	-10 - 50 C	0 - 50 °C	-10 - 50 C
Virtalähde	1 x 9 V	2 x 1,5 V AAA	4 x 1,5 V AAA	1 x 9 V
Paino	210 g	90 g	230 g + 1500 g	256 g
Resoluutio	0,1/1	0,1	0,1	0,1

Kosteusmittareita koekäytettiin VTT:llä laboratorio-olosuhteissa. Kosteuksia mitattiin koivu, kuusi ja mäntypuusta. Mittauksessa tehtiin kullakin mittarilla 5 – 12 toistoa, joista poistettiin selvästi poikkeavat tulokset ja lopuista laskettiin keskiarvo. Mittaus tehtiin 15 – 17 °C lämpötilassa, missä ilmankosteus oli noin 35 %. Kaikki mittarit olivat helppokäyttöisiä: mittarin käynnistäminen, mitattavan puulajin valinta ja mittauksen tekeminen. Kaikissa mittareissa ei ollut kaikkien puulajien valintakoodeja mukana, joten käyttöohjeen taulukko on hyvä pitää tallella. Joissain mittareissa on mahdollista tallentaa mittauksien tulokset mittarin sisäiseen muistiin ja sieltä edelleen tietokoneelle. Näitä toimintoja ei koekäytön yhteydessä kuitenkaan kokeiltu. Mittareista Humimeter BLW:ssä on automaattinen lämpötilakompensaatio. Testo 606-2 ilmoittaa tarkimmaksi käyttölämpötilaksi 25 °C. Lignomat Mini X:n mukana on toimitettu kompensatiotaulukko, jonka avulla eri lämpötilassa suoritettavat mittaukset voidaan korjata.

Mitatut puut olivat alussa tuoreita. Mittarit näyttivät todellista kosteutta pienempiä lukemia virheiden ollessa 5 – 15 %-yksikköä. Poikkeuksen muodosti Humimeter mitattaessa tuoreen koivun kosteutta, jolloin sillä mitattu 10 mittauksien keskiarvo oli 1,1 %-yksikön sisällä uunittamalla saadusta kosteudesta, yksittäisten mittausten hajonnan ollessa 4 %-yksikköä. Yleisesti ottaen mittareiden tarkkuus ei ole riittävä tuoreen puun kosteuden mittaamiseen.

Toisessa kokeessa puita kuivatettiin 23 - 34 % kosteuteen, jonka jälkeen kosteuden annettiin tasaantua puissa ennen mittausta. Mittareiden tarkkuus parani selvästi. Piikkimittareilla päästiin keskiarvoissa 1 – 6 %-yksikön tarkkuuteen, joskin yksittäisten mittaustulosten hajonta oli 5 – 15 %-yksikköä. Hajonta oli pienintä Lignomat-mittarilla ja suurinta Testo-mittarilla.

Kolmannessa kokeessa puut kuivatettiin 17 - 23 % kosteuteen. Koe tehtiin vain kuusipuulla. Tällöin saavutettiin vieläkin suurempi, 2,6 – 3,6 %-yksikön tarkkuus keskiarvoissa ja 1 – 5 %-yksikön tarkkuus yksittäisissä mittauksissa. Mittarit näyttivät puun uunittamalla mitattua keskikosteutta pienempää lukemaa. Hajonta vastasi todennäköisesti puun sisäistä kosteusjakaumaa pinnan ollessa puun keskikosteutta kuivempi. Tarkimman tuloksen antoi Lignomat ja pienimmän hajonnan Testo. Selvästi muista poikkeavia mittaustuloksia ei esiintynyt, kuten kosteammilla puilla suoritetuissa mittauksissa.

Pinnasta mittaavalle, sähkökenttään perustuvalle kosteusmittarille (Merlin PM 1-E) kirveellä halkaistu pinta oli liian karkea. Kun kosteutta mitattiin ja mittaria painettiin tiiviimmin puuta vasten, kosteuslukema kasvoi. Puun moottorisahalla sahatusta päädyistä mitattaessa saatiin parempi lukema. Tällöinkin lukema muuttui mittaria liikutellessa, jos sahauspinta ei ollut aivan suora. Tässä kokeessa mittaustulosten hajonta oli huomattavasti muita mittareita suurempi.

Piikkimittareilla mittaussyvyys oli 3 - 5 mm. Liukuvasaramallin mittarilla (Humimeter BLW) piikit saadaan upotettua syvemmälle puuhun. Saatavilla on piikkejä, jotka mittaavat kosteutta koko piikin matkalta, sekä eristettyjä piikkejä, jotka mittaavat kosteuden pelkästään piikin kärjestä. Tässä kokeessa käytettiin eristämättömiä, koko piikin matkalta kosteuden mittaavia piikkejä. Eristämättömiä piikkejä käytettäessä on myös huomioitava, että ne antavat tulokseksi mittauskohdan korkeimman kosteuslukeman. Tämä on huomioitava esimerkiksi mitattaessa pinnasta kostunutta puuta. Lignomat Mini X:ssa mittauspää on kooltaan muita isompi ja sen käyttäminen pinnaltaan voimakkaasti kaarevassa puussa ei onnistu, koska piikit ja mittarin katkaisija eivät mahdu toimimaan oikealla tavalla.

Yhteenvedona voidaan todeta, että mittareilla saadaan kohtalainen arvio kosteudesta, kun puun kosteus on alle 30 % ja noin 2 %-yksikön tarkkuus kosteuden ollessa noin 20 %. Mittaus on kuitenkin toistettava useita kertoja, hylättävä poikkeavat tulokset, ja laskettava lopuista keskiarvo. Parhaiten tuoreen puun kosteuden mittaamiseen soveltuu Humimeter BLW.

5 Johtopäätökset

Nuorten kasvatusmetsien energiapuupotentiaalin hyödyntämiseksi on kehitteillä menetelmiä, joilla pyritään alentamaan korkeita korjuukustannuksia. Tässä tutkimuksessa selvitettiin kokopuun paalauksen mahdollisuuksia energiapuun korjuussa. Tulosten mukaan paalauksen tuottavuutta olisi edelleen kasvatettava, jotta menetelmä kilpailisi irtokokopuun korjuuketjujen kanssa. Kokopuupaalikasojen ja irtokokopuukasojen kuivumisnopeudessa ei ilmennyt selkeitä eroja. Vertailukelpoisia kasoja oli tosin liian vähän systemaattiseen vertailututkimukseen. Varastokasojen paikoilla ja peittämisellä vaikutti olevan suurempi merkitys kasojen kuivumiseen sekä kostumiseen. Näihin asioihin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Kasojen keskimääräisiin loppukosteuksiin vaikuttavat myös puulajiosuudet. Kasvavan männyn alkukosteus on yleensä suurempi kuin koivun. Kosteusero säilyy pitkässäkin varastointijaksossa, vaikka männystä poistunut vesimäärä olisi suurempi kuin koivusta samassa ajassa haihtunut kosteus.

Varastokasojen kostuminen syksyllä avoimessa terminaalityypisessä ympäristössä oli uusi havainto, josta ei ole tutkimuksissa raportoitu aiemmin. Tämä osoittaa, että kuivauksen hallintaa ja etenkin kastumisen estämistä tarvitaan myös terminaaleissa. Olisi tutkittava keinoja, kuinka varastokasat tulisi terminaalissa sijoittaa ja rakentaa, jotta kosteuden voimakkaalta lisääntymiseltä vältytään.

Kokopuupaalien kuoren rikkomiskokeet tähtäsivät kuivumisen nopeuttamiseen, jotta yhden kesän aikana saataisiin kosteus mahdollisimman pieneksi. Syöttörullien puristuspainetta muuttamalla asiaan ei voitu riittävästi vaikuttaa. Paalien valmistuksen ajankohtana, alkukesästä, kuori irtosi paalien käärinnässä kohtuullisen hyvin. Syöttörullien vaikutus lienee ollut vähäisempi. Jotta kuivumisen voisi ajatella selvästi nopeutuvan, rungot tulisi käsitellä selvästi voimakkaammin. Ehkä rungot tulisi lähes murskata osittain rikki. Näin ainakin mäntyrungoilla. Koivun kuoren rikkominen auttaa kuivumista, mutta mänty pyrkii korjaamaan pihkan avulla pienet rikkoontumiset. Toinen mahdollisuus paalien kuivumisen nopeutumiseen voisi olla paalien ilmanvaihdon parantaminen. Tähän voisi päästä karsimalla runkoja, jolloin tiivis, ilman virtausta hidastava risuaines vähenisi paalin sisältä. Tästä on viitteitä aiemmassa tutkimuksessa, jossa seurattiin osittain kuorittujen ja karsittujen koivurankanippujen kuivumista. Kesän aikana kosteus aleni alle 25 %:n keskilämpimitaltaan 9,5 – 10,5 cm:n rungoilla (Erkkilä ym. 2009). Tosin korjuukustannukset kasvaisivat, mutta kuivista rangoista olisi mahdollista valmistaa hyvälaatuisia haketta kiinteistöihin, mahdollisesti pellettien valmistukseen ja tulevaisuudessa biojalostamokäyttöön. Osittain kuorittu koivu sopisi myös polttopuun raaka-aineeksi.

Kantojen korjuuseen liittyneet tutkimukset osoittivat, että mäntykantoja voidaan nostaa ja saada myös riittävän puhtaaksi polttokäyttöön. Aiemmin ei ole verrattu yksiotekantoharvesteria ja kantoharaa samalla kohteella eikä nostettujen kantojen maa-ainesmääriä ole tarkkaan mitattu. Xteho-yksiotekantoharvesterin tehotuntituottavuus oli 40 % suurempi verrattuna kokeillun kantoharan tuottavuuteen. Käytetystä nostolaitteesta riippumatta tuottavuuslukuihin vaikuttaa, kuinka perusteellisesti kantojen pilkonta ja puhdistus tehdään. Tehdyssä tutkimuksessa tuottavuusvertailu on selkeästi tehtävissä, kun molemmilla laitteilla

saavutettu kantojen puhtaus maa-aineksesta oli yhtä hyvä, korjuu kohde oli sama ja kantojen keskiläpimitat samansuuruiset.

Kantojen puhdistumiseen korjuuprosessin aikana vaikuttaa kantojen pilkkoutuminen sekä kuivausaika palstalla ja varastokasassa. Molemmilla tutkimuksen koalueista kiinnitettiin huomiota paalujuuren puuttumiseen mäntykannoista. Kasvupaikkatekijät voivat vaikuttaa, että syvälle ulottuvaa paalujuurta ei männyissä ollut. Mäntyjen juuristo sitoi maa-ainesta enemmän kuin kuusen juuristo. Siksi puhdistamiseen kului aikaa enemmän. Yksioteharvesterin ja kantoharan nostamien kantojen lähikuljetuksen tuottavuus oli samalla tasolla. Xtehon tekemistä kantopaloista sai suuremman kuormakoon, mutta sillä ei juuri ollut vaikutusta tuottavuuteen. Kantopalat kuivuivat hyvin. Kehitettävää jää kaukokuljetuksen kuormapainon saamiseksi sallitun suuruisiksi. Kantokuorman tiivistämiskäytännöt ovat tarpeen.

Kantokasojen kuivumisen mallintaminen saatiin tutkimuksessa hyvään alkuun. Malli laadittiin kuusikannoille. Mallin käyttökelpoisuutta lisääisi laajempi tutkimusaineisto. Jatkotutkimusta tarvitaan kantojen kuivumismallin testaamiseen ja lisäaineiston keräämiseen. Mäntykantojen korjuu tulee lisääntymään uuden laitekannan myötä. Mäntykantokasojen mallintaminen tulee myös tarpeelliseksi. Muidenkin energiapuumuotojen kuivumismallien laadinta varastojen seurantaan ja kuljetusten optimointiin on vielä tarpeen.

Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteina olivat energiapuun korjuun tehostaminen ensiharvennusleimikoista ja etenkin nuoren metsän hoitokohteista paalaustekniikan avulla. Toiseksi tavoitteena oli edistää kantojen korjuuteknologiaa, joka soveltuu myös mäntykantojen nostoon sekä maa- ja kiviaineksen erottamiseen kannoista ja juurakoista. Kolmantena tavoitteena oli tutkimuksen avulla parantaa varastoidun energiapuun laatua ja vähentää välivarastohävikkiä.

Fixteri II -kokopuupaalaimen perustuvan aines- ja energiapuun hankinnan kilpailukykyä selvitettiin. Kokopuun paalaus -tuotantoketjun kustannuksia verrattiin vaihtoehtoisten tuotantoketjujen kustannuksiin pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun hankinnassa. Matalimmat kuitupuun hankintakustannukset saavutettiin aines- ja energiapuun integroidussa hankinnassa kahden kasan menetelmällä. Integroidussa hankinnassa myös kokopuuhakkeen kokonaiskustannukset olivat kilpailukykyiset. Energiapuupaaleista tehdyn polttihakkeen hankintakustannukset olivat korkeammat kuin erilliskorjatun tai integroidusti korjatun kokopuuhakkeen hankintakustannukset.

Tehdyt vertailulaskelmat osoittivat, että kokopuun paalaus -tuotantoketju on sitä kilpailukykyisempi, mitä pienirunkoisempaa korjattava ensiharvennuskuitupuun on. Kokopuun paalauksen optimaalinen toiminta-alue on ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7 – 10 cm. Kokopuun paalauksen suhteellinen vahvuus on kuitu- ja energiapuun yhdistetyssä hankinnassa. Kustannuskilpailukyky pelkän energiapuun hankinnassa on heikko. Vaikka kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky näyttää suhteellisen heikolta verrattuna esimerkiksi aines- ja energiapuun integroituun hankintaan kahden kasan menetelmällä, uudet puunkäyttäjät (esim. biojalostamot) saattavat luoda uusia mahdollisuuksia kokopuun paalaukseen perustuvalla tuotantoketjulle.

Kokopuupaalien kuivumista pyrittiin tehostamaan poistamalla tai rikkomalla kuorta. Kuoren rikkoutumista pyrittiin lisäämään syöttörullien puristuspainetta kasvattamalla, jolloin syöttörullien piikit rikkovat runkojen kuorta tavanomaista enemmän. Kokeissa valmistettiin vertailuksi tavanomaisia energiapuupaaleja ja suuremmalla syöttörullien puristuspaineella käsiteltyjä paaleja kuivumis seuranta varten. Seurannassa olleiden paalien poistetun tai rikutun kuoren osuuden vaikutusta kuivumiseen ja paalien loppukosteuteen ei voinut havaita. Rikkoutuneen kuoren tai kuoriutuneen pinnan osuus koivupaaleissa oli 21 – 49 % ja mäntypaaleissa 19 – 39 %. Paalin sidontalaitteet kuorivat myös paalin ulompia runkoja paikallisesti. Talvella puun ollessa jäässä kuori ei irtoa yhtä hyvin, jolloin syöttörullien puristuspaineen vaikutus voi tulla paremmin esiin. Paalien loppukosteudet olivat kahden kuivumiskauden pituisen seurannan lopussa energiakäyttöön sopivan alhaiset, 16 – 24 %.

Paalauksen avulla voidaan alentaa energiapuun kuljetuskustannuksia tiiviimmän kuorman, kuorman suuremman energiasisällön ja tehokkaamman logistiikkaoptimoinnin avulla. Kokopuun paalauksen optimaalinen toiminta-alue on ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7 – 10 cm. Tällä läpimittarajoitteella vuotuinen kokonaiskertymä Keski-Suomessa on

keskiläpimitaltaan 8 – 11 cm:n leimikoilta 66 400 m³ ja 7 - 12 cm läpimittaluokan leimikoilta 111 200 m³. Läpimittaluokaltaan 7 - 12 cm:n leimikoilta vuotuinen energiapuukertymä ilman läpimittarajoitetta Keski-Suomessa olisi 299 300 m³.

Keskimääräinen kuljetusmatka energiapuupaaleille Keski-Suomessa on 80 km. Suoran autokuljetuksen kuljetuskustannus tälle kuljetusmatkalle on 6,2 €/m³. Junakuljetus muodostuu edullisemmaksi kuljetusmuodoksi vasta yli 150 km:n kaukokuljetusmatkoilla, mikäli autolla tapahtuva alkukuljetusmatka on 60 km. Alkukuljetusmatkan ollessa 30 km junakuljetus on kuitenkin autokuljetusta edullisempaa jo kaukokuljetusmatkan ollessa yli 65 km. Keski-Suomen tapauksessa rautatiekuljetus muodostuisi kilpailukykyiseksi kuljetusmuodoksi Pihtiputaan ja Kinnulan alueilla sekä Kivijärven ja Viitasaaren kuntien pohjoisosissa. Lyhyemmällä 30 km alkukuljetusmatkalla rautatiekuljetus olisi kannattavaa myös Kannonkosken ja Saarijärven alueilla.

Kantojen hyödyntäminen energiakäyttöön on pääasiallisesti rajoittunut kuusten kantoihin. Tehtyjen kokeiden perusteella myös mäntykantojen irrotukseen ja puhdistukseen on kehitetty toimivat laitteet ja menetelmä. Tutkimuksessa saatujen mittaustulosten mukaan Karelian Puu ja Metalli Oy:n kehittämän ja Kareliatech Oy:n valmistaman Xteho-yksiotekantoharvesterin tuottavuus (4,7 m³/h) mäntykantojen nostossa oli 42 % parempi kuin perinteisen kantoharan tuottavuus (3,3 m³/h). Vertailututkimus tehtiin kohteella, jossa mäntykantojen läpimitta oli molemmilla koneilla keskimäärin 28 cm. Kantoläpimitat vaihtelivat 17 – 45 cm:n välillä. Kantojen puhtaus oli yhtä hyvä molemmilla laitteilla nostettuna. Puuaineksen osuus nostettujen kantojen tuoremassasta oli molemmilla koneilla 95 – 96 %. Kantohara käytti noin 30 % enemmän aikaa kannon irrotus- ja puhdistusvaiheeseen sekä yli kaksinkertaisen ajan kantopalojen siirtämisessä kasalle. Myös nostojäljen tasoittamiseen kului aikaa enemmän kuin yksioteharvesterilla. Yksiotekantoharvesterin nostojälki oli pinta-alaltaan noin puolet pienempi kuin kantoharan nostojälki.

Tulosten mukaan myös kantoharalla voitiin nostaa mäntykantoja. Suurimmat kannot kohteella olivat läpimitaltaan 45 cm. Kannot myös puhdistuivat hyvin, mutta aikaa kului enemmän kuin yksiotekantoharvesterilla nostettaessa.

Xteho-yksiotekantoharvesteri soveltuu mäntykantojen lisäksi erittäin hyvin myös kuusen kantojen nostoon. Kuusen kantojen nostossa Xteho-yksiotekantoharvesterin tehotuntuottavuus oli läpimitaltaan 30 cm:n kannoilla noin 40 % ja 40 cm:n kannoilla lähes 60 % parempi kuin mäntykantojen nostossa. Parempi tuottavuus kuusikantojen nostossa johtui kuusijuurakon nopeammasta puhdistuvuudesta. Tehotuntuottavuus oli yli 12 m³/h kuusikannon läpimitan ollessa 40 cm.

Yksiotekantoharvesterin tehotuntuottavuus mäntykantojen nostossa vaihteli välillä 1 – 25 m³/h riippuen eri tekijöistä. Tehotuntuottavuuteen vaikuttavat useat muuttujat. Suoraa vertailua muissa tutkimuksissa saatuihin tuottavuuksiin ei voi luotettavasti ja tasapuolisesti tehdä varsinkin, kun kantojen puhtautta ei ole muissa tutkimuksissa selvitetty. Yli 40 % parempi tuottavuus mäntykantojen nostossa kantoharaan verrattuna ja edelleen yli 40 % suurempi tuottavuus kuusikantojen nostossa verrattuna mäntykantojen nostoon osoittavat Xteho-yksiotekantoharvesterin käyttökelpoisuuden kantojen korjuuketjussa.

Tämän tutkimuksen kokeissa kantojen lähikuljetuksen tuottavuudet olivat 8,3 – 8,9 m³/h. Keskimääräinen kuormakoko yksiotekantoharvesterin kantoja kuljetettaessa oli Joensuussa 4,4 m³ ja Toivakassa 5,5 m³ ja kantojaran kantoja kuljetettaessa Toivakassa 4,7 m³. Kuormakoot olivat pieniä verrattuna aiempien tutkimusten tuloksiin. Pienet kuormakoot ja pienet kertymät huomioon ottaen lähikuljetuksen tuottavuudet olivat samaa luokkaa aiempien tutkimusten kanssa.

Nostetut ja varastoidut kannot olivat tehtyjen määritysten mukaan sopivia polttoon. Kantojen puhdistumiseen vaikuttaa palstalla kuivumisaika ennen lähikuljetusta ja pitkäaikaisvarastointi tien varressa. Yli vuoden kestäneen varastokauden jälkeen mänty- ja kuusikantomurskenäytteiden tuhkapitoisuus oli vain 2 – 7 % ja kosteudet olivat 20 – 26 %. Toivakassa nostettujen mäntykantopalojen kosteus kolmen viikon kuivumisen jälkeen palstalla oli 22 – 26 %. Mäntykantojen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli Joensuun kahdesta kannosta määritettynä 18,8 ja 20,8 MJ/kg.

Projektin kuivausosassa tutkittiin energiapuun pitkäaikaisen varastoinnin vaikutusta puuaineksen kosteuteen ja varastohävikkiin. Jos puun kosteutta pystytään alentamaan 55 %:sta 40 %:iin, puun alkuperäinen vesimäärä puolittuu, jolloin tehollinen lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti kasvaa lähes 10 %. Toisaalta puun varastointi ja puun siirtely aiheuttavat varastohävikkiä. Lisäksi laadittiin yhteenveto aikaisemmin tehdyistä pienkokopuun, paalattujen hakkuutähteiden ja irtonaisten hakkuutähteiden kuivaus- ja varastointikokeista ja niistä saaduista tuloksista.

Energiapuun kuivaus ja varastointi tehtiin tienvarsivarastoissa sekä terminaalissa. Metsätien varressa olevat varastot sijoitettiin kuivumisolosuhteiltaan sekä huonoon että hyvään ympäristöön. Varastointikokeita tehtiin irtonaisissa kokopuukasoissa ja paalatuissa kokopuunippukasoissa. Varastokasat peitettiin peittopaperilla siten, että noin puolet kasasta oli peitetty. Erilaisissa varastointitekniikoissa otettiin huomioon kasojen sijainti, ympäristö ja peittäminen. Yhteensä tutkittuja energiapuukasoja oli 11 kappaletta. Polttoaineen laadun muutoksia seurattiin ottamalla kosteusnäytteitä kokeen alussa ja lopussa sekä tietyin välein varastointijakson aikana. Varastohävikkiä, varastokasan pohjalle jäävän puuaineksen määrää, mitattiin kolmessa kohteessa. Varastokasan pohjalle jääneen puuaineksen osuus määritettiin koko kasan osuudesta. Kantopuun kosteuden muutoksia seurattiin sekä palstakasoissa että suurissa varastokasoissa, joille kummallekin muodostettiin laskentamallit kosteuden muutoksen ennustamiseen.

Ensimmäisen kevään ja kesän aikana energiapuun keskimääräinen kosteus aleni lähes 40 prosenttiin, mutta nousi talven aikana noin viisi prosenttiyksikköä. Seuraavan vuoden loppusyksyllä kosteus oli alentunut noin 32 prosenttiin. Varastokasan sijainti ja ympäristö vaikuttavat kuitenkin energiapuun kuivumiseen merkittävästi. Metsätien varressa kuivumisolosuhteet eivät vaihtele yhtä voimakkaasti kuin avoimella paikalla ja puun kosteuden aleneminen on siten tasaisempaa kuin terminaalissa. Terminaalissa kevään ja kesän aikana energiapuu kuivuu nopeammin kuin metsätien varressa, mutta kastuu myös helpommin syksyn ja talven aikana.

Peitetyt energiapuukasat olivat ensimmäisen kesän jälkeen noin kuusi prosenttiyksikköä kuivempia kuin peittämättömät kasat. Seuraavan vuoden

heinäkuussa kosteusero peitettyjen ja peittämättömien varastokasojen välillä oli vielä suurempi, 12 – 15 %-yksikköä ja syyskuun lopussa 9 – 11 %-yksikköä. Peitetyissä kasojen osissa energiapuun kosteus aleni jo alle 30 prosenttiin.

Kokopuukasa ja kokopuupaalikasa kuivuivat metsätien varressa samaan tahtiin. Terminaalissa ensimmäisen kesän aikana paalikasa kuivui nopeammin kuin kokopuukasa, paalिकासan kosteuden ollessa kesän lopussa noin 35 % ja kokopuukasan noin 40 %. Molemmat kasat kastuivat kuitenkin voimakkaasti loppusyksyn ja talven aikana, riippumatta siitä olivatko kasat peitetty vai ei. Kuitenkin kesän alussa muodostunut kosteusero kasojen välillä säilyi koko talven ajan. Seuraavan vuoden kevään ja kesän aikana kokopuukasa kuivui kuitenkin voimakkaammin kuin paalikasa ja kosteus kokopuukasassa sekä peitetyssä että peittämättömässä osassa oli noin seitsemän prosenttiyksikköä alhaisempi kuin paalिकासassa vastaavissa kohdissa. Loppusyksyllä, hyvän loppukesän kuivumisjakson jälkeen, kasojen kosteuden olivat lähes samat, ollen alle 30 prosenttia. Tulosten mukaan kokopuupaalikasa sekä kuivui että myös kastui hieman helpommin kuin kokopuukasa, johtuen todennäköisesti kasan muodosta. Kasojen peittäminen auttaa kuitenkin selvästi pitämään kasan kuivempana molemmilla puutavaralajeilla. Peitetyissä kasan osissa molemmissa kasoissa kosteus oli alkusyksyllä noin 10 prosenttiyksikköä alempi. Saatu tulos eri energiapuulajien keskinäisestä kuivumisesta perustuu hyvin suppeaan aineistoon ja vaatisi selvästi laajemman keskinäisen vertailun kuivumistuloksen varmistamiseksi. Täten saatua tulosta on pidettävä vain suuntaa antavana.

Mitatut varastohävikit olivat kahdesta neljään prosenttiin varaston kokonaismassasta. Varastohävikistä noin 60 % muodostuu isommista puista ja risuista ja loput ohuista risuista ja neulasista.

Lähdeviitteet

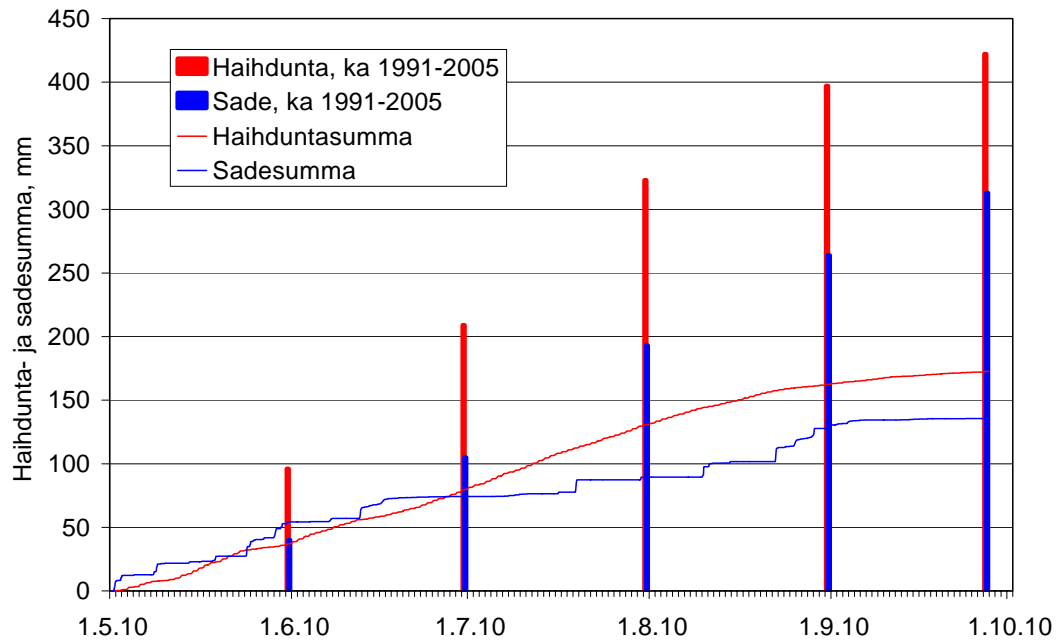
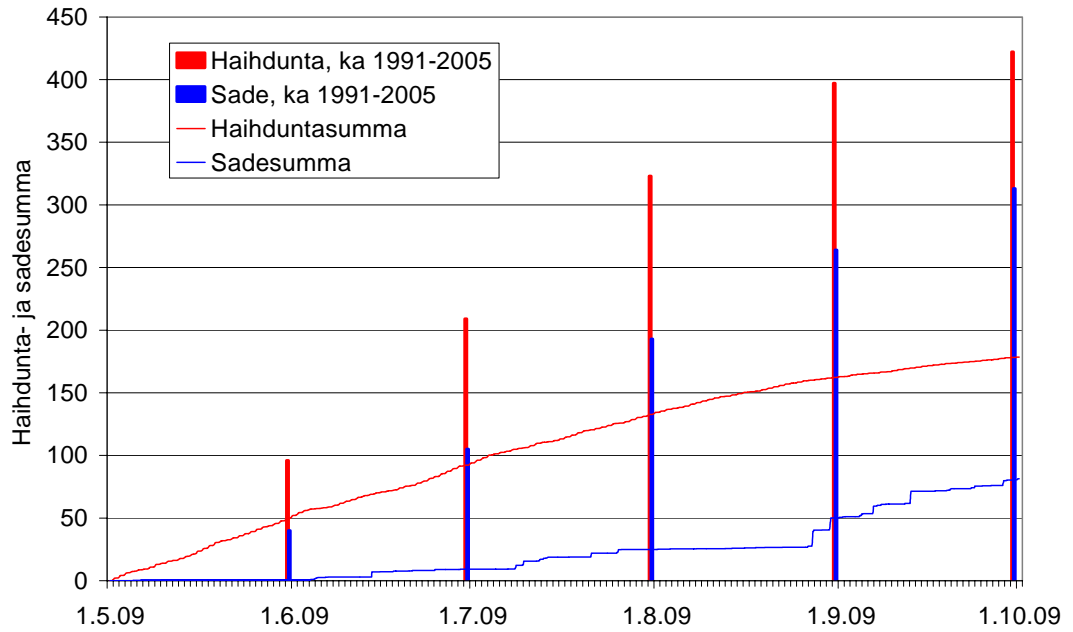
- Ahonen M. & Mäkelä M. 1972. Juurakoiden irrottaminen maasta pyöräkuormaajalla. Folia Forestalia 140. 21 s.
- Erkkilä, A., Hillebrand, K., Heikkinen, A., Kaipainen, H., Tiihonen, I., Oravainen, H., Sikanen, L., Röser, D. 2009. Partial debarking and scarifying patterns as accelerants of natural drying of birch and pine energywood stems. Bioenergy 2009, Sustainable Bioenergy Business, International Bioenergy Conference and Exhibition. Part 1, 31th August – 4th September 2009, Jyväskylä, Finland. p. 423 - 432
- Hakkila P. 1989. Utilization of residual forest biomass. Springer series in wood science. 568 s.
- Hakkila, P. 1976. Kantopuu metsäteollisuuden raaka-aineena. Folia Forestalia 292.
- Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi. Yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. Tutkimusraportti VTT-R-07261-09.
- Hillebrand, K.; Nurmi, J. 2004. Nuorista metsistä korjatun energiapuun kuivatus ja varastointi. Projektiraportti, PRO2/P6014/04. VTT Prosessit. Jyväskylä.
- Kariniemi, A. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2009. Metsätehon katsaus 43/2010.
- Koivulehto, P. 1969. Juurakoiden maasta irrottamisesta. Folia Forestalia 73. 12 s.
- Korhonen, J. 2007. Hydrologinen vuosikirja 2001 – 2005. Suomen ympäristökeskus (SYKE), Suomen ympäristö 44/2007. Helsinki 2007.
- Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. ja Keskinen, S. 2009. Kokopuun paalaus –tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 211. ISSN 1796-2374 1.
- Laitila, J. 2010. Kantojen korjuun tuottavuus. Metlan työraportteja 150.
- Laitila, J. 2008. Nykyisten kannonnostomenetelmien soveltuvuus mäntykantojen nostoon. Raportti VTT:lle, julkaistu pdf-muodossa Internetissä, http://www.metsakeskus.fi/NR/rdonlyres/67012D8F-FBB0-4FC0-982E-3CD1A974666C/11561/Metla_Nostomenetelmien_soveltuvuus_mannyn_kannoill.pdf
- Laitila, J., Ala-Fossi, A., Vartiamäki, T., Ranta, T. ja Asikainen, A. 2007. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen tuottavuus. Metlan työraportteja 46.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. Biomass&Bioenergy 31 (2007) 381-392.

Röser, D., Mola-Yudego, B., Sikanen, L., Prinz, R., Emer, B., Väätäinen, K., Erkkilä, A., Heikkinen, A., Hillebrand, K., Oravainen, H. 2010. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. Will be published in pdf format.

Stenzel, E. 1946. Zur Frage der Stockrodung. Holz-Zentralblatt 28/1946. Stuttgart.

Äijälä, O., Kuusinen, M., Koistinen, A. 2010. Energiapuun korjuu ja kasvatus, Hyvän metsänhoidon suositukset. Tapio.

Haihdunta- ja sadesumma vuosina 2009 (yläkuva) ja 2010 (alakuva) metsätien varressa sekä pitkän aikavälin (1991 – 2005) kumulatiiviset keskiarvot.



Haihdunta- ja sadesumma vuosina 2009 (yläkuva) ja 2010 (alakuva) avoimella paikalla terminaalissa sekä pitkän aikavälin (1991 – 2005) kumulatiiviset keskiarvot.

