
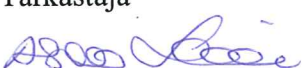


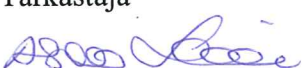


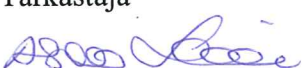



Energiapuun kuivaus ja varastointi

Yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista

Kirjoittajat: Kari Hillebrand

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Energiapuun kuivaus ja varastointi - yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista				
Asiakkaan nimi, yhteystiedot Keski-Suomen metsäkeskus, Ari Nikkola Kauppakatu 19 B, PL 39, 40101 Jyväskylä	Asiakkaan viite VTT-V-26121-08			
Projektin nimi Metsäenergian uudet mahdollisuudet ja niiden kehittäminen	Projektin numero/lyhytnimi 26121/Metsäenergia			
Raportin laatija(t) Kari Hillebrand	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 17 s.			
Avainsanat Energiapuu, kuivaus, varastointi	Raportin numero VTT-R-07261-09			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä yhteenvetoraportti on osa Keski-Suomen metsäkeskuksen tilaamaa 'Metsäenergian uudet mahdollisuudet ja niiden kehittäminen' -tutkimuskokonaisuutta. Raportissa luodaan katsaus aikaisemmin tehtyihin energiapuun kuivaus- ja varastointitutkimuksiin, koskien nuorista metsistä saatavaa pienkopuuta, hakkuutähteistä paalattuja risutukkeja ja päätehakkuualalta kerättyjä hakkuutähteitä.</p> <p>Pienkokopuu kuivuu hyvin varastossa kesäaikana. Jos varastokasa on tehty avoimelle paikalle, alenee kosteus yhden kesän aikana alle 40 %:iin. Talven aikana varastokasassa oleva pienkokopuu ei kastu vastaavasti kuten esim. hakkuutähteet. Pienkokopuun varastokasojen peittämisellä saadaan noin 6 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. Peittämistä tärkeämpi tekijä pienkokopuun kohdalla on varastokasan ympäristö. Varjossa sijaitsevien pienkokopuutarastokasojen kosteus on 7 - 17 prosenttiyksikköä suurempi kuin avoimella paikalla olevien kasojen kosteus.</p> <p>Kuivattaessa hakkuutähteitä palstalla ennen varastokasan tekoa, tavoitekosteuden ollessa 35 - 40 %, optimikuivatusaika 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.</p>				
Luottamuksellisuus	Julkinen			
<p>Jyväskylä 9.10.2009</p> <table border="0"> <tr> <td>Laatija  Kari Hillebrand, erikoistutkija</td> <td>Tarkastaja  Arvo Leinonen, tiiminvetäjä</td> <td>Hyyäksyjä  Jouni Hämäläinen, teknologiapäällikkö</td> </tr> </table>		Laatija  Kari Hillebrand, erikoistutkija	Tarkastaja  Arvo Leinonen, tiiminvetäjä	Hyyäksyjä  Jouni Hämäläinen, teknologiapäällikkö
Laatija  Kari Hillebrand, erikoistutkija	Tarkastaja  Arvo Leinonen, tiiminvetäjä	Hyyäksyjä  Jouni Hämäläinen, teknologiapäällikkö		
VTT:n yhteystiedot Koivurannantie 1, PL 1603, 40101 Jyväskylä				
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Keski-Suomen metsäkeskus, VTT				
<p><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>				

Alkusanat

Tämä yhteenvetoraportti on osa Keski-Suomen metsäkeskuksen tilaamaa 'Metsäenergian uudet mahdollisuudet ja niiden kehittäminen' -tutkimuskokonaisuutta. Tutkimuksen tavoitteena on tehostaa energiapuun korjuuta ensiharvennusleimikoista paalaustekniikan avulla, parantaa kantojen korjuuteknologiaa erityisesti sopimaan myös mäntykantojen nostoon sekä maa- ja kiviaineksen erottamiseksi juurakoista, vähentää varastohävikkiä sekä kasvattaa kokonaisuudessaan korjuuvolumia. Tässä yhteenvetoraportissa luodaan katsaus aikaisemmin tehtyihin energiapuun kuivaus- ja varastointitutkimuksiin, koskien nuorista metsistä saatavaa pienkopuuta, hakkuutähteistä paalattuja risutukkeja ja päätehakkuualalta kerättyjä hakkuutähteitä.

Jyväskylä 9.10.2009

Kari Hillebrand

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
1 JOHDANTO	4
2 ENERGIAPUUN KUIVAUS JA VARASTOINTI	4
2.1 Pienkokopuu.....	4
2.1.1 Kuivauksen vaikutus polttoaineen laatuun.....	5
2.1.2 Varastokasan peittäminen	5
2.1.3 Kuivauksen vaikutus hakkeen muihin laatutekijöihin	7
2.2 Paalattu hakkuutähde.....	8
2.2.1 Varastokasan peittäminen	9
2.2.2 Varaston laadunmuutokset.....	10
2.3 Hakkuutähde	11
2.3.1 Hakkuutähde polttoaineena	11
2.3.2 Laatuun vaikuttavat tekijät	12
2.3.3 Hakkuutähteiden kuivuminen.....	12
2.3.4 Varastokasan peittäminen	13
2.3.5 Neulasten variseminen kuivumisen aikana.....	14
2.3.6 Optimikuivatusaika palstalla	14

LÄHDELUETTELO

1 JOHDANTO

Esityksessä tarkastellaan kuinka energiapuun kuivatuksella ja varastoinnilla voidaan vaikuttaa polttoaineen laatuun, etenkin sen kosteuteen, lämpöarvoon, energiatiheyteen ja neulaspitoisuuteen. Laatuominaisuuksista tärkein on kosteus, joka kaatotuoreella puulla on 50 – 60 %. Suuret voimalaitokset sietävät metsähakkeessa korkeitakin kosteuksia ja kosteusvaihteluita, mutta pienemmissä laitoksissa kosteus ei saisi ylittää 40 %. Toisaalta jos puun kosteutta pystytään alentamaan 55 %:sta 40 %:iin, puun alkuperäinen vesimäärä puolittuu, jolloin tehollinen lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti (energiatiheys, MWh/i-m³) kasvaa lähes 10 %.

Metsähake voi sisältää runsaasti neulasia. Nuorten metsien kokopuuhakkeen raaka-aineessa neulasten osuus on alun perin männyllä 5 – 9 % ja kuusella 10 – 18 %, päätehakkuualojen hakkuutähteessä neulasia on näihin verrattuna noin kaksinkertainen määrä. Huomattava osa puuston sisältämistä ja kasvulle tärkeistä ravinteista sijaitsee juuri neulas- tai lehtimassassa sekä oksien kuoreissa. Kokopuun korjuussa poistuu kasvupaikalta huomattava osa näistä ravinteista. Puuston kannalta olisikin edullista, mikäli neulasista ja lehdistä voitaisiin päästä eroon ennen puiden välivarastolle ajoa. Tällöin tosin hakkuukertymä pienenee. Koska neulasissa on alkalimetalleja ja klooria, neulasten osuuden pieneneminen polttohakkeessa vähentää osaltaan myös voimalaitosten kattiloiden tulistinpintojen korroosion riskiä.

2 ENERGIAPUUN KUIVAUS JA VARASTOINTI

2.1 Pienkokopuu

Nuorista metsistä energiapuuksi korjatun kokopuun ja joukkokäsittelyn puun kuivatuksen ja varastoinnin vaikutusta polttoaineen laatuun sekä kuivatuksen ja karsinnan vaikutusta neulasten määrään on tutkittu mm. Tekesin Puuenergian teknologiaohjelmassa (Hillebrand & Nurmi 2004). Energiapuun kuivatus ja varastointi on tehty palstalla ja tienvarsivarastoissa. Erilaisissa varastointitekniikoissa on otettu huomioon mm. kasojen sijainti, koko, alusta ja peittäminen. Kuivatus- ja varastointikokeet palstalla on tehty kokopuukasoissa ja puun joukkokäsittelyssä syntyvissä kourakasoissa. Kuivatus ja varastointi suuremmissa varastokasoissa on tehty tienvarressa. Varastokasoja on tehty sekä karsimattomista että puun joukkokäsittelyssä syntyvästä osittain karsituista puista. Osa varastokasoista on peitetty.

Tutkimuksissa on lisäksi selvitetty, kuinka neulasten jääntiä palstalle voidaan edistää pieniläpimittaisen energiapuun korjuun yhteydessä. Tutkimuksessa on verrattiin rasikuivauksen aikaansaamaa neulasten varisemista ja koneellista karsintaa.



Kuva 1. Kokopuun välivarastokasa.

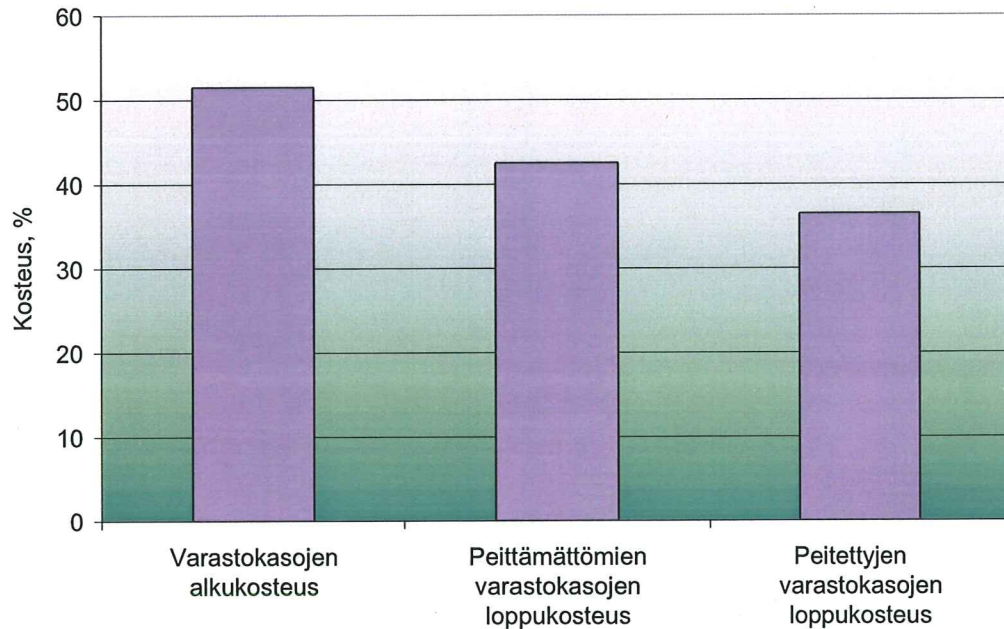
2.1.1 Kuivauksen vaikutus polttoaineen laatuun

Tutkimusten mukaan pienkokopuu kuivuu hyvin välivarastossa kesäaikana. Jos varastokasa on tehty avoimelle paikalle, alenee kosteus yhden kesän aikana alle 40 %:iin. Talven aikanaan varastokasassa oleva pienkokopuu ei kastu vastavasti kuten hakkuutähteet. Joukkokäsiteltujen puiden aisautuminen karsinnan aikana vaikuttaa siihen, että kokopuut ja joukkokäsitellyt puut kuivuvat yhtä hyvin. Jos varastointiaika palstalla muodostuu pitkäksi, on kuivumistulos hyvällä välivarastopaikalla lähes yhtä hyvä. Näin ollen on korjuun kannalta järkevintä ajaa kaadetut puut välittömästi välivarastoon. Koivu- ja mäntykokopuun kuiva-aineen tehollisessa lämpöarvossa ei ole havaittu merkittäviä muutoksia varastoinnin aikana. Tämä viittaa siihen, että alkuainesuhteissa ei ole ehtinyt tapahtua suuria muutoksia. Merkittävämpää on kosteuden muutoksesta aiheutuva lämpöarvon kasvu.

2.1.2 Varastokasan peittäminen

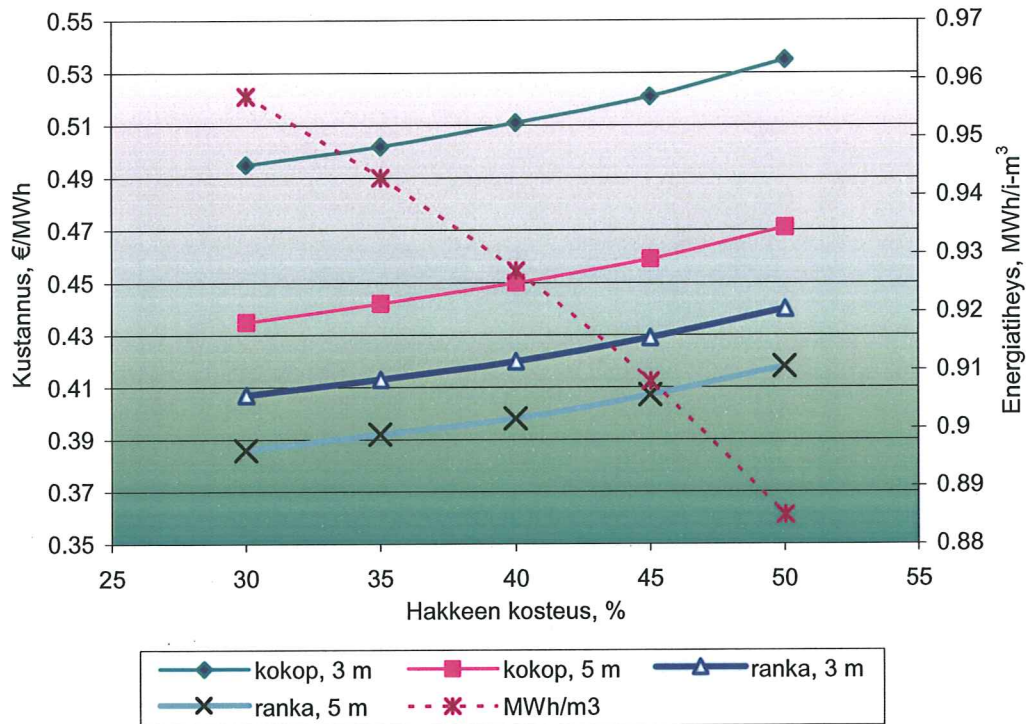
Varastokasan peittämisen vaikutusta kuivumiseen on tutkittu peittämällä osa kasoista kahdella rinnakkaisella peittopaperilla. Varastojen tekovaiheessa kasojen keskikosteus on ollut 52 % ja haketuksen yhteydessä peittämättömien varastokasojen keskikosteus 42 % ja peitettyjen kasojen 36 %. Varastokasojen peittämisellä saadaan siten noin 6 prosenttiyksikköä kuivempaa polttohaketta (kuva 2). Pienpuitten kohdalla varastokasan peittämisellä ei siten ole yhtä suurta vaikutusta kuin hakkuutähteillä, joilla kasojen peittämisellä saadaan 10 – 15 prosenttiyksik-

köä kuivempaa haketta. Pienkokopuun kohdalla katteesta saatava etu on suurin, mikäli sillä pystytään estämään lumen sulamisesta aiheutuva kosteuden lisäys.



Kuva 2. Varastokasan peittämisen vaikutus kokopuun kosteuteen (Hillebrand & Nurmi 2004).

Varaston tiivydellä (kokopuu tai ranka) ja korkeudella on suuri vaikutus peittämisen kustannuksiin (kuva 3). Tiiviin ja korkean kasan peittämiskustannukset energiayksikköä kohti ovat luonnollisesti alhaisimmat. Peittokustannuksesta peitteen hinta muodostaa suurimman kustannuserän, peittotyön osuuden ollessa vain noin 20 %. Ottamalla huomioon kosteuden vaikutus hakkeen sisältämään energiamäärään voidaan laskennallisesti arvioida, että peittämisellä tulisi voida alentaa hakkeen kosteutta 6 – 8 prosenttiyksikköä, jotta peittämisen kustannukset tulee kateksi. Peittämistä tärkeämmäksi tekijäksi on osoittautunut kuitenkin varastokasan ympäristö. Varjossa sijainneiden varastokasojen kosteus on ollut 7 – 17 prosenttiyksikköä suurempi kuin avoimella paikalla sijainneiden kasojen.



Kuva 3. Varastojen peittämisen kustannus puun kosteuden funktiona pienkokopuulle ja karsitulle pienkokopuulle, kun varaston korkeus on 3 m tai 5 m. Kuvassa esitetyn energiatiheyden avulla kustannukset voidaan muuntaa hake- m^3 kohti (Hillebrand & Nurmi 2004).

2.1.3 Kuivauksen vaikutus hakkeen muihin laatutekijöihin

Metsähake voi sisältää runsaasti neulasia. Nuorten metsien kokopuuhakkeen raaka-aineessa neulasten osuus on alun perin männyllä 5 – 9 % ja kuusella 10 – 18 %, päätehakkuualojen hakkuutähteessä neulasia on näihin verrattuna noin kaksinkertainen määrä. Huomattava osa puuston sisältämisestä ja kasvulle tärkeistä ravinteista sijaitsee juuri neulas- tai lehtimassassa sekä oksien kuoressa. Kokopuun korjuussa poistuu kasvupaikalta huomattava osa näistä ravinteista. Puuston kannalta olisikin edullista, mikäli neulasista ja lehdistä voitaisiin päästä eroon ennen puiden välivarastolle ajoa. Koska neulasissa on alkalimetalleja ja klooria, neulasten osuuden pieneneminen polttohakkeessa vähentää osaltaan myös voimalaitosten kattiloiden tulistinpintojen korroosion riskiä.

Kokopuun palstalla kuivaus ei aiheuta neulasten varisemista. Rasikuivauksen toimivuus männyn neulasten karistajana on tutkimusten mukaan erittäin huono. Mikäli puuston kasvu ja maaperän ravinnetasapaino vaativat neulasmassan jättämistä palstalle, on osa oksista karsittava. Menetelmä alentaa kuitenkin raaka-ainekertymää oksien määrällä.

Varaston teon ajankohdalla tai varastoinnin pituudella (7 – 16 kk), peittämisellä tai puulajilla ei ole natriumia lukuun ottamatta havaittu olevan vaikutusta alkali- tai maa-alkalimetallien pitoisuuksiin kokopuubiomassan varastoinnin yhteydessä. Kloorin määrä vähenee varastoinnin aikana liikkuvuutensa ansiosta. Sen määrä

kuivatussa mäntykokopuussa on 50 – 100 mg/kg (0,005 – 0,01 %) ollen vain noin puolet siitä, mitä se on kuivatussa hakkuutähteessä.

Kokopuitten tuhkapitoisuudet vaihtelevat välillä 0,5 - 1,0 %. Tutkimuksissa useimpien alkalimetallien ja muitten kivennäisalkuaineitten pitoisuudet ovat pysyneet muuttumattomina. Näyttäisi siis siltä, että näitä kattilalaitosten kannalta osin haitallisia alkuaineita ei pystytä välivarastoinnin keinoilla alentamaan.

Pienkokopuuta tai mitä tahansa orgaanista materiaalia varastoitaessa tapahtuu materiaalissa erilaisten lahottajasienten ja homeitten kasvua, jotka voivat aiheuttaa allergisia reaktioita työntekijöille, riippuen mikrobien pitoisuudesta ja henkilön altistusherkkyydestä. Pienkokopuuhakkeesta mitatut mesofiilisten sienten pitoisuudet ovat olleet noin sadasosa varastoidussa hakkuutähteessä esiintyvistä pitoisuudesta. Havaittu ero selittyy materiaalien erilaisesta neulaspitoisuudesta ja puuaineen osuudesta. Termotoleranttien sienten pitoisuudet ovat olleet erittäin pieniä. Mesofiilisten bakteerien pitoisuudet ovat olleet samaa suuruusluokkaa kuin hakkuutähteillä. Termofiilisten aktinobakteerien pitoisuus on ollut alle määritysrajan. Varastokasojen peittäminen vähentää sienten ja bakteerien kasvua, peiton suojatessa materiaalia kastumiselta. Peitetyissä varastokasoissa mesofiilisten sienten pitoisuus on ollut noin 2,5- ja mesofiilisten bakteerien noin 4,5-kertaa pienempi peittämättömiin varastokasoihin verrattuna. Haketusvaiheessa esiintyvien mikrobipitoisuuksien määrä hakkeessa on kuitenkin sen verran korkea, että se tulee ottaa huomioon arvioitaessa työntekijöille aiheutuvaa terveydellistä riskiä.

2.2 Paalattu hakkuutähde

Paalattun hakkuutähteen kuivumista sekä pyörö- että risutukkipaaleina on aikaisemmin selvitetty jonkin verran Ruotsissa ja Iso-Britanniassa (Hudson 1998, Lehtikangas & Jirjis 1993, 1998, Jirjis & Norden 2001). Näissä tutkimuksissa on paalattun hakkuutähteen havaittu kuivuvan hyvin välivarasto-olosuhteissa. Lisäksi peittäminen on edesauttanut kuivumista. Yllä mainituissa tutkimuksissa ei kuitenkaan ole selvitetty mm. kuivahtaneesta tähteestä paalattujen risutukkien laatua välivarastossa.

Suomessa päätehakkuualojen hakkuutähteistä tehtyjen risutukkien kuivausta ja varastointia on tutkittu mm. Tekesin Puuenergian teknologiaohjelmassa (Poikola et al. 2002). Hankkeessa on selvitetty hakkuutähteen paalausajankohdan ja varastointitavan vaikutusta hakkuutähteistä saatavan polttoaineen laatuun. Tehtävänä oli selvittää kuinka risutukkitekniikkaan perustuvassa hakkuutähdepolttoaineen tuotannossa voidaan täyttää käytön asettamat polttoaineen laatuvaatimukset sekä liittykö eri tavoin varastoidun polttoaineen käsittelyyn terveystriskejä

Tuoreiden hakkuutähteen kosteus on n. 55 %. Kuivaamalla hakkuutähteitä polttoaineen lämpöarvoa voidaan kasvattaa tilavuusyksikköä kohden noin 10 %. Toisaalta varastoinnin aikana tapahtuu kuiva-ainetappioita, jolloin hakkuutähteitä ei kannata varastoida liian pitkään. Hyvissä kuivumisolosuhteissa risutukit kuivuvat 40 %:n kosteuteen noin kolmessa kuukaudessa. Kuivumista on mahdollista nopeuttaa edelleen hakkuutähteen palstakuivatuksella ennen risutukkien paalausta. Kuivattaessa hakkuutähteitä palstalla ennen varastokasan tekoa, optimikuivatusaika on yhdestä kolmeen viikkoa sääoloista riippuen. Tänä aikana myös hakkuutähteen klooripitoisuus pienenee puoleen.

2.2.1 Varastokasan peittäminen

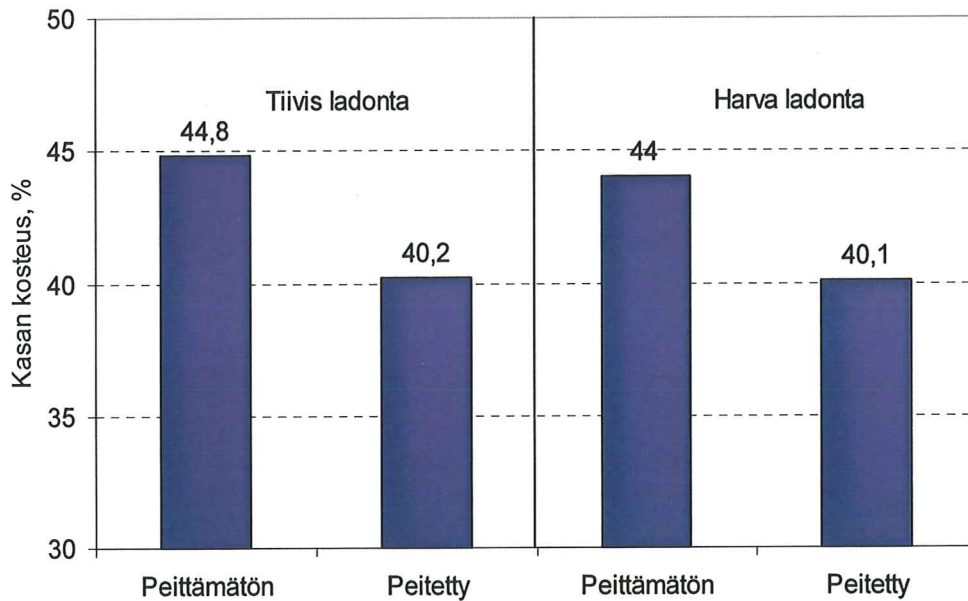
Varastokasan peittäminen onnistuu parhaiten kuormatraktoria apuna käyttäen kasan teon yhteydessä. Kun peittomateriaalina käytetään rullalla oleva paperia, käy levitys helposti levitysraudan avulla (kuva 4). Peitteen päälle asetetaan lopuksi muutamia risutukkeja, jotta peite pysyy paikallaan tuulisellakin säällä. Peittäminen kannattaa kustannussyistä tehdä varastokasan teon yhteydessä.



Kuva 4. Risutukkikasan peittäminen peittopaperilla.

Varastokasan peittäminen suojaa tehokkaimmin ylimpien risutukkien kastumista, mutta koska kasan ylimmät risutukit suojaavat myös alimpia risutukkeja sateelta, on peittämisen merkitys kasan keskellä ja alaosassa vähäisempi. Peittämättömien kasojen yläosasta otetut näytteet ovat olleet 10 - 25 prosenttiyksikköä mämpiä kuin kasan keskeltä ja alaosasta otetut näytteet.

Peitetyt kasat ovat olleet n. 4,5 prosenttiyksikköä kuivempia (vesimäärä noin 15 % pienempi kuiva-ainetta kohti) kuin peittämättömät kasat. Peitetyissä risutukkikasoissa keskimääräinen loppukosteus on ollut 40,1 % ja peittämättömissä kasoissa 44,4 %. Kasan ladontatavalla ei ole ollut merkitystä risutukkien loppukosteuteen, jos kasat on peitetty. Peittämättömässä tapauksessa ristikkäin ladotuissa kasoissa risutukkien loppukosteus on ollut yhden prosenttiyksikön alhaisempi kuin tiiviisti ladotuissa kasoissa (kuva 5).



Kuva 5. Erilaisten risutukkivarastokasojen loppukosteudet laskettuna koko tutkimusaineistosta.

Tehokkain ja taloudellisesti järkevin tapa varastoida risutukit on latoa ne normaaliin tapaan päällekkäin korkeaksi pinoksi ja peittää kasa peittopaperilla. Varastokasan peittäminen ei ole välttämätöntä, jos risutukkien paalaus suoritetaan keväällä ja risutukit on tarkoitus murskata ja polttaa ennen talvea. Risutukkikasoiissa peittämisen merkitys ei ole niin suuri kuin irtorisujen varastoinnissa, missä varastokasan peittämisellä on saatu 10 – 15 %-yksikköä kuivempaa polttoainetta (Hillebrand & Nurmi 2001)

2.2.2 Varaston laadunmuutokset

Varastointijakson aikana tapahtuu kuiva-ainetappiota, joka osaltaan alentaa varaston energiasisältöä. Tämän johdosta varastointiaika tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä. Kuiva-ainetappioiksi on muissa yhteyksissä arvioitu n. 1 % kuukaudessa (Jirjis & Norden 2001). Tällöin kun risutukkeja varastoidaan talven yli, on risutukit kuivattava riittävän kuiviksi (alle 40 %:n kosteuteen), jotta varastointijakson aikainen energiasisällön pieneneminen ei ylittäisi kuivauksesta saatua hyötyä. Yli talven risutukkeja varastoitessa on tärkeää myös peittää varastokasa huolella kastumisen estämiseksi.

Purettaessa varastokasa talvella, osa ylimpiin risutukkeihin tarttuneesta lumesta tulee aina risutukkien mukaan. Tämä lisää hakkeen kosteutta ja pienentää siten sen lämpöarvoa. Vastaavaa kastumista voi tapahtua merkittävässä määrin myös leudon talven aikana, jolloin aiemmin satanut lumi voi sulaa ja kastella varastokasan. Tällöin peittämättömässä varastokasassa suurin osa lumen sulamisvedestä imeytyy allaoleviin tähteisiin ja voi nostaa kasan kosteutta jopa 10 prosenttiyksikköä. Talven yli varastoiduissa risutukeissa on havaittu myös käytetyn sidontanarun haurastumista, joka hankaloitti varastokasojen purkua.

Risutukkien murskauksen yhteydessä mitattu keskimääräinen tuhkapitoisuus on ollut 2,4 %, joka on samaa luokkaa kuin aikaisemmin tuoreista hakkuutähteistä määritetyt tuhkapitoisuudet (2,1 %). Klooria tuoreessa hakkuutähteessä on puoles-

taan 200 - 350 mg/kg. Se on lähes kokonaan neulasissa, josta sitä vapautuu varastoinnin aikana lähinnä neulasten varisemisen myötä. Mitatut risutukkien klooripitoisuudet ovat olleet keskimäärin 190 mg/kg (0,019 %). Varastokasojen peittämisellä tai varastointitavalla ei ole ollut merkitystä tuhka- tai klooripitoisuuteen.

Polttoaineesta mitatut mikrobipitoisuudet ovat olleet suuruudeltaan 1×10^6 - 30×10^6 cfu/g. Mikrobipitoisuudet eivät juurikaan ole nousseet varastoinnin aikana. Merkitsevää eroa peitettyjen ja peittämättömien kasojen välillä ei ole havaittu. Mesofiilisten sienten pitoisuus tiiviisti ladotuissa kasoissa on ollut noin kaksinkertainen verrattuna harvaan ladottuihin kasoihin. Termotoleranttien sienten pitoisuuteen ei kasojen ladontatavalla ole havaittu olevan vaikutusta, kuten ei myöskään mesofiilisten bakteerien ja termofiilisten aktinobakteerien pitoisuuksiin.

Varastokasojen purkamisen yhteydessä ilmasta mitatut mikrobipitoisuudet kuormaimen hytissä ovat olleet alhaiset, 36×10^3 cfu/ilma- m^3 . Sen sijaan risutukkien murskauksen yhteydessä mitattu pitoisuus näytteenottotilanteessa on ollut 2×10^6 cfu/ilma- m^3 , joka tulee ottaa huomioon arvioitaessa työntekijälle aiheutuvaa terveydellistä riskiä. Haketuksen yhteydessä on suositeltavaa käyttää P3-luokan suodatinta, joka suojaa myös mikrobeilta, jos työntekijällä on riski altistua ko. haitta-vaikutuksille.

2.3 Hakkuutähde

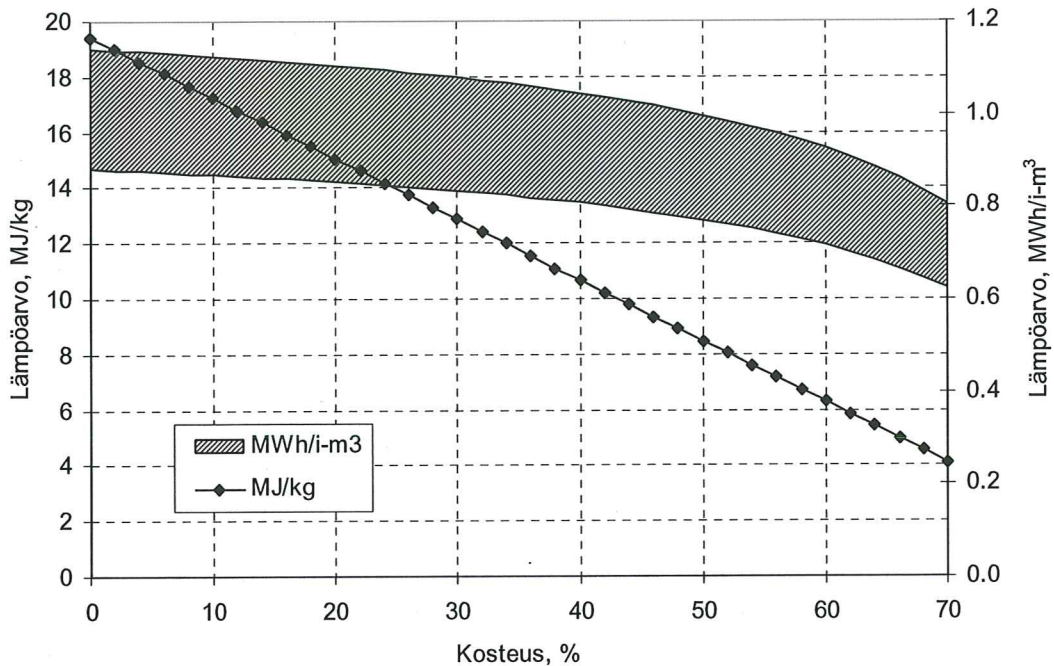
Varastointi on oleellinen osa hakkuutähteen hankintaketjua ja logistiikkaa, ja hakkuutähneiden eriasteisilla varastoinnilla varmistetaan polttoaineen saatavuus vuoden kaikkina aikoina sekä parannetaan polttoaineen laatua. Varastointivaiheen suunnittelun lähtökohdana on toisaalta varaston sijaintipaikka ja toisaalta varastoinnin ajoitus hankintaketjun muitten toimintojen suhteen. Hakkuutähdettä voidaan varastoida hakkuukoneen tekemissä pienissä kasoissa palstalla, kuormatraktorin tekemissä suurissa kasoissa tienvarsivarastossa tai keskitettyä haketusta sovellettaessa suurissa aumoissa terminaalissa tai käyttöpaikalla.

Hakkuutähneiden kuivumista ja varastointia on tutkittu mm. Bioenergian tutkimusohjelman projektissa *Puupolttoaineen laadunvalvonta* (Nurmi 1998), Tekesin rahoittamassa *Seospolttoaineiden tuotanto suotermiinalilla* -hankekokonaisuudessa, joka perustuu olemassa olevien turpeen tuotantojärjestelmien hyväksikäyttöön seospolttoaineen tuottamiseksi (Hillebrand 1998, Leinonen, Hillebrand & Marttila 2000) sekä Puuenergian teknologiaohjelman projektissa *Hakkuutähneiden laadunhallinta* (Hillebrand & Nurmi 2001).

2.3.1 Hakkuutähde polttoaineena

Hakkuutähteestä tehdyn hakkeen energiakäytön kannalta tärkeitä laatuominaisuuksia ovat polttoaineen kosteus, kemiallinen koostumus, puuaineen tiheys, tuhkapitoisuus, neulasosuus ja näistä määräytyvä tehollinen lämpöarvo. Tuoreen hakkuutähteen kosteus on 50 - 60 % vuodenaikasta riippuen. Kuivaamalla hakkuutähettä lämpöarvoa voidaan kasvattaa tilavuusyksikköä kohden noin 10 % (kuva 6). Kosteus vaikuttaa teholliseen lämpöarvoon, koska veden höyrystäminen vaatii energiaa. Laitoksen saama energiahyöty kasvaa hakekuution sisältämän kuivamassan kasvaessa ja kosteuden alentuessa.

Hakkuutähteistä saatavan hakekuutiometrin kuiva-ainesisältö vaihtelee huomattavasti. Siihen vaikuttavat puun kuiva-tuoretiheys ja hakkeen tiiviys. Kuiva-tuoretiheys kertoo kuivamassan suhteen tuoreena mitattuun kiintotilavuuteen, eli kuinka paljon kuivaa puuainetta on kiintokuutiometrissä puuainetta. Keskimääräinen kuiva-tuoretiheys viheraineettomalla kuusihakkuutähteellä on 465 kg/m^3 ja viheraineen sisältävällä 425 kg/m^3 . Hakkeen tiiviys osoittaa kiintotilavuuden ja irtotilavuuden suhteen, eli kuinka paljon kiintokuutioita tulee yhdestä irtokuutiosta. Tiiviyslukuna on yleisesti käytetty arvoa 0,40 (vaihteluväli 0,38 – 0,46).



Kuva 6. Hakkuutähdihakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta. Varjostettu alue kuvaa hakkeen kuiva-tuoretiheydestä ($425 - 465 \text{ kg/m}^3$) ja tiiviydestä (0,38 – 0,46) johtuvaa vaihteluväliä lämpöarvossa (Hillebrand & Nurmi 2001).

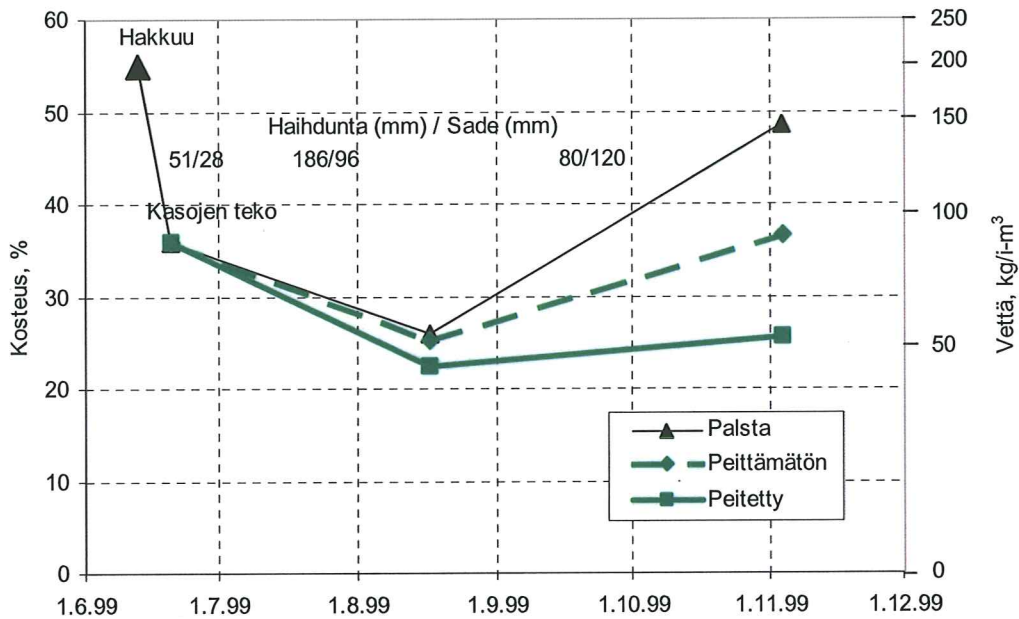
2.3.2 Laatuun vaikuttavat tekijät

Polttoaineen laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat hakkuuajankohta, varastointitekniikat, varaston maantieteellinen ja paikallinen sijainti sekä kokoluokka. Erilaisissa hakkuutähteen varastointitekniikoissa on tarkasteltu mm. kasojen sijaintia, kokoa, muotoa, alustaa, ladontaa ja peittämistä. Energiakäytön kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat hakkuutähteen kosteus, kemiallinen koostumus, puuaineen tiheys, tuhkapitoisuus sekä näistä määräytyvä lämpöarvo.

2.3.3 Hakkuutähteen kuivuminen

Varastokasoja on tehty sekä vihreästä (tuoreesta) että palstalla tietyn ajan kuivuneista ruskeista hakkuutähteistä. Osa tähteistä on jätetty palstalle hakkuukoneen tekemiin kasoihin. Osa varastokasoista on tehty aluspuiden päälle ja osa kasoista on peitetty.

Alkukesän hyvissä sääoloissa, haihdunnan ollessa selvästi sadantaa suurempi, hakkuutähteet kuivuvat varastokasoissa nopeasti, 14 – 20 prosenttiyksikköä ensimmäisen kahden kuukauden aikana. Syksyllä sateiden vaikutus näkyy etenkin palstakasojen voimakkaana kastumisena. Peitetyissä kasoissa tähteen kosteus on ollut 10 - 15 prosenttiyksikköä alhaisempi kuin peittämättömissä (kuva 7). Talvihaketuksen yhteydessä kosteus voi kuitenkin kohota merkittävästi, etenkin leutona talvena, jos sulamisvesi pääsee imeytymään hakkuutähteisiin.



Kuva 7. Kesäkuun alussa tuoreesta tähteestä tehtyjen varastokasojen ja palstalla olleiden tähteiden kosteudet (Hillebrand & Nurmi 2001).

2.3.4 Varastokasan peittäminen

Hakkuutähteiden peittämisen hyötyyn vaikuttaa oleellisesti käytetyn peitteen leveys, kestävyys, ja haketettavuus. Lisäksi kasan muoto on tärkeä tekijä. Kapealla (3,2 m) paperipeitteellä on helposti taipumusta kuroutua kasaan ohueksi raidaksi kasan päälle tuulen vaikutuksesta. Tämä voidaan kuitenkin estää asettamalla hakkuutähdekourataakkoja painoksi paperin molemmille laiduille tarpeeksi tiheään. Kasan päällä oleva paperi estää suurimman osan sadevedestä, mutta se ei ole riittävä suojaamaan kasaa syyssateilta ja lumelta.

Peittämättömän hakkuutähdekasan päällä oleva lumi voi sulaessaan tai sekoittuessaan hakkuutähteisiin lisätä hakkeen kosteutta merkittävästi. Tällöin esim. 30 %:iin kuivatuista hakkuutähteistä voi helposti saada kosteudeltaan 35 %:sta tai märempää haketta, lumen vesiarvosta riippuen. Mitä matalampi varastokasa ja mitä suurempi lumen vesiarvo on, sitä enemmän hakkuutähteet voivat kastua.

Hakkuutähdekasojen alla olevista aluspuista on hyötyä etenkin haketusvaiheessa, sillä puiden päältä hakkuutähteet voidaan kerätä tarkemmin ja nopeammin hakkuuriin. Aluspuut vähentävät myös maa-aineksen pääsyä tähteen joukkoon sekä maan kosteuden imeytymistä alimpiin hakkuutähteisiin ja tähteiden jäätymistä maahan kiinni.

2.3.5 Neulasten variseminen kuivumisen aikana

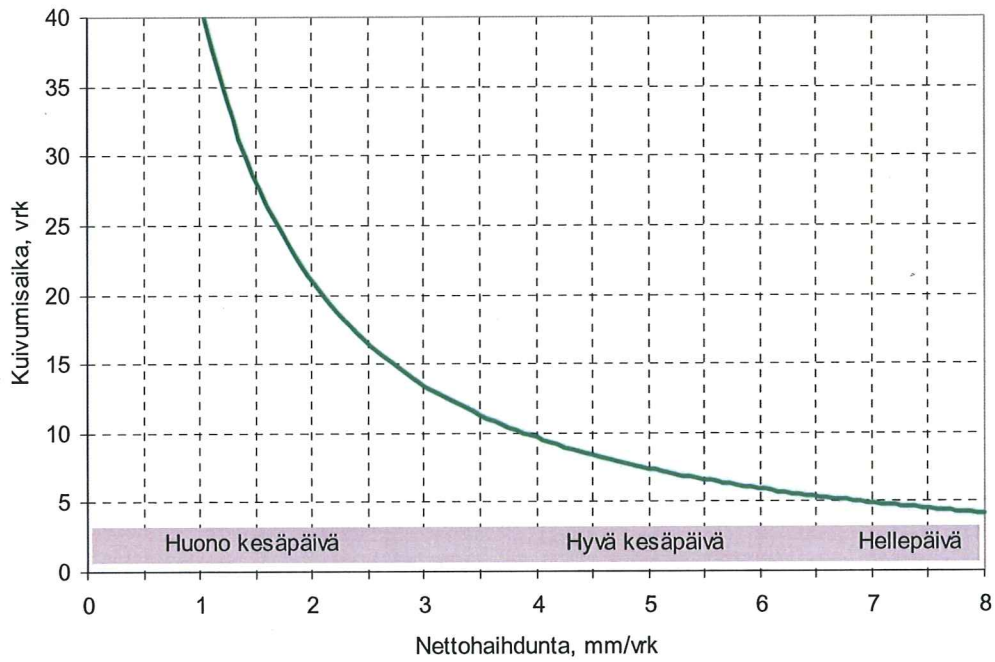
Kun hakkuutähteet kerätään välivarastoon välittömästi hakkuun jälkeen, saadaan suurin osa neulasista talteen. Kuivissa olosuhteissa kesällä neulasetsit alkavat varista varsin pian hakkuun jälkeen ja alle kuukauden kuluessa suuri osa neulasista on varissut maahan.

Tuoreella kuusitähdeellä neulasosuus on noin 30 %. Kesäkuun alussa tehdyissä varastokasoissa neulasten osuus koko massasta on ollut keskimäärin 7 prosenttiyksikköä alhaisempi tuoreeseen tähteeseen verrattuna. Tähän on vaikuttanut alkukauden kuivattavat olosuhteet, jolloin osa neulasista on varissut palstalle keruun yhteydessä. Ruskeasta tähteestä tehdyissä varastokasoissa neulasten osuus on pudonnut edelleen noin 17 %:iin, eli vajaaseen puoleen alkuperäisestä neulasmäärästä. Haketuksen yhteydessä osa neulasista varisee edelleen, jolloin niiden osuus on ollut 10 - 12 %. Neulasten osuuden pieneneminen varastointivaiheiden aikana heijastuu myös suoraan polttohakkeen klooripitoisuuteen. Tuoreen hakkuutähdehakkeen klooripitoisuus on ollut noin 350 ppm ja kuivatun vastaavasti hieman alle 200 ppm.

2.3.6 Optimikuivatusaika palstalla

Hakkuutähteet kuivuvat kesällä tehokkaimmin hakkuukoneen tekemissä kasoissa palstalla. Sateen sattuessa ne myös tällöin kastuvat uudelleen helpoimmin. Kuivattaessa hakkuutähteitä palstalla ennen varastokasan tekoa, hakkuutähteiden tavoitekosteuden ollessa 35 – 40 %, optimikuivatusaika on yhdestä kolmeen viikkoa sääoloista riippuen. Tänä aikana hakkuutähteet kuivuvat alle 40 p-%:n kosteuteen ja niiden neulas- ja klooripitoisuus pienenee noin puoleen, jonka jälkeen kuivat hakkuutähdekourakat kannattaa siirtää tienvarsivarastoon sateelta suojaan.

Kuvassa 8 on esitetty palstalla kuivumassa olleiden hakkuutähteiden kuivumisaika vuorokautisen nettohaihdunnan (haihdunnan ja sateen erotus siten, että puolet sadevedestä on oletettu imeytyvän hakkuutähteisiin) funktiona. Jos vuorokautinen nettohaihdunta on esim. 5 mm, kuivuvat hakkuutähteet palstalla noin viikossa 35 %:iin. Nettohaihdunnan ollessa 3,5 mm/vrk, kuivuvat hakkuutähteet vastaavasti vajaassa kahdessa viikossa ja jos nettohaihdunta on 1,5 mm/vrk, kestää tähteiden kuivuminen 35 %:iin noin kuukauden. Tyypillisenä poutakesäpäivänä vuorokautinen haihdunta on 4 - 6 mm. Hellepäivinä haihdunta voi olla jopa 8 - 9 mm/vrk ja pilvisinä viileinä päivinä 1 - 3 mm/vrk.



Kuva 8. Palstalla kuivumassa (55 % -> 35 %) olleiden hakkuutähteiden kuivumisaika vuorokautisen nettohaihdunnan (haihdunnan ja sateen erotus siten, että puolet sadevedestä on oletettu imeytyvän hakkuutähteisiin) funktiona (Hillebrand & Nurmi 2001).

LÄHDELUETTELO

Castren, M., Pietilä, J. & Kotimaa, M. 1995. Polttohakkeen työhygieeninen laatu. Työtehoseuran metsätiedote 14, 1995 (552).

Hakkila, P. (toim.), Metsäenergia. 1992. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 422. Helsinki. Metsäntutkimuslaitos. 51 s.

Hakkila, P., Nurmi, J. & Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energialähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684.

Hillebrand, K. 1998. Seospolttoaineiden tuotanto terminaalilla -hankekokonaisuus. Bioenergian tutkimusohjelma, Projektikirja 1993 - 1998, Osa II, ss. 201 - 205. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy, Jyväskylä 1998.

Hillebrand, K. 2000. Hakkuutähteiden kuivauksella laadukkaampaa polttohaketta. Puuenergia 3/4, 2000. Puuenergia ry.

Hillebrand, K., Marttila, M. & Nurmi, J. 2000. Puupolttoaineiden laadunhallinta, väliraportti 1999. Tutkimusselostus ENE32/T0016/2000, VTT Energia. 22 s. + liitt. 6 s.

Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2000. Puupolttoaineiden laadunhallinta. Quality management of wood fuels. Julkaisussa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2000. VTT Symposium 205, 205 - 216.

Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2001. Hakkuutähteiden laadunhallinta. VTT Energian raportteja 2/2001. 51 s. +11 liitettä.

Hillebrand, K. (toim.) 2003. Metsähakkeen tuotannon kehittäminen nuorista metsistä. Julkaisussa: Alakangas E. & Holviala N. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. VTT Symposium 231, 35 - 76.

Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2003. Energiapuun kuivatus ja varastointi -osaprojekti. Julkaisussa: Alakangas E. & Holviala N. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. VTT Symposium 231, 53 - 62.

Hillebrand, K. (toim.) 2004. Metsähakkeen tuotannon kehittäminen nuorista metsistä. Projektiraportti PRO2/P6021/04, VTT Prosessit, 32 s.

Hillebrand, K. & Nurmi, J. 2004. Nuorista metsistä korjatun energiapuun kuivatus ja varastointi. Projektiraportti PRO2/P6014/04, VTT Prosessit, 27 s. + liitt. 3 s.

Hudson, B. 1998. UK Industry - baling and storage of logging residues. In: Hakkila, P., Heino, M. & Puranen, E. (eds.): Wood fuels from conventional forestry. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 680. 122 p.

Jirjis, R. 1988. Teoksessa: Anon. Production, storage and utilization of wood fuels. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst. för skogsteknik. Upsatser och resultat nr 134.

- Jirjis, R. & Norden B. 2001. Kvalitet och arbetsmiljöaspekter vid lagring och hantering av grostockar. Slutrapport, Projekt nr P 12321-1, 2001-03-15. Institutionen för skogshushållning, SLU&SkogForsk, Uppsala. 24 p.
- Lehtikangas, P. & Jirjis, R. 1993. Lagring av buntade hyggesrester. Projekt Skogskraft. Rapporter 17. Vattenfall Utveckling AB, Dokumentationscentralen, 810 70 Älvkarleby. 18 p.
- Lehtikangas, P. & Jirjis, R. 1998. Storage of logging residues in bales. Proceedings of Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference, 8-11 June 1998. C.A.R.M.E.N., Rimper, Germany. 4 p.
- Leinonen, A., Hillebrand, K. & Marttila, M. 2000. Hakkuutähdehakkeen terminaalituotannon kehittäminen, Loppuraportti. Tutkimuslaskutus ENE32/T0055/2000, VTT Energia. 37 s. + liitt. 1 s.
- Nurmi, J. 1998. Puupolttoaineen laadunvalvonta - Loppuraportti, Bioenergian tutkimusohjelman projekti 125, Kannus 1998.
- Nurmi, J. 1999. Hakkuutähteen ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 722. 32 p.
- Nurmi, J. 2000. Hakkuutähdeessä on ytyä. Metsäntutkimus 3, 2000. METLAN asiakaslehti, 2000.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2001a. The fuel quality of Norway spruce logging residue in relation to storage logistics. In: Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. & Smith, C.T. (eds.). Bioenergy from sustainable forestry: principles and practice. Forest Research Bulletin 223: 42 – 46.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2001b. Storage alternatives affect fuelwood properties of Norway spruce logging residues. New Zealand Journal of Forestry Science 31(3): 289 – 297.
- Nurmi, J. 2003. Neulasmassan poistaminen metsässä - koneellisesti vai luonnon menetelmillä. Bioenergia 2/2003. s. 10 - 11.
- Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. Biomass and Bioenergy 31 (2007) 381-392.
- Poikola, J., Backlund, C., Korpilahti, A., Hillebrand, K. & Rinne, S. 2002. Riskitekniikan edellytykset suurimaittaisessa puupolttoainehankinnassa. Julkaisussa: Alakangas, E. (toim.) Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002, VTT Symposium 221.