

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Metsätalouden koulutusohjelma  
Lauri Jylänki

Tutkintotyö

# Rankahakkeen tunnuslukujen määrittäminen ja näytteenottotapojen vertailu

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä  
Tampere 5/2010

Perttu Arminen  
Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi, Energianeuvoja Raimo Kauppila

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Metsätalouden koulutusohjelma

Tekijä	Lauri Jylänki
Työn nimi	Rankahakkeen tunnuslukujen määrittäminen ja näytteenottotapojen vertailu
Sivumäärä	45 sivua + yksi liitesivu
Valmistumisaika	Toukokuu 2010
Työn ohjaaja	Perttu Arminen
Työn tilaaja	Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi, Energianeuvoja Raimo Kauppila

---

## Tiivistelmä

Tutkintotyön aiheena oli selvittää kosteusmittausten tarkkuutta ja muuntokertoimia rankahakkeeseen liittyen. Tavoitteena oli tutkia näytteenottotapojen ja analysointipaikkojen eroja, että saataisiin tietää, kuinka paljon niihin kannattaa panostaa aikaa ja rahaa. Muuntokertoimien osalta tavoitteena oli hakea selvitystä sille, mikä on muuntokerroin irtokuutiosta kiintokuutioiksi, kun hake kuormataan pyöräkuormaajalla hakerekkaan.

Tutkimuskohteena olivat Tampereen Sähkölaitos Oy:n Naistenlahden Voimalaitokselle kuljetetut rankahakekuormat. Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi toimitti kuormia Tampereen Myllypurossa sijaitsevista kahdesta terminaalista. Kuormista otettiin terminaalisissa kuormausvaiheissa mahdollisimman edustava näyte, jota verrattiin kuljettajan kuorman purkuvaiheessa ottamaan näytteeseen. Tutkimuksen analysointipaikkoina käytettiin Naistenlahden voimalaitoksen ja Tampereen ammattikorkeakoulun laboratorioita.

Tutkimuksessa selvisi, että näytteenottotavoilla ei ole merkitystä, kun on kyseessä keskimääräiset tulokset. Analysointipaikoilla eroja syntyi, koska analysointitavat eivät olleet yhtenevät. Kuorman täyttötavasta saatiin keskimääräisiä tuloksia, joilla voidaan muuntaa irtokuutioita ja energiamääriä haluttuun mittayksikköön.

Kosteusmäärittysten vertailuun liittyvät tulokset sopivat käytettäväksi soveltaen puulla eri hake- ja murskelajikkeisiin. Muuntoluvut eri mittayksiköihin pätevät, kun hakekuorman täyttötavana on päältä kaato pyöräkuormaajalla ja hakelajikkeena on rankahake. Mittaukset on tehty talvella, joten kesällä muuntolukujen luotettavuuteen täytyy kiinnittää huomiota. Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää hyödyksi ennen kaikkea puumäärien seurannassa. Tuloksien avulla haketusyrittäjän työn määrää terminaalisissa voidaan seurata luotettavammin kuin ennen.

---

Avainsanat

energiapuu, hake, haketus, hakkeen mittaus

Tampere University of Applied Sciences  
Department of Forestry

Writer	Lauri Jylänki
Thesis	Defining the Parameters of Chips from Delimbed Stems and Comparing the Sampling Ways
Pages	45 pages + one appendix
Graduation time	May 2010
Thesis Supervisor	Perttu Arminen
Co-operating Company	Forest management association Kyrösjärvi, Energy wood adviser Raimo Kauppila

---

## Abstract

The subject of the degree work was to clear the exactness of moisture measurements and reduction factors for the chips from delimbed stems. The objective was to study the differences of the sampling ways and analysis places that one would know what the importance of them is. For the reduction factors the objective was to search for the report to what will be a reduction factor from the stacked cubic meter as solid cubic meter when the chip is loaded to the chip trailer lorry on the wheel loader.

The research subject was the transported wood chips loads for the Naistenlahti power plant of Tampereen Sähkölaitos Ltd. The forestry association Kyrösjärvi delivered loads from two terminals that are located in Myllypuro of Tampere. As representative a sample as possible was taken from the loads in the terminal at the loading stage. The sample from the terminal was compared with the sample taken by the driver at the dismantling stage of the load. The laboratories of the power plant of Naistenlahti and of Tampere Polytechnic were used as analysis places of the study.

In the study became clear that there is no significance on the sampling ways when one talks from average results. Differences between analysis places have occurred because the analysis ways were not identical. Average results which can be used to convert stacked cubic meters and amounts of energy into the desired measure were obtained from the filling way of the load.

The results which are related to the comparison of measurements are suitable to be used to the separate wood chips varieties and crushed wood aggregate varieties on certain reservation. The conversion numbers will hold true for different measures when the filling is done with a wheel loader and the chip variety is the chips from the delimbed stems. The measurements have been made in the winter so in the summer attention must be paid to the reliability of the conversion numbers.

The results of the study can be used as an advantage in the follow-up of volumes of timber. With the results the amount of work of chipping entrepreneur in the terminal can be monitored more reliably than before.

---

Keywords                      energy wood, wood chips, chipping, measuring wood chips

## Sisällys

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>SISÄLLYS</b> .....	<b>4</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>5</b>
<b>2 ENERGIAPUU TUTKIMUKSESSA</b> .....	<b>7</b>
2.1 MITTAUSTAVAT .....	8
2.2 KEMERA-TUET .....	8
2.3 VARASTOINTI.....	9
<b>3 TERMINAALIHAKETUS</b> .....	<b>10</b>
<b>4 HAKKEEN KULJETUS</b> .....	<b>13</b>
<b>5 HAKKEEN MITTAUS</b> .....	<b>15</b>
<b>6 ENERGIAPUUN TOIMITUKSEN OSAPUOLET</b> .....	<b>17</b>
6.1 NAISTENLAHDEN VOIMALAITOS .....	17
6.1.1 Naistenlahden bioenergian tarve .....	17
6.1.2 Puupolttoaineiden vastaanotto .....	18
6.2 METSÄNHÖITÖYHDISTYS KYRÖSJÄRVI .....	19
<b>7 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS</b> .....	<b>21</b>
7.1 NÄYTTEIDEN KERUU .....	21
7.2 NÄYTTEIDEN ANALYSOINTI .....	23
7.2.1 Kosteuden määrittäminen .....	23
7.2.2 Lämpöarvon määrittäminen.....	25
7.2.3 Energiatiheyden määrittäminen.....	28
7.2.4 Hakkeen tiiviyyden määrittäminen.....	29
<b>8 TULOKSET</b> .....	<b>31</b>
8.1 KOSTEUSMÄÄRITYSTEN VERTAILUA .....	31
8.1.1 Näytteenottotapojen vertailua.....	32
8.1.2 Analysointipaikkojen vertailua .....	34
8.1.3 Rinnakkaisnäytteiden vertailua.....	36
8.2 MUUNTOKERTOIMIA .....	37
<b>9 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>40</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>44</b>
<b>LIITTEET</b> .....	<b>46</b>

## 1 Johdanto

Tutkintotyö tarkastelee energiapuun toimitusketjua metsästä loppukäyttöpaikalle. Työssä keskitytään erityisesti karsitun rangan ja terminaalihaketuksen toimintaketjuun. Työ alkaa kiertokulun eri vaiheiden selvittämisellä, jonka tarkoituksena on avata varsinaisen tutkimuksen syitä ja pohjustaa ymmärtämään tutkimuksen tekoa ja tuloksia.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kosteusmittausten tarkkuutta ja kiintokuutioiden määrää kuormissa, sekä rankahakkeen kosteuden vaikutusta hakkeen keskeisiin ominaisuuksiin. Alalla on käytössä paljon eri mittayksiköitä, koska alan eri toimijat mittaavat työn määrää eri tavoin. Hakkuissa on perinteisesti käytetty kiintokuutioita, mutta energiapuussa myös painomittaus on tekemässä tuloaan. Kuljetuksessa käytetään painoa työn määrän mittaamiseen ja haketuksessa irtokuutioita. Energiapuun käyttäjät maksavat toimittajilleen tuotetusta energiasta (MWh). Työn tilaaja Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi toimittaa Naistenlahden voimalaitokseen puupolttoaineita huomattavia määriä. Tästä syystä yhdistyksen toiminnan kannalta on oleellista tietää, kuinka paljon tavaraa toimitetaan eri mittayksiköihin muutettuna.

Tutkimuksessa kerättiin näytteitä Destian ja Juhansuon terminaaleista eli välivarastoista Tampereen Myllypurossa. Siellä haketettiin karsittua rankaa aumalle, josta hake kuormattiin pyöräkuormaajalla rekan kyytiin. Näytteitä otettiin kuormaamisen yhteydessä niin että kuormasta saatiin mahdollisimman edustava näyte. Näytteitä verrattiin hakerekan kuljettajan ottamiin näytteisiin, joita oli otettu kuorman purkamisen yhteydessä. Tutkimuksen analysointi tehtiin Naistenlahden voimalaitoksen ja Tampereen ammattikorkeakoulun laboratorioissa. Siellä näytteistä analysoitiin kosteus. Analysoinnin avulla saatiin tuloksia näytteenottotapojen ja analysointipaikkojen eroista sekä mittaustarkkuudesta.

Tuloksia tarkasteltiin taulukkolaskentaohjelmalla, jolla voitiin laskea tulosten luotettavuutta ja yhdistellä kuukausittaisten kuormaraporttien tietoja. Johtopäätöksinä saatiin aikaiseksi muuntolukuja kuutiointiin ja energiatiheyteen liittyen, sekä koko tutkintotyöhön liittyviä huomioita. Tavoitteet saavutettiin niin kuin ne oli asetettu,

Lauri Jylänki

mutta matkan varrella tuli ilmi uusia selvitettäviä asioita, joista kerrotaan johtopäätöksissä.

Ennen tutkimuksen tuloksiin ja johtopäätöksiin tutustumista lukijan kannattaa katsoa liitteitä tutkintotyön lopusta. Siellä kerrotaan rankahakkeen ja pinopuun ominaisuuksista, joihin tutustuminen helpottaa tulosten ja johtopäätösten lukemista.

Lauri Jylänki

## 2 Energiapuu tutkimuksessa

Tämän tutkimuksen rankahake on lähtöisin energiapuuharvennuksista. Rankahaketta syntyy, kun hakataan metsää niin, että puut karsitaan ja katkotaan normaaliin tapaan ja haketetaan joko aumaan tai suoraan rekan kyytiin. Energiapuuharvennuksia tehdään, että saataisiin nuoret metsät kuntoon. Kestävän metsätalouden rahoituslain mukaisten tukien eli kemera-tukien avulla metsänomistajille on vielä mahdollista maksaa niistä. Energiapuuharvennuksella saadaan myös enemmän kannattavuutta pienialaisiin kohteisiin kuin normaaliharvennuksella. Puun energiakäytössä puulajilla ei ole väliä, joten energiapuuharvennuksella saadaan kaikki puulajit talteen ja vieläpä samaan pinoon. Tällä vältetään vajaiden kuormien lähteminen eri osoitteisiin ja saadaan kuljetuskustannuksia alemmaksi. Lisäksi puun energiakäyttöä pyritään lisäämään valtakunnallisesti fossiilisten polttoaineiden epäsuosion vuoksi. Käytön lisäyksellä päästäisiin eroon myös tuontipolttoaineiden täydellisestä riippuvuudesta.

Mikäli taimikonhoito ja/tai harvennus on jäänyt tekemättä, pitää liian tiheänä kasvaneet nuoret metsät hoitaa kuntoon ennen varsinaista ensiharvennusta, jotta koneellinen harvennus on mahdollista. Tällaisten kohteiden energiapuukertymä vaihtelee hyvin paljon poistettavan puuston mukaan. Näiltä nuoren metsän hoitokohteilta kertyy energiapuuta 30 – 80 m<sup>3</sup>/ha puiden karsinnasta sekä ainespuun talteen otosta riippuen. Ensiharvennusvaiheen metsiköistä voidaan korjata energiapuuksi ainespuun lisäksi alle ainespuukokoisia runkoja ja rungon osia, ainespuuksi kelpaamattomia puulajeja sekä latvusmassaa. Suhteessa ainespuukertymään näiden energiapuuksi talteen otettavien ositteiden osuus on kaupallisista hakkuista suurin juuri ensiharvennusvaiheessa. Energiapuujae voidaan ottaa talteen joko karsittuna tai karsimattomana. Karsimattomana kertymä on noin neljänneksen korkeampi ja hakkuukustannukset pienemmät. (Alakangas, Asikainen, Gumse, Hakkila & Hämäläinen 2003, 37–38.) Puiden karsiminen taas kannattaa siksi että se vähentää palstan ravinnehävikkiä. Karsittu ranka myös kuivuu paremmin kuin karsimaton. Siitä saadaan pinottua tiiviimpiä ja täydempiä kuormia, mikä alentaa kuljetuskustannuksia. Pienempi neulasten määrä polttihakkeessa vähentää myös kattiloiden kuumakorroosion riskiä. (Lepistö 2010, 11.) Ensiharvennuskohteilla energiapuukertymä vaihtelee suuresti, ja on 20 – 40 m<sup>3</sup>/ha, mikäli vain alle ainespuukokoiset rungon osat korjataan energiapuuksi (Alakangas ym. 2003, 37–38).

Lauri Jylänki

## 2.1 Mittaustavat

Energiapuuta mitataan monin eri tavoin ja monessa vaiheessa puunhankintaketjun varrella. Ensimmäiset mittaukset voidaan tehdä hakkuukoneella rankapuun hakkuussa, niiltä osin kuin hakkuukoneen mittalaite näyttää läpimittaa. Yleensä mittalaitteet näyttävät läpimittaa n. 4 cm asti. Jos läpimitta on tätä pienempi, niin mittalaite ei näytä mitään tulosta. Tällöin hakkuukone ei pysty kuutioimaan rankaa ja se ei tule kertymään mukaan. Tämä täytyy ottaa huomioon hakkuukoneen työn määrää mitattaessa.

Lähikuljetuksessa massan mittaukseen on käytetty kuormainvaakoja.

Kaukokuljetuksessa käytössä on ollut ajoneuvo- eli nk. siltavaakoja sekä puutavara-autojen kuormainvaakoja. Tarvittaessa massat on muunnettu tilavuusyksiköiksi muuntolukuja (tuoretiheys,  $\text{kg/m}^3$ ) käyttäen. Energiapuuta voidaan pitää tienvarsivarastomittaukseen kuitupuuta huomoinn soveltuvana pienen läpimitan ja oksien vuoksi. Pinomittausta on käytetty lähinnä koko- ja rankapuun ennakkomittauksessa. Lopullinen mittaustulos on saatu haketuksen jälkeen. (Hujo & Lindblad 2006, 403.) Energiapuun mittauksessa joudutaan käyttämään paljon muuntolukuja, koska puunhankintaketjun eri toimijat käyttävät eri mittayksiköitä. Tämä aiheuttaa sen, että jos muuntoluvut eivät pädekään joka tilanteessa, voi esimerkiksi hakkuukoneen kiintokuutio olla hakkurille puoli kiintokuutiota. Energiapuulle joudutaan käyttämään eri mittausten menetelmiä erilaisten hakkuumenetelmien takia.

## 2.2 Kemera-tuet

Kemera-tuet ovat kestävän metsätalouden rahoituslain mukaisia tukia, joilla voidaan rahoittaa metsien kestävää hoitoa ja käyttöä edistäviä toimenpiteitä. Energiapuulle sitä maksetaan, koska sen avulla turvataan puuntuotannon kestävyys. Kemera-tukea voidaan saada energiapuun korjuuseen, haketukseen ja toteutusselvityksen laatimiseen. Kun nuoren metsän hoitoon liittyy alueelta energiakäyttöön luovutettavan puun korjuuta, maksetaan tukea tietyistä toimenpiteistä. Energiapuun korjuusta maksetaan 7 euroa/kiintokuutiometri (kasaus  $3,50 \text{ euroa/k-m}^3$  + kuljetus  $3,50 \text{ euroa/k-m}^3$ ). Toteutusselvityksen laatimisesta maksetaan korotettuna 4,60 euroa/ha sen alueen osalta, jolta energiapuuta kertyy. Energiapuun haketuksen tuki on 1,70 euroa/haketettu



Lauri Jylänki

irto-m<sup>3</sup>. Haketuksen toteutusselvityksen laatimiseen tukea maksetaan 0,10 euroa/haketettu irto-m<sup>3</sup>. (Kemera-opas 2009, 5, 21.)

## 2.3 Varastointi

Energiapuun varastointiin kannattaa panostaa, koska sillä on suora vaikutus puun käyttökosteuteen. Kosteus taas on tärkein puun energiamäärään vaikuttava tekijä. Kuivatus kannattaa tehdä mahdollisimman pitkään pyöreänä puuna, koska vain näin saadaan ilmanvaihto kasassa toimimaan. Hakeumassa kuivumista ei enää juuri tapahdu ja sula auma alkaa toimia kompostin tavoin. Pahimmassa tapauksessa auma palaa niille sijoilleen.

Kesän kuivattava vaikutus on huomattava, jos ei ole poikkeuksellisen sateinen sää. Varastoidun puun tulisi antaa kuivua vähintään yhden kesän yli. Jos varastokasa on ilmava ja tuulisella paikalla, voi kosteus tuoreena varastoidussa puussa alentua kesän aikana alle 40 prosenttiin (tämän tutkimuksen alin kosteus oli 32 %). Tällöin kesän alkuun mennessä korjattu ja varastoitu puu voidaan hakettaa jo seuraavana talvena. Jo kuivunut, varastoitu pienpuu ei kastu talven aikana hakkuutähteen tavoin. Jos jostakin hyvän varaston ominaisuudesta joudutaan luopumaan, ensimmäisenä niistä on varaston sijainnin ilmansuunta. Paikan tuulisuudesta, varastopaikan kuivuudesta, hyvistä aluspuista eikä peitteestä tule koskaan tinkiä. (Lauhanen, Lepistö & Viirimäki 2010, 26.)

Lauri Jylänki

### 3 Terminaalihaketus

Haketustapoja on monia riippuen eri hakkuumenetelmistä, kuljetusten optimoinnista sekä hakkuri- ja kuljetuskalustosta. Puuta voidaan hakettaa palstalla, varastopaikalla metsässä, välivarastolla eli terminaalissa tai loppukäyttöpaikalla. Tutkimuksessa käytetty menetelmä oli terminaalihaketus. Tässä luvussa keskitytään sen hyviin ja huonoihin puoliin. Tämän luvun pääkohdat perustuvat Metsätehon tuloskalvosarjaan (Kärhä 2008, 31).

Terminaalihaketusta varten metsästä kuljetetaan pyöreää puuta eri varastopaikoilta yhteen isoon varastoon eli terminaaliin. Tarkoituksena on kerätä paljon puuta samaan paikkaan, jossa on mahdollista hakettaa paljon kerralla. Puut haketetaan suurelle kasalle eli aumalle, josta hake laitetaan pyöräkuormaajalla hakerekan kyytiin. Näin hakkurin ja hakerekan ei tarvitse olla samassa paikassa samaan aikaan, joten päästään eroon nk. kuumasta ketjusta. Esimerkiksi tienvarsivarastoilla tehtävässä haketuksessa hakkuri hakettaa suoraan hakerekan kyytiin, jolloin hakerekan ja hakkurin täytyy olla samassa paikassa samaan aikaan. Tällainen toimintaketju on parhaimmillaan paljon edullisempi kuin terminaalihaketus. Pahimmillaan siinä kärsii hakkeen toimintavarmuus, koska hakkuriin voi tulla jotain vikaa ja haketta ei ole varastossa. Tämä nostaa kuljetuskustannuksia. Hakettaminen suurelle aumalle on paljon nopeampaa, koska voidaan hakettaa keskeytyksittä. Hakkeen kuljettaminen on myös nopeampaa, koska pyöräkuormaajalla täyttää kuorman nopeammin ja hakkurin toimintavarmuus ei ole hidastava tekijä. Toisaalta hakkurin täyttämä kuorma on tiiviimpi ja näin täydempi. Tällä on merkitystä vain kaikkein kuivimmilla kuormilla, sillä kosteilla kuormilla tulevat painorajat nopeammin vastaan kuin kuormatilan tilavuus.

Tienvarsivarastohaketus on myös haastavaa kuljetusten suunnittelijalle, koska siinä täytyy ottaa huomioon myös kelirikko. Talvella ei välttämättä päästäkään metsäteille, vaikka näin olisi aiemmin suunniteltu. Epävarmoista paikoista tavara voidaan viedä terminaaliin ennen kelirikko-aikaa. Myös hakkuukertymältään pieniltä kohteilta kannattaa viedä tavara terminaaliin. Hakkeen laadunhallinta on terminaalissa helppoa ja sieltä haketta voidaan viedä myös useille pienkohteille. Tällaisten

Lauri Jylänki

pienkohdekuljetusten suunnittelu metsästä loppukäyttöpaikalle olisi vaikeaa, kohteiden laatu-, määrä- ja kuljetuskalustovaatimusten takia.

Hyviä terminaalipaikkoja on vaikea löytää ja niiden perustamiskustannukset ovat suhteellisen korkeat. Tärkein kuumen ketjun perustelu on puun käsittelykertojen vähäisyys. Terminaaliin tuodaan pyöreätä puuta tienvarsivarastolta.

Tienvarsihaketuksessa jää tämä vaihe kokonaan pois, mikä puoltaa tienvarressa hakettamisen kannattavuutta. Terminaalihaketuksessa on hyviä ja huonoja puolia, ja parhaimmillaan se toimii metsähaketusta tukevana toimintona.

Terminaali- ja tienvarsivarastoilla hakettamiseen on käytössä kolmenlaisia hakkurityyppejä. Hakkurit jaotellaan toimintaperiaatteidensa mukaisesti laikka-, rumpu- ja ruuvihakkureihin. Laikka- ja ruuvihakkurit soveltuvat parhaiten tasalaatuisille raaka-aineille, kokopuulle ja karsitulle rangalle.

Tässä tutkimuksessa keskitytään rumpuhakkureihin, jotka eivät ole niin herkkiä hakettavan raaka-aineen epäpuhtauksille, joten ne soveltuvat lähes kaikkien puuperäisten raaka-aineiden, myös hakkuutähteiden hakettamiseen. (Alakangas ym. 2003, 70.) Tämän tutkimuksen haketuksesta vastasi Metsä ja Energia Hemmilä Oy (kuvio 1). Yrityksellä oli tehokas kuorma-auton päälle asennettu rumpuhakkuri JENZ HEM 581 ja toimenkuvaan kuului hakettaa niin tienvarsivarastoilla kuin terminaalissakin. Haketusyritykselle maksettiin tehdyistä hakekuutioista, eli irtokuutioista. Hakerekan kuljettaja arvioi jokaisen kuorman tilavuuden, arvio perustui tunnettuun kuormatilan tilavuuteen.

Lauri Jylänki



Kuvio 1: Karsitun rangan haketusta Juhansuon terminaalissa (Kuva: Lauri Jylänki)

Rumpuhakkurit ovat kalliimpia kuin laikkahakkurit, mutta niillä saadaan tuotettua palakooltaan tasalaatuisempaa haketta kuin laikkahakkureilla tai murskaimilla. Kuorma-auton alustalle asennettuja rumpuhakkureita käytetään etenkin suuren mittakaavan haketuotannossa toimitettaessa haketta suurten lämpölaitosten ja voimaloiden tarpeisiin. Rumpuhakkuri onkin laajalla alueella toimivan urakoijan työkalu. Toimintaperiaatteensa ansiosta rumpuhakkurit soveltuvat kaikkien puhtaiden, puuperäisten polttoaineiden käsittelyyn. Rumpuhakkureissa on kiinnitetty 2 – 6, jopa 12 – 20 terää lieriömäisen terärummun ulkokehälle. (Alakangas ym. 2003, 71.) Erilliset terät mahdollistavat sen, että terän rikkoutuessa voidaan yhden ison terän sijasta vaihtaa yksi pieni. Tällä tavoin terien vaihto on nopeampi ja vaihdettavat terät ovat edullisemmat. Tutkimuksessa mainittu yritys oli työn tekohekkellä töissä n. 200 km päässä kotipaikkakunnaltaan. Tämä kertoo laajasta toimintasäteestä ja siitä, että tehokkaalla koneella tehdään niin paljon haketta, että montaa päivää ei toimita samassa paikassa.

Hakkurin syöttösysteminä on joko yläpuolinen piikkirulla ja alapuolella oleva ketjukuljetin tai vaihtoehtoisesti kaksi piikkirullaa tai kaksi telamattoa. Pinta-alaltaan suuri syöttöpöytä takaa tasaisen hakkurin syötön, mikä on tärkeää etenkin hakkuutähteitä hakettaessa. Suurimmilla rumpuhakkureilla päästään yli  $60 \text{ m}^3$  tuntituotoksiin (yli  $150 \text{ i-m}^3/\text{h}$ ). (Alakangas ym. 2003, 71.) Tutkimuksen hakkurilla päästiin parhaimmillaan  $150 - 200 \text{ i-m}^3$  tehollisiin tuntituotoksiin.

Lauri Jylänki

## 4 Hakkeen kuljetus

Hakkeen kuljetuksessa käytetään pääsääntöisesti siihen tarkoitettuja hakeautoja. Kalustokohtaisia ominaisuuksia ovat kuormatilän monikäyttöisyys, tilavuus, kokonaispaino ja purkulaitteisto. Metsähakkeen kuljetuskaluston valinta on sidoksissa käytettyyn haketusmenetelmään. Palstahaketuksessa puut haketetaan kuormatraktorin kyydissä olevaan konttiin ja kontti vaihdetaan hakeautoon tien varressa. Tienvarsihaketuksessa puut haketetaan suoraan hakeauton kyytiin, kun taas terminaalihaketuksessa hake yleensä kuormataan hakeauton kyytiin pyöräkuormaajalla. Kiinteällä kuormatilalla varustettuja hakeautoja käytetään tyypillisesti tienvarsihaketusmenetelmän ja vaihtokonttikalustoa palstahaketusmenetelmän yhteydessä. Tämän lisäksi on käytössä hakkurikonttikuorma-autoja, joissa autoalustaisella hakkurilla voi kuljettaa vaihtokontteja. Kaukokuljetuskalustossa on käytössä kiinteällä kuormatilalla varustettuja täysperävaunuyhdistelmiä, vaihtokonttiyhdistelmiä, puoliperävaunuyhdistelmiä ja kuorma-autoja. Vaihtokonttikalustossa on kolmen kontin yhdistelmiä ja kahden kontin yhdistelmiä. Ajoneuvon suurin sallittu korkeus on 4,20 metriä ja leveys 2,60 metriä. Perinteisen 7-akselisen perävaunuyhdistelmän kokonaispaino on kuitenkin kummassakin tapauksessa 60 tonnia. Sallittujen mittojen rajoissa pystytään rakentamaan lukuisa joukko erikokoisia kuormatiloja muuttelemalla kuormatilän pituutta ja korkeutta. Käytännössä pituusmittaa rajoittaa auton ajettavuus metsäautotiestöllä ja korkeutta lastausvälineiden, kuten pyöräkuormaajan, ulottuvuus. (Alakangas ym. 2003, 73.)

Tutkimuksessa kuljetettiin rankahaketta terminaalista Naistenlahden voimalaitokseen. Kuljetuksesta vastasi Ylijoki Kuljetus Oy (kuvio 2). Heillä oli käytössä useita kiinteällä kuormatilalla varustettuja täysperävaunuyhdistelmiä. Näistä kaksi oli pääsääntöisesti tarkoitettu tienvarsihaketukseen metsässä ja loput soveltuivat paremmin terminaalihaketukseen paremman tiestön käytön takia. Terminaalissa hake kuormattiin rekan kyytiin pyöräkuormaajalla ja tienvarressa puut haketettiin suoraan kyytiin. Kaikissa rekoissa oli ketjupurkulaitteet, joilla puretaan kuljetettava tavara kuormatilojen peräosasta. Metsärekoissa vetoauto ja perävaunu olivat molemmat neliakselisia. Muissa rekoissa vetoauto oli kolmiakselinen ja perävaunu viisiakselinen. Metsärekan vetoauton akselimääriä selittää se, että metsäautoteillä tarvitaan enemmän

Lauri Jylänki

pitoa kuin paremmilla teillä. Perävaunussa taas pienempi akselimäärä on kevyempi ja tuo ketteryyttä tiukkoihin käännöksiin. Muissa rekoissa ei tarvita hyvän tiestön käytön takia niin paljoa pitoa, joten vetoautossa voi olla vähemmän akseleita. Perävaunu taas voi olla pidempi ja tätä varten tarvitaan enemmän akseleita. Terminaalissa oli usein käytössä myös yhdistelmiä, jossa kolmiakselisen vetoauton perään oli laitettu neliakselinen perävaunu.



Kuvio 1: Hakkeen kuormausta Juhansuon terminaalissa (Kuva: Lauri Jylänki)

Lauri Jylänki

## 5 Hakkeen mittaus

Metsäpolttoaineiden laadun ja määrän määrittäminen tarvitaan sekä polttoaineen hinnoittelun että laitoksen polttoprosessin ohjausta varten. Erityisesti metsäpolttoaineilla laatuvariaatiot ovat suuria ja kosteus vaihtelee suuresti hake-erien välillä. Laatuominaisuuksista on kosteus tärkein ominaisuus hinnoittelussa. Muita laitoksen käytölle tärkeitä puupolttoaineen ominaisuuksia ovat tiheys, kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo ja tuhkapitoisuus, jotka yhdessä vaikuttavat polttoaineen teholliseen lämpöarvoon ja käsittelyyn lämpölaitoksella. Polttoaineen energiasisältötoimitusten hinnoittelua varten voidaan määrittää kolmella eri tavalla: painomittauksella, tilavuusmittauksella ja laitoksen tuottaman energiamäärän mukaan. Painomittaukseen perustuva hinnoittelu on useimmiten tarkempi kuin tilavuusmittaukseen perustuva. Se vaatii kuitenkin tarkkaa näytteenottoon perustuvaa kosteusmäärittäystä. Painomittaus on yleisin käytäntö varsinkin suurissa laitoksissa. Pienemmillä laitoksilla painomittaukseen perustuvan hinnoittelun esteenä on yleensä ollut sopivien, riittävän halpojen ja tarkkojen ajoneuvovaakojen puute. Luotettavan näytteen ottaminen polttoaine-erästä sekä näytteiden käsittely ovat laadunmäärittäksen tärkeimmät tekijät.

Automaattista näytteenottoa kohtuullisella tarkkuudella on sovellettu myös puupolttoaineille. Polttoainevalikoiman laajentuminen ja useat polttoainetoimittajat edellyttävät kuitenkin näytteenoton kehittämistä. Näytteenotossa on periaatteena, että ottopaikka tulisi olla mahdollisimman lähellä polttoaineen luovutuspaikkaa ja näyte tulisi ottaa koko tai valtaosasta liikkuvaa polttoainevirtaa. (Alakangas ym. 2003, 78–79.)

Käyttöpaikalla tehtävässä energiasisällön määrittämisessä noudatetaan toimialalla vakiintuneita laatuohjeita tai standardeja ja näihin perustuvia mittausohjeita.

Kosteusmäärittämisessä käytetään CENin teknisiä spesifikaatioita:

CEN/TS 14774-2 (kokonaiskosteus), CEN/TS 14774-3 (analyysikosteus), lämpöarvon määrittäminen CEN/TS 14918. (Koistinen, Lindblad & Äijälä 2008, 18 [FINBIO 1998].)

Tässä tutkimuksessa käytettiin hakkeen mittaukseen kuorman painoa ja tilavuutta.

Puun kuiva-tuoretiheydestä käytettiin tätä tutkimusta varten laskettua arvoa.

Lauri Jylänki

Määritettäviä tietoja olivat hakkeen kosteus, toimitustilaisen hakkeen lämpöarvo, energiamäärä ja muuntoluku irtokuutioista kiintokuutioiksi. Tutkimuksessa esiintyvä Naistenlahden voimalaitos käyttää painomittaukseen perustuvaa hinnoittelua. Kuormien tilavuus tarvitaan haketusyrityksen työn määrän mittaamiseen sekä yhdistyksen tarpeisiin.



Lauri Jylänki

## 6 Energiapuun toimituksen osapuolet

Tampereen Sähkölaitos Oy:n Naistenlahden voimalaitos polttaa energiantuotantaan varten maakaasua, turvetta, puuta ja öljyä. Puun tarpeen tyydyttämiseen voimalaitos tarvitsee energiapuun toimittajia. Näistä yksi on Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi, jonka energiapuun toimituksiin tämä tutkimus keskittyy.

### 6.1 Naistenlahden voimalaitos

Naistenlahden voimalaitos kuuluu Tampereen Sähkölaitos Oy:n konsernin omistukseen. Sen tytäryhtiö Tampereen Energiantuotanto Oy vastaa konsernin energian tuotannosta ja näin myös Naistenlahden voimalaitoksen toiminnasta. Tampereen Energiantuotanto Oy sai loppusyksyllä 2009 valmiiksi mittavan rakennushankkeen, joka mahdollistaa uusiutuvan energian tuotannon kaksinkertaistamisen Naistenlahti 2 -voimalaitosyksikössä. Alueelle rakennettiin uusi biopolttoaineen vastaanottoasema, seulomo, 3 000 kuutiometrin varastosiilo ja kuljettimia. Samalla lisättiin turpeen varastointikapasiteettia. Joulukuussa 2009 biopolttoaineiden osuutta Naistenlahti 2 -yksikössä nostettiin aiemmasta 20 prosentista enimmillään jopa 38,6 prosenttiin. Tavoitteena on nostaa se 40 prosenttiin vuoden 2010 aikana. Pääpolttoaineena säilyy edelleen turve. Biopolttoaineena käytetään metsähaketta, purua ja kuorta. (Tampereen Sähkölaitoksen Vuosiraportti 2009, 6.)

#### 6.1.1 Naistenlahden bioenergian tarve

Naistenlahden voimalaitos tarvitsee Kyrösjärven metsänhoitoyhdistyksen energianeuvojan Raimo Kauppilan mukaan lämmityskaudessa 300 GWh puupolttoaineita. Lämmityskausi on yleensä lokakuun alusta huhtikuun loppuun. Voimalaitos käyttää parhaimmillaan 40 tonnia puupolttoainetta tunnissa, mutta keskimäärin kulutus on lähempänä 20 tonnia riippuen puun kosteudesta, puulajista ja muista polttamiseen liittyvistä hienosäädöistä. Puupolttoaineiden käyttämisen kannattavuus perustuu päästökauppaan ja valtion tukiin. Alakankaan ym. mukaan (2003, 24) ”polttoaineen hiilidioksidin ominaispäästö osoittaa, kuinka paljon hiilidioksidia syntyy tuotettua energiayksikköä kohti. Hiilidioksidia vapautuu maakaasusta 56 g, raskaasta polttoöljystä 77 g, kivihiiilestä 95 g, turpeesta 106 g ja puusta 40 % kosteudessa 110 g, kun energiaa tuotetaan 1 MJ. Kun puupolttoaine

Lauri Jylänki

tuotetaan kestävänsä metsätalouden mukaisesti, hiili vain kiertää ilmakehän ja biomassan välillä. Tällöin puupolttoaineiden käyttö ei juurikaan lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Uusiutuvuutensa ansiosta puu on polttoaineena miltei hiilineutraali.” Puun hiilidioksidipäästöjä ei lasketa Suomen hiilidioksidipäästöihin, koska puupolttoaineiden laskennallinen nettopäästö on sovittu IPCC-paneelissa nollassa (Vapo Oy 2004, 11).

Hiilidioksidin hinta päästökaupassa määrittelee kulloinkin sen, että mitä polttoainetta kannattaa polttaa. Mikäli hiilidioksidin hinta nousee tarpeeksi korkealle, muuttuu esim. maakaasu kalliiksi käyttää, vaikka sen energiasisältö on ylivertainen puuhun nähden. Lisäksi metsähakkeelle maksetaan sähköntuotantotukea 6,9 EUR/MWh (Bioenergialehti 2009). Tämä lisää myös puun käytön kannattavuutta suhteessa muihin polttoaineisiin.

Ongelmia toimitusten kannalta aiheuttaa energiapuun käytön kausiluonteisuus. Naistenlahti valmistaa bioenergiasta pääosin kaukolämpöä, ja talvella lämmön tarve on normaalisti suuri. Kesällä kaukolämpöä tarvitaan vain murto-osa talven tarpeesta, joten kaukolämpö saadaan valmistettua kaasun poltossa sähkön valmistuksen sivutuotteena.

### 6.1.2 Puupolttoaineiden vastaanotto

Naistenlahteen valmistui syksyllä 2009 uusi vastaanottoasema ja varastosiilo puupolttoaineita varten. Tämä lisää vastaanoton nopeutta, sillä aiemmin kuormat purettiin samaan paikkaan turvekuormien kanssa. Nyt eivät puu- ja turverekat kilpaile samasta purkupaikasta.

Puupolttoaineiden vastaanotto alkaa hakerekan ajamisella ajoneuvovaa’alle. Siinä mitataan rekan paino kuorman ollessa täynnä. Kuljettaja näyttää tunnistuslaitteelle rekkakohtaista elektronista avaimenperää, joka sisältää rekan tunnistetiedot. Tämän jälkeen näyttölaitteelle ilmestyy rekan ja varastopaikkojen tietoja, joista kuljettaja valitsee oikean. Lisäksi kone vaatii kuljettajalta kuormakirjan numeron. Tämän jälkeen kuljettaja kuittaa tiedot ja ajaa purkupaikalle. Kuittauksen yhteydessä purkupaikan tulostimesta tulostuu kuorman tiedot tarralapulle, joka laitetaan purun jälkeen oikeaan näyteämpäriin kiinni.

Lauri Jylänki

Purkupaikalla kuljettaja ajaa nupin lattiassa olevan luukun yli, jonka jälkeen luukku avataan. Nupin purkamisen jälkeen laitetaan luukku kiinni ja ajetaan perävaunu purkupaikalle purettavaksi. Näin tehdään, jos rekassa on ketjupurkulaite, joka purkaa kuorman nupin ja perävaunun takaosista. Mikäli käytössä on kippirekka, tulee perävaunu purkaa ensin, tämän jälkeen irrottaa se nupista ja sitten peruuttaa purkupaikalle uudestaan. Kippirekkaa varten on myös valmistettu purkupaikalle liikuteltava takaseinä, ettei purettava tavara menisi purkupaikan yli. Purun yhteydessä tarvitsee purkupaikan sisätiloissa kuitata purku alkaneeksi ja päättyneeksi. Kuitaukset tehdään nupista ja kärrystä erikseen. Kun purku alkaa, käynnistyy kuljetin, joka kuljettaa tavarat varastosiiloon. Osa tavarasta menee kuljettimelta automaattiselle näyttönotolle. Mikäli se ei ole käytössä, ottaa kuljettaja manuaalisesti näytteen kuormasta ämpäriin, johon kiinnitetään tulostimen tulostama tarra. Purun jälkeen rekka ajetaan uudelleen vaa'alle, josta saadaan nyt tietää rekan tyhjäpaino. Kone laskee kuorman painon automaattisesti, kuljettaja kuittaa sen ja ajaa pois tehdasalueelta. Kuorman painoa tarvitaan energiamäärän laskemisessa ja kuljetusyrityksen maksuja varten.

## 6.2 Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi

Metsänhoitoyhdistys Kyrösjärvi toimii Hämeenkyrön, Ikaalisten, Sastamalan ja Ylöjärven alueella. Yhdistys tekee muiden töiden lisäksi hankinta- ja korjuupalvelua, joka on metsänomistajan lukuun tehtävää puunkorjuuta ja puunvälitystä. Metsänhoitoyhdistys hoitaa kaikki puukauppaan ja puunkorjuuseen liittyvät tehtävät metsänomistajan puolesta valtakirjalla. Yhdistyksen käytössä on kahdeksan korjuuketjua. Näillä tehdään vuosittain hankintapalvelua n. 150 000 – 170 000 m<sup>3</sup>. Työmaiden keskikoko on 240 kiintokuutiota. Hankintapalvelun kautta myydään noin 30 % vuotuisesta puumäärästä. (Mhy Kyrösjärvi.)

Kauppilan mukaan Naistenlahden voimalaitokselle toimitetaan 120 000 – 150 000 i-m<sup>3</sup> eli 48 000 – 60 000 k-m<sup>3</sup> puupolttoainetta lämmityskaudessa. Se vastaa koko hankintapalvelun korjuumäärästä ja Naistenlahden voimalaitoksen puupolttoaineiden käytöstä lähes kolmasosan. Puupolttoaineiden kategoriaan kuuluvat rankahake, metsätähdehake, kokopuuhake ja kantomurske. Naistenlahdessa ei ole erillistä murskaus- tai haketustoimintaa, joten yhdistys toimittaa sinne ainoastaan murskattua

Lauri Jylänki

tai hakettua tavaraa. Yhdistys saa maksunsa kuukausittain toimitetusta energiamäärästä. Tämä lasketaan kuormittain mitatuista painoista ja toimituserittäin mitatuista kosteuksista, sekä kuukausittaisten kokoomanäytteiden lämpöarvoista.

Lauri Jylänki

## 7 Tutkimuksen toteutus

Tutkimus lähti käyntiin tammikuun 2010 puolella välissä, kun olin ollut muutaman kerran yhteydessä Kyrösjärven metsänhoitoyhdistyksen energianeuvojaan Raimo Kauppilaan. Yhdistyksen puolelta oli etukäteen selvítettävä, mitä tutkittua tietoa on jo olemassa, että tutkimuksia ei tehtäisi turhaan. Hyvin pian oli jo selvillä että tutkimus liittyy ainakin energiapuuhakkeen kosteuden määrittämiseen. Ennen varsinaisen tutkimuksen aloittamista kävimme Kauppilan kanssa tutustumassa Naistenlahden voimalaitoksen puun vastaanottoaikaan, automaattiseen näytteenottoon, polttoainelaboratorioon ja otettuihin näytteisiin, sekä näiden pohjalta tehtyihin kosteusanalyysiin. Tässä vaiheessa oli jo havaittavissa käsituntumalla, että joidenkin näytteiden kosteudet olivat aivan erilaiset, kuin mitä analyysien tulokset kertoivat. Toinen asia, mikä kiinnitti huomiota, olivat rinnakkaisnäytteiden väliset erot. Eli kun hakkeesta otetaan kosteusnäyte, niin samasta erästä otetaan aina kaksi rinnakkaisnäytettä joiden erotukset eivät saisi standardin mukaan olla 50 prosentin kosteudessa yli yhtä prosenttiyksikköä. Vastaavasti pienemmillä kosteuksilla erot saavat olla vieläkin vähäisemmät. Tästä vierailusta saimme muutamia ideoita, joita kannattaisi lähteä selvittämään. Ensimmäinen tutkimuskohde oli terminaalissa haketetun karsitun rangan kosteuden määrittämisen vertailu. Toinen tutkittava asia oli, kuinka paljon rinnakkaisnäytteet todella vaihtelevat. Tätä tarkoitusta varten näytteet analysoitiin sekä Naistenlahden että Tamkin laboratoriossa.

Kosteusmäärittämisen lisäksi Kauppila halusi, että selvitan, kuinka paljon hakekuutio todellisuudessa onkaan kiintokuutioon. Yhdistyksellä oli aiemmin törmätty siihen ongelmaan, että pyöreän puun määrä kiintokuutioina oli arvioitu aivan erilaiseksi kuin mitä hakekuutioista saatu määrä antoi ymmärtää. Tällöin kuutioiden välisenä muuntokertoimenä oli käytetty lukua 2,5.

### 7.1 Näytteiden keruu

Näytteiden keruun aloitin tammikuun 2010 viimeisenä viikonloppuna. Tätä ennen sain kuitenkin selvittää, että missä näytteitä olisi mahdollista analysoida. Alun perin suunnitelmana oli analysoida näytteitä Naistenlahdessa, mutta sekin tarvitsi vielä vahvistaa. Tamkin, eli opiskelupaikkani laboratorio varmistui viimehetkellä kun kävin

Lauri Jylänki

tutustumassa laboratorio-olosuhteisiin. Tässä vaiheessa työn tarkoitus ja resurssit olivat jo selvinneet niin pitkälle että pystyin aloittamaan näytteiden keruun.

Tarkoituksena oli verrata kuljettajien kuormasta ottamaa näytettä ja minun ottamaa näytettä keskenään. Hakerekan kuljettajat ottavat jokaisesta kuormasta hakkeen purkupaikalla 1/3 ämpärillisen näytteen kymmenen litran ämpäriin. Yksi kuorma on nimeltään osatoimituserä ja yksi toimituserä muodostuu normaalitapauksessa kolmesta osatoimituserästä. Toimituserän muodostuminen alkaa aina vuorokauden alusta ja katkeaa vuorokauden loppuun. Näin ollen vuorokauden lopussa voi toimituserä muodostua niin yhdestä, kahdesta tai kolmesta osatoimituserästä. Toimituserien muodostumisen voi kuitenkin sekoittaa yhteyskatkos tulostimelle, jolloin kuljettajan on aloitettava uusi ämpäri vaikka edellinen ei vielä olisi täynnä. Ämpärin täyttö saattaa jatkua sitten kun yhteys tulostimelle palaa. Automaattisen näytteenoton testaus ja sisäänajo sekoitti osaltaan myös toimituserien muodostumisen, jolloin manuaalisesti otetut näytteet muodostivat toimituserän vain yhdestä tai kahdesta osatoimituserästä. Kosteusmääritys tehdään aina toimituserittäin, jolloin kolmellekin kuormalle voi tulla sama kosteusprosentti.

Minun tehtäväni oli ottaa näytteitä edustavammin useammasta kohtaa kuormaa, kuin kuljettajat ottivat. Käytännössä tämä tapahtui Destian ja Juhansuon terminaaleissa Tampereen myllypurossa. Näissä kahdessa terminaalissa pyöreä puu haketettiin aumalle ja hake laitettiin pyöräkuormaajalla hakerekan kyytiin. Tarkoituksena oli päästä ottamaan näytteet kaikista samoista kuormista, jotka tulivat yhteen toimituserään. Vain näin vertailu olisi ollut totuudenmukainen. Samalla kun hakerekan kuljettaja täytti rekkaa pyöräkuormaajalla, minä otin näytteitä aumasta. Jokaisen kuormaajan kauhaisun jälkeen minä otin reilun puoli litraa näytettä aumasta pussiin, siitä kohtaa mistä juuri oli kauhaistu. Yhteen kuormaan meni 13 – 15 kauhallista, kauhan koon ollessa  $10 \text{ m}^3$ . Täten yhteen pussiin kertyi n. 10 litraa näytettä. Aluksi oli tarkoitus ottaa näyte suoraan pyöräkuormaajan kauhasta, mutta työturvallisuusseikkoihin vedoten tämä olisi ollut turhan vaarallista, ja hidastanut myös kuljettajan työtä oleellisesti. Jokaisesta kauhallisesta putosi haketta takaisin aumaan, josta oli näyte huomattavasti kätevämpää ottaa. Hakeaumaan satanut lumi teki työstä sikäli vaikeaa, että näytteenottoa joutui valikoimaan niin että pelkkää lunta ei pussiin olisi tullut. Tarkoituksena oli kuitenkin päästä mahdollisimman

Lauri Jylänki

totuudenmukaiseen tulokseen. Lisäksi jotkin hakekappaleet olivat niin suuria, ettei niitä voinut ottaa näytteeseen mukaan, koska tässä työssä tehdyissä vertailuissa haketta ei homogenisoitu.

Kuorman täyttymisen jälkeen laitoin näytepussin sisälle lapun, johon kirjoitin kuormakirjan numeron, rekan rekisterinumeron, päivämäärän ja kellonajan. Kaikki nämä tiedot siksi, että jos myöhemmin tulisi jotain sekaannuksia, niin voisin löytää oikeat kuormat näiden tietojen avulla. Tämän jälkeen suljin pussin hyvin ettei kosteutta päässyt sisään eikä ulos. Suoritin tämän toimenpiteen 47 kertaa neljänä eri viikonloppuna. Näistä kaikista kuormista sain vertailukelpoisia täysiä toimituseriä vain 14. Näytteiden analysoinnin tein aina jokaisen viikonlopun jälkeen, koska näin työ sujui jouhevasti ja tuloksia tuli koko ajan matkan varrella. Jo varhaisessa vaiheessa huomasin, että näytteiden ottamisen suunnittelu on vaikeaa, ellei mahdotonta. Yritin muutaman kerran päästä päivän alusta ensimmäiseen kuormaan mukaan, mutta silloinkin joku oli jo kerinnyt viemään yöllä yhden kuorman. Näin minä pääsin vain osaan ämpäriin menevistä kuormista käsiksi ja vertailu tähän toimituseriään oli siis epäonnistunut. Samoin kävi myös niissä tilanteissa, kun yhteys tulostimelle oli katkennut tai näytteitä oli välillä otettu automaattisella näytteenotolla. Joistakin kuormista ei ollut vertailukohtaa ollenkaan saatavilla, johtuen luultavasti automaattisen näytteenoton ongelmista.

## 7.2 Näytteiden analysointi

Tutkimuksen näytteistä analysoitiin kosteus ja lämpöarvo, ja näiden perusteella määritettiin energiatiheys ja hakkeen tiiviys kuormassa.

### 7.2.1 Kosteuden määrittäminen

Terminaalissa keräämistäni näytteistä analysoitiin kosteus. Tähän tarkoitukseen sain avukseni voimalaitoksen henkilökuntaa. Tein heidän kanssaan analyysin Naistenlahden polttoainelaboratoriossa ja myöhemmin samoista näytteistä omin voimin Tamkin laboratoriossa. Naistenlahdessa työ sujui helposti, koska kaikki tarvittava oli käden ulottuvilla ja työtä ei tarvinnut tehdä yksin. Aluksi kaadoin näytepussin sisällön 50 litran saaviin, jossa sekoittelin sen käsin tehokkaasti noin 15 sekunnin ajan. Tamkilla minun ei enää tarvinnut sekoittaa näytteitä, sillä otin Naistenlahdesta mukaan osan sekoitetusta hakkeesta. Sekoituksen jälkeen tein aivan

Lauri Jylänki

kuten Alakangas (2000, 27) kertoo kosteusnäytteiden analysoimisesta.

”Kosteusnäytteiden koko määräytyy käytettävän punnitustarkkuuden sekä polttoaineen palakoon mukaan. Kun punnitustarkkuus on 0,1 g, punnitaan kaksi 200 – 400 g suuruista näytettä. Näytteet kuivataan ilmastoidussa lämpökaapissa  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  lämpötilassa vakiopainoon. Useimmiten 16 tunnin kuivausaika on riittävä kun näyte on enintään 30 mm paksuisena kerroksena. Näytteitä ei saa kuivata yli 24 tuntia.”

Näytteiden painot osuivat 200 – 400 g haarukkaan aina Naistenlahdessa, mutta koulun näytteistä muutama oli hieman alle 200 g astian koon tuoman rajoitteen vuoksi.

Ongelmat koululla eivät jääneet tähän, sillä astiat eivät olleet niin koon kuin muodonkaan puolesta samanlaisia kuin Naistenlahdessa. Käytin litran lasiastioita, joihin jouduin laittamaan haketta jopa 100 mm paksuisen kerroksen, vaikka ohjeessa sanottiin että paksuus saisi olla enintään 30 mm. Tässä vaiheessa otin analysointiin erilaisen katsanto kannan. Aloin selvittämään, että olisiko liian paksulla kerroksella jotain vaikutusta tulokseen.

Kuivauksen jälkeen näytteet punnitaan kuumana välittömästi sen jälkeen, kun ne otetaan lämpökaapista. Ilmoitustarkkuus on 0,1 prosenttiyksikköä. Näytteiden kosteus lasketaan kuivauksen aikana tapahtuvasta massan muutoksesta yhtälön 1 mukaisesti.

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

missä

$M_{ar}$  on märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)

$m_1$  on määrän näytteen massa (g)

$m_2$  on kuivatun näytteen massa (g).

(Alakangas 2000, 27.)

Taulukossa 1 analysointipaikkojen kosteusprosentit yhteensä on laskettu painotetusti sen mukaan, että kummassa näytteessä on ollut tuorepaino enemmän. Kosteuden määritykset eivät menneet aivan täydellisesti koulun laboratoriossa, sillä yhdellä kertaa lämpökaappi oli polttanut sulakkeen. Tämä kyseinen erä meni vertailukelvottomaksi, joten poistin kaikki yhdeksän siinä kaapissa ollutta näytettä vertailuista.



Taulukko 1: Kosteuslaskelma Destian terminaalista 31.1 otetusta näytteestä

Naistenlahti								
	Astia (g)	Astia+tuore (g)	Tuore (g)	Astia+kuiva (g)	Kuiva (g)	Vesi (g)	Kosteus%	Keskiarvo
Näyte 1	212,3	447,8	235,5	340,1	127,8	107,7	45,7 %	46,3 %
Näyte 2	213,8	441,8	228	334,9	121,1	106,9	46,9 %	
			Rinnakkaisnäytteiden välinen erotus (%-yksikköä)				1,2 %	
Tamk								
	Astia (g)	Astia+tuore (g)	Tuore (g)	Astia+kuiva (g)	Kuiva (g)	Vesi (g)	Kosteus%	Keskiarvo
Näyte 1	242,4	507,7	265,3	389,9	147,5	117,8	44,4 %	45,1 %
Näyte 2	252,8	512,5	259,7	393,4	140,6	119,1	45,9 %	
			Rinnakkaisnäytteiden välinen erotus (%-yksikköä)				1,5 %	

### 7.2.2 Lämpöarvon määrittäminen

Hakkeen hinnan määrittämiseen vaikuttaa kosteuden lisäksi myös lämpöarvo.

Naistenlahden voimalaitos määrittää sen joka kuukausi, jokaisesta poltettavasta hake- ja murskelajikkeesta erikseen. Lämpöarvon määrittäminen suorittaa VTT:n, Vapo Oy:n ja Jyväskylän Energia Oy:n omistama ENAS Oy. Naistenlahdessa on kyllä tarvittavat välineet, mutta toiminta vaatii sertifiointin, jota Tampereen sähkölaitoksella ei ole. Lämpöarvon määrittäminen alkaa kokoomanäytteen keräämisellä. Kokoomanäyte tehdään jokaisesta poltettavasta lajikkeesta ja jokaisen tavarantoimittajan näytteistä erikseen. Siihen kerätään jokaisesta saman kuukauden toimituserästä kourallinen näytettä, sekoitetaan ja jauhetaan. Jauhatus tehdään 0,25 mm jauhinterällä ja tarkoituksena on saada partikkelit niin pieniksi että näytteestä pystyy puristamaan pillerin.

Ilmakuivasta (tasapainokostea) analyysinäytteestä punnitaan noin 1 g, joka poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa happiatmosfäärissä ja vapautuva lämpö mitataan (Kuvio 3). Samanaikaisesti määritetään analyysinäytteen kosteus, jonka avulla ilmakuivan näytteen lämpöarvo muunnetaan vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Tuloksena ilmoitetaan kahden rinnakkaismäärittämyksen keskiarvona saatu kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo absoluuttisen kuivalle näytteelle, joka lasketaan yhtälön 2 mukaisesti. Rinnakkaismäärittämyksen välinen ero saa olla korkeintaan 0,120 MJ/kg. Lämpöarvomäärittämyksen ilmoitustarkkuus on 0,01 MJ/kg.

$$q_{gr,d} = q_{gr,ad} \times \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (2)$$

missä

$q_{gr,d}$  = kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo eli ylempi lämpöarvo (MJ/kg)

Lauri Jylänki

$q_{gr,ad}$  = analyysikostean (ilmakuivan) näytteen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)

$M_{ad}$  = näytteen (ilmakuivan) analyysikosteus (%).

(Alakangas 2000, 28.)



Kuvio 3: Adiopaattinen pommikalorimetri (Kuva: Raimo Kauppila)

Polttoaineen lämpöarvon mittasuurena on yleensä joko MJ/kg tai kWh/kg.

Kalorimetrinen lämpöarvo osoittaa palamisessa vapautuvan kokonaislämpömäärän, joka on riippumaton polttoaineen kosteudesta. Osa vapautuvasta lämmöstä joudutaan todellisuudessa kuitenkin käyttämään puussa alun perin olleen ja palamisessa syntyneen veden höyrystämiseen. Tehollinen lämpöarvo ottaa huomioon höyrystymiseen kuluvan energian ja on siis pienempi kuin kalorimetrinen lämpöarvo. Mitä enemmän polttoaineessa on vettä ja vetyä, sitä suurempi on ero kalorimetrinen ja tehollisen lämpöarvon välillä seuraavien kaavojen mukaisesti. Polttoaineen tehollinen lämpöarvo ilmoitetaan tarpeen mukaan joko kuivamassaa tai kokonaismassaa kohti:

Polttoaineen tehollinen lämpöarvo ( $q_{net,d}$ ) on

$$q_{cal} - 2,443 \times 0,09H = q_{cal} - 0,219H \quad (3)$$

Märän puun kuivamassa ( $q_{net,ar}$ ) on

$$q_{net,d} - 2,443 \times \frac{M_{ar}}{100 - M_{ar}} \quad (4)$$

Märän puun kokonaismassa ( $q_{net,ar}$ ) on

$$q_{net,d} \times \frac{100 - M_{ar}}{100} - 0,02443 \times M_{ar} \quad (5)$$

Lauri Jylänki

missä

$q_{cal}$  = Puun kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg kuivamassaa

$q_{net,d}$  = Vettä sisältämättömän puun tehollinen lämpöarvo, MJ/kg kuivamassaa. (kaava 1)

$q_{net,ar}$  = Vettä sisältävän puun tehollinen lämpöarvo, MJ/kg kuivamassaa (kaava 4) tai kokonaismassaa (kaava 5) kohti

H = Puun vetypitoisuus, %

$M_{ar}$  = Puun kosteus % (veden osuus kokonaismassasta).

(Alakangas ym. 2003, 26–27.)

Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään kokeellisesti laboratoriossa. Teholliseen lämpöarvoon päästään laskennallisesti ottamalla huomioon puussa oleva vety ja vesi. Kerroin 0,09 osoittaa absoluuttisen kuivassa puussa olevasta vedystä syntyvän veden määrän, kun yksi osa vetyä yhdistyy kahdeksaan osaan happea ja muodostaa yhdeksän osaa vettä. Kun puun vetypitoisuus on keskimäärin 6 %, on kalorimetrinen ja tehollisen lämpöarvon ero absoluuttisen kuivassa puussa  $0,22 \times 6$  eli 1,3 MJ/kg. Koska puupolttoaineessa on aina myös vettä, on jälkimmäisessä kaavassa lisäksi mukana puun kosteus, jolla tarkoitetaan veden osuutta puun kokonaismassasta. Laskentakaavassa esiintyvä arvo 2,443 MJ/kg edustaa sitä energiamäärää, joka tarvitaan höyrystämään lämpötilassa 25°C oleva vesi. (Alakangas ym. 2003, 26–27.)

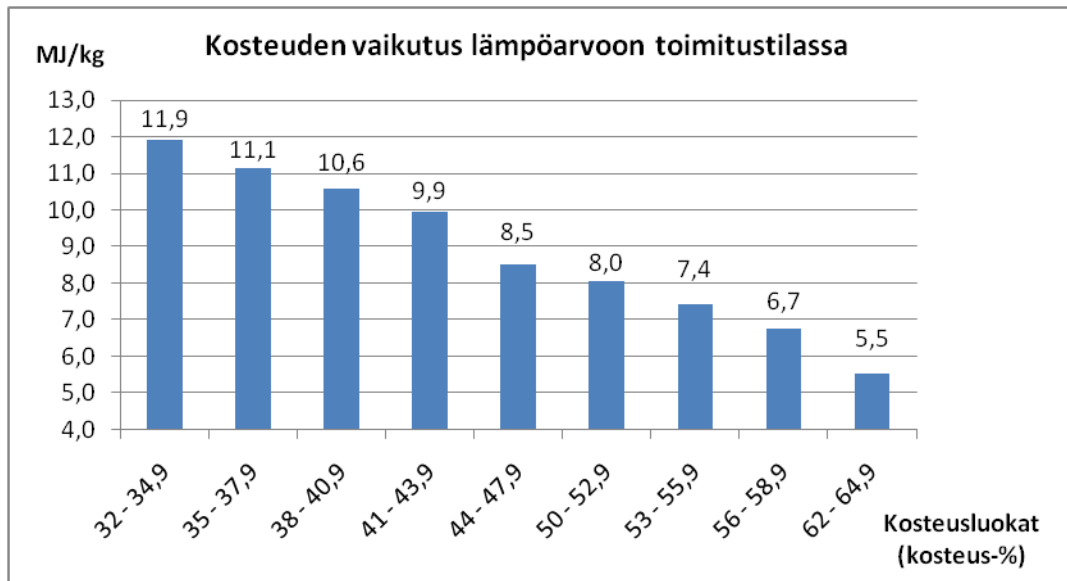
Hakkeen hinnan määrittämisessä käytetään maksuperusteena tehollista lämpöarvoa. Yhtenä osana työtä oli selvittää, miten lämpöarvon määrittäminen tehdään. Se tehtiin helmikuun 2010 rankahakkeen osalta. ENAS oli määrittänyt samoista näytteistä kalorimetriseksi lämpöarvoksi 20,17 MJ/kg, kun Naistenlahdessa tehdyissä mittauksissa saimme 20,13 MJ/kg. Laboratorioiden välisissä näytteissä saa olla eroa 0,3 MJ/kg, joten tulokset voi lukea aivan identtiseksi. Lämpöarvojen määrittämisessä ei siis suuria eroja pääse syntymään. Kuviossa 4 nähdään kuinka suuri merkitys kosteudella on lämpöarvoon ja tätä kautta puun kosteus on ehdottomasti tärkein linkki hinnan muodostumisessa.

Kuvioissa 4 ja 5 on nähtävissä kuinka kuivimman ja kosteimman luokan välillä on kaksinkertainen ero niin lämpöarvossa kuin energiamäärässä mitattuna.

Energiamäärään kuormissa vaikuttaa kosteuden lisäksi alentavana kuorman paino.

Lauri Jylänki

Oikein kosteassa tavarassa tulee lain sanelema painoraja ennemmin täyteen kuin kuorman tilavuus.



Kuvio 4: Kosteuden vaikutus lämpöarvoon (MJ/kg) toimitustilassa. Laskettu 47 kuormasta otetuista näytteistä, tehollisen lämpöarvon ollessa 19 MJ/kg. Lämpöarvopalkit ovat kosteusluokkien keskiarvoja.

### 7.2.3 Energiatiheyden määrittäminen

Määritin työtä varten kuormakohtaisia energiamääriä, joita varten tarvitsin seuraavanlaisia kaavoja VTT:n tiedotteesta ”Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia”:

Energiatiheys saapumistilassa lasketaan yhtälön 6 mukaisesti.

$$E_{ar} = \frac{1}{3600} \times q_{net,ar} \times D_{ar} \quad (6)$$

missä

$E_{ar}$  = saapumistilaisen polttoaineen energiatiheys (MWh/i-m<sup>3</sup>)

$q_{net,ar}$  = saapumistilaisen polttoaineen lämpöarvo (MJ/kg)

$D_{ar}$  = saapumistilaisen polttoaineen irtotiheys eli tilavuuspaino (kg/i-m<sup>3</sup>)

$\frac{1}{3600}$  = energiayksikön muuntokerroin (MWh/MJ).

Toimitettu energiamäärä W (MWh:na) lasketaan yhtälön (7) mukaisesti.

$$W = \frac{q_{net,ar}}{3,6} \times m \quad (7)$$

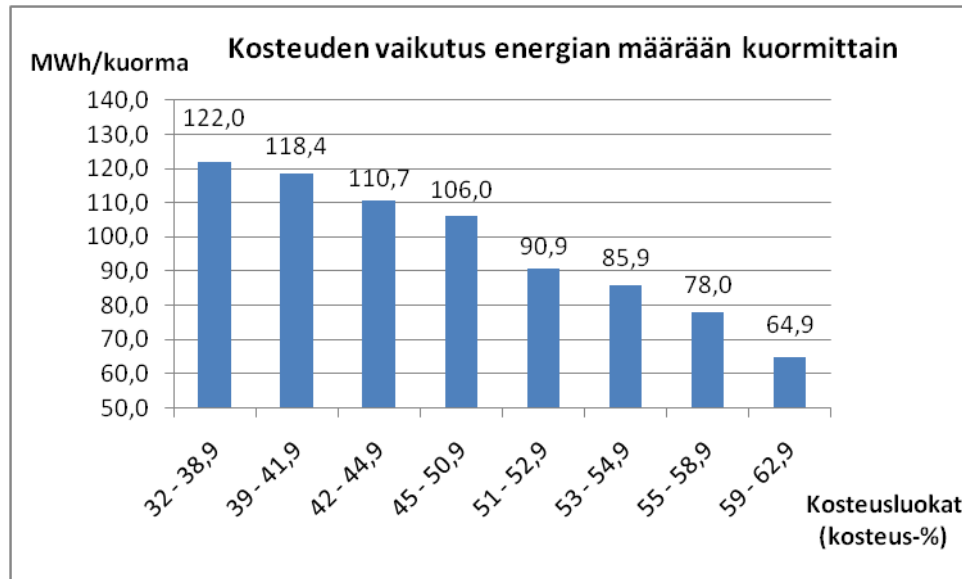
missä

Lauri Jylänki

$\frac{q_{net,ar}}{3,6}$  = saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon (MJ/kg) muunto yksiköihin MWh/t

m = toimitetun polttoaineen massa (tonnia).

(Alakangas 2000, 30.)



Kuvio 5: Kosteuden vaikutus energiamäärään (MWh) kuormittain. Laskettu 47 kuormasta otetuista näytteistä, tehollisen lämpöarvon ollessa 19 MJ/kg. Energiamäärää kuvaavat palkit ovat kosteusluokkien keskiarvoja.

#### 7.2.4 Hakkeen tiiviyn määritys

Alakankaan ym. (2003, 30) mukaan hakkeen tiiviyys riippuu seuraavista tekijöistä: Palan muoto, palakokojakauma, Oksat, puulaji, vuodenaika, kuormaustekniikka ja kuljetuksen aiheuttama painauma. Mitä litteämpiä hakepalaset ovat, sitä alhaisempi on tiiviyys. Epätasainen palakokojakauma merkitsee korkeata tiiviyttä, sillä suurempien palasten väliset tilat täyttyvät hienojakeilla. Tässä työssä käytetty hake oli pääsääntöisesti melko litteää ja pientä. Hakkurin hakettaessa aumaan kaikista suurimmat kappaleet lensivät pisimmälle ja olivat jopa 20 cm pituisia.

Hakkeeseen jäävät oksanpätkät, erityisesti norjat hieno-oksat, alentavat tiiviyttä. Hauraasta pehmeästä puusta tehty hake sisältää enemmän hienoainesta kuin kovasta puusta tehty. Siten leppähakkeen tiiviyys on korkeampi kuin koivuhakkeen. Jäätäneestä puusta syntyy haurautensa vuoksi haketuksessa enemmän hienoainesta kuin sulasta, mikä merkitsee korkeampaa tiiviyttä. Hakekuorman täyttäminen puhaltamalla johtaa korkeampaan tiiviyteen kuin vapaa pudotus kuljettimelta tai siilosta, erityisesti jos

Lauri Jylänki

täyttö tapahtuu päältä pikemmin kuin perästä. Mitä voimakkaammin hake iskeytyy kuormaan, sitä tiheämpään se asettuu. Hakekuljettimen päähän asennettu linko lisää tiiviyyttä. Tiiviyys kasvaa kuljetuksen aikana riippuen lähtötilanteen tiiviyydestä, matkan pituudesta, tien laadusta sekä kuorman mahdollisesta jäätymisestä. (Alakangas ym. 2003, 30.)

Tutkimuksen tekohetkellä oli talvi ja hakkeen palakokojakauma oli silminnähdn epätasainen. Tämä lisää hakkeen tiiviyyttä. Leppää hakkeen joukossa oli kuitenkin melko vähän ja kuormaustekniikkana oli käytössä päältäkaato pyöräkuormaimella, joten näiden tekijöiden ansiosta hake ei ollut niin tiiviissä kuin se parhaimmillaan olisi voinut olla. Hakerekan kuljettaja arvioi hakkeen irtotilavuuden kuormaamisen jälkeen eli ennen kuljetusta, jolloin kuorman kuljetuksen aikaisella painumisella ei tässä työssä ole merkitystä. Painumiseen vaikuttavat aiemmin mainittujen lisäksi myös rekan jousitus. Jäykempi jousitus aiheuttaa enemmän tärinää ja tiivistää kuormaa.

Lauri Jylänki

## 8 Tulokset

Tuloksia analysoimalla sain tietoa näytteiden kosteudesta, näytteenottotapojen, analysointipaikkojen ja rinnakkaisnäytteiden eroista, hakkeen tiivyydestä hakerekassa sekä energiatiheystä. Tulosten analysoimiseen käytin taulukkolaskentaohjelmaa.

### 8.1 Kosteusmääritysten vertailua

Kosteusmääritysten vertailussa käytin tilastotieteessä käytettävää hypoteesin testausta. Tilastollisten testien avulla tutkitaan perusjoukosta tehtyjen olettamusten eli hypoteesien paikkansapitävyyttä. Tutkimuksessa perusjoukkona olivat kuljettajan ottamat näytteet ja minun ottamat näytteet. Testauksessa asetetaan kaksi hypoteesia, joista toista nimitetään nollahypoteesiksi  $H_0$  ja toista vaihtoehoiseksi hypoteesiksi  $H_1$ . Nollahypoteesilla tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että kuvitellaan vertailtavien kohteiden olevan yhtä suuret. Vaihtoehtoinen hypoteesi tulee voimaan, kun näin ei ole. Nollahypoteesia testattaessa päätetään etukäteen, kuinka suuri riski otetaan, että tehdään hylkäämisvirhe. Hylkäämisvirheen todennäköisyyttä  $p$  sanotaan merkitsevyystasoksi. Tilasto-ohjelmat laskevat automaattisesti hylkäämisvirheen todennäköisyyden  $p$ -arvon. Se osoittaa väärän johtopäätöksen todennäköisyyden, jos nollahypoteesi hylätään. (Holopainen & Pulkkinen 2002, 156–157.)

Tilastomatematiikan opettajan Jukka Suomisen mukaan tämänkaltaisissa testeissä käytetään yleensä 95 % luottamusväliä. Tällaisella luottamusvälillä 95 prosenttia jakaumasta on  $\pm 1,96$  keskihajonnan päässä jakauman keskiarvosta. Suurempaa luottamusväliä käytetään esimerkiksi testattaessa lääkkeitä. Kun on kyseessä ihmishenkiä, eivät virhemarginaalit saa olla kovin suuria. Tämän tutkimuksen testeissä on siis käytetty 95 % luottamusväliä.

Kosteusmäärityksissä kannatti käyttää verrannollisten parien  $t$ -testiä, koska sillä pystytään vertailemaan tällaista joukkoa, jossa verrattavat parit ovat samasta kuormasta lähtöisin. Verrannollisessa testissä poimitaan  $n$  yksikön otos perusjoukosta siten, että tehdään samoille tilastoyksiköille kaksi mittausta. Näin saadaan  $n$  toisistaan riippuvaa havaintoparia (Holopainen & Pulkkinen 2002, 170). Excelillä tehtynä tämän testin nimi oli ”parittainen kahden otoksen  $t$ -testi keskiarvoille”. Siinä tärkeimmät seurattavat arvot olivat testisuure, kriittinen arvo ja  $p$ -arvo. Testisuureta verrattiin

Lauri Jylänki

kriittiseen arvoon, ja mikäli testisuure ylitti kriittisen arvon, nollahypoteesi hylättiin. Tässä vaiheessa p-arvo kertoi todennäköisyyden, jolla johtopäätös olisi ollut väärä.

### 8.1.1 Näytteenottotapojen vertailua

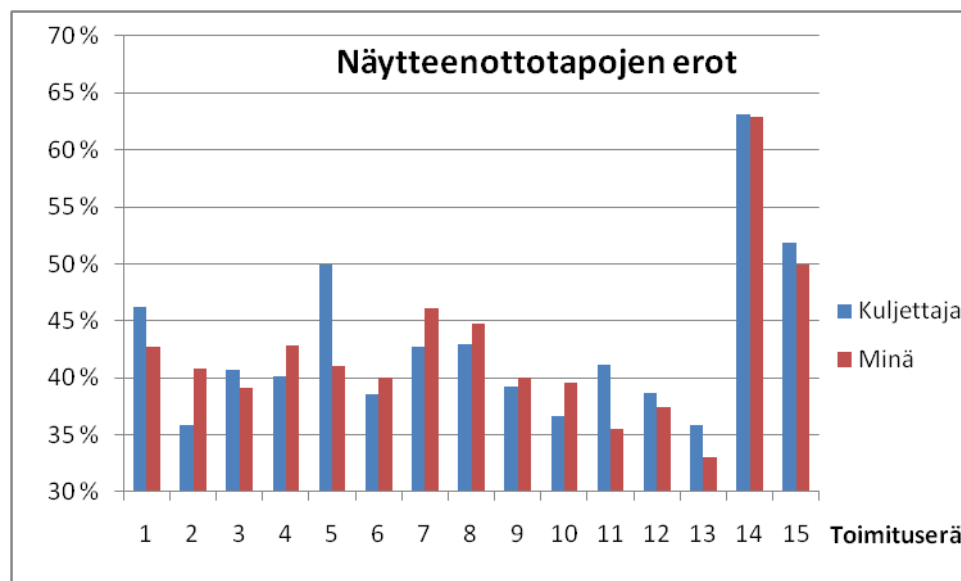
Vertailukohteena olivat minun ottamat näytteet terminaalissa ja kuljettajan ottamat näytteet Naistenlahden purkupaikalla. Yhteensä vertailtavia kohteita kertyi 15. Toimituserien sisällä osatoimituserien määrä jakautui niin, että yhden kuorman toimituseriä oli viisi, kahden kuorman kaksi ja kolmen kuorman kahdeksan. Tuloksien luotettavuus olisi parantunut, mikäli otoskokoa olisi saanut kasvatettua isommaksi. Analysointipaikkana molemmissa oli Naistenlahti. Taulukossa 2 on kuvattuna toimituserittäin kosteusprosentit kuljettajan ottamalle näytteelle ja minun ottamalle näytteelle. Siitä näkee, että pienin arvo on osunut minun näytteelle ja suurin kuljettajan näytteelle. Keskiarvot ovat kuitenkin pysyneet melko samoissa lukemissa. Eroa on vain 0,52 prosenttiyksikköä. Keskihajonta on aavistuksen suurempi kuljettajan näytteillä, johtuen ehkä juuri siitä, että kuormien sisällä vaihtelut ovat suuria, ja näytteenottokohta vaikuttaa merkittävästi tulokseen. Näytteiden erotukset kuvaavat näytteiden yhtäläisyyttä. Täysin samanlaisten näytteiden erotukset olisivat nolla, ja sitä erilaisempia näytteet ovat mitä suurempi on erotus nolnaan verrattuna. Näytteet ovat olleet kauimpana toisistaan, kun niiden erotus on ollut 8,91. Tämä kertoo suuresta vaihtelusta. Pienimmillään ero on ollut 0,2 prosenttiyksikköä. Samainen kuorma edustaa myös ainoata toimituserää, josta on vertailukohta Naistenlahden automaattiseen näytteenottoon. Käytännössä 0,2 prosenttiyksikköä tarkoittaa samaa tulosta, koska juuri tarkemmin ei pystytä kosteutta mittaamaan. Kuviossa 6 esitellään kuljettajan ja minun näytteitä pylväsdiagrammin muodossa.



Lauri Jylänki

Taulukko 2: Toimituserien vertailu eri näytteenottotapojen kesken. Kummatkin näytteet analysoitu Naistenlahdessa. Erotus on kuljettajan ja minun näytteiden välinen ero.

Toimituserä	Kuljettaja	Minä	Erotus
1	46,2 %	42,8 %	3,4
2	35,9 %	40,8 %	4,9
3	40,7 %	39,2 %	1,5
4	40,1 %	42,9 %	2,8
5	49,9 %	41,0 %	8,9
6	38,6 %	40,0 %	1,4
7	42,7 %	46,1 %	3,4
8	43,0 %	44,7 %	1,7
9	39,2 %	40,1 %	0,9
10	36,6 %	39,5 %	2,9
11	41,1 %	35,5 %	5,6
12	38,7 %	37,4 %	1,3
13	35,9 %	33,1 %	2,8
14	63,1 %	62,9 %	0,2
15	51,9 %	50,0 %	1,9
<b>Minimi</b>	<b>35,9 %</b>	<b>33,1 %</b>	
<b>Maksimi</b>	<b>63,1 %</b>	<b>62,9 %</b>	
<b>Keskiarvo</b>	<b>42,9 %</b>	<b>42,4 %</b>	
<b>Keskihajonta</b>	<b>7,33</b>	<b>7,03</b>	



Kuvio 6: Näytteenottotapojen erot toimituserittäin. Mittaukset tehty Naistenlahdessa. Pystypalkissa kosteusprosentit.

Lauri Jylänki

Taulukossa 3 on suoritettuna pareittaisen kahden otoksen t-testi keskiarvoille, joka kuvastaa näytteiden samankaltaisuutta. Tässä verrataan testisuureen arvoa kriittiseen arvoon. Taulukosta valitaan vertailtavaksi kaksisuuntaiset arvot, koska arvot voivat mennä myös miinukselle. Tämä johtuu siitä, että vertailtavista näytteenottotavoista voi kumpi vain tehdä pienemmän tai suuremman tuloksen. Mikäli voitaisiin olettaa, että vain toisella tavalla olisi joka kerta suurempi tai pienempi arvo, taulukosta tulisi seurata yksisuuntaisia arvoja. Testissä on asetettu nollahypoteesiksi, että näytteiden ottotavalla ei olisi mitään merkitystä lopputulokseen. Testissä testisuureen arvo jää pienemmäksi kuin kriittinen arvo, joten nollahypoteesi jää voimaan ja voimme todeta, että keskiarvot ovat yhtä suuret. P-arvoa käytetään vain siinä tilanteessa kun nollahypoteesi hylätään. Se kertoo siinä vaiheessa, kuinka suurella todennäköisyydellä johtopäätös olisi väärä.

Taulukko 3: Pareittainen kahden otoksen t-testi näytteenottotapojen keskiarvoille.

	<i>Kuljettaja</i>	<i>Minä</i>
Keskiarvo	42,907	42,391
Varianssi	53,744	49,436
Havainnot	15	15
Pearsonin korrelaatio	0,867	
Arvioitu keskiarvojen ero	0	
va	14	
t Tunnusluvut	0,539	<b>Testisuuren arvo</b>
P(T<=t) yksisuuntainen	0,299	
t-kriittinen yksisuuntainen	1,761	
P(T<=t) kaksisuuntainen	0,599	<b>p-arvo</b>
t-kriittinen kaksisuuntainen	2,145	<b>Kriittinen arvo</b>

### 8.1.2 Analysointipaikkojen vertailua

Analysointipaikkojen eroja vertailtaessa jouduin poistamaan yhdeksän näytettä vertailuista, koska eräs Tamkin näyte-eristä oli osaksi mennyt pilalle. Minulla oli siis 26 vertailtavaa kohdetta, joista oletuksena oli, että tulokset olisivat olleet samat. Testeissä vertailtiin jokaista osatoimituserää eli kuormaa erikseen. Testit ja vertailutavat olivat aivan samat kuin edellä näytteenottotapojen vertailussa. Taulukosta 4 näkee ennen kaikkea sen, että Naistenlahden mittauksien kosteuden keskiarvo on 0,89 prosenttiyksikköä suurempi kuin Tamkissa mitattujen näytteiden keskiarvo. Taulukon 5 t-testin mukaan testisuure ylittää kriittisen arvon, jolloin nollahypoteesi keskiarvojen yhtäsuuruudesta hylätään ja vaihtoehtoinen hypoteesi

Lauri Jylänki

astuu voimaan. Keskiarvot todetaan siis erisuuruiksi. P-arvo 0,011 kertoo, että 1,1 prosentin todennäköisyydellä johtopäätös on väärä. Verrattaessa keskenään johtopäätöksiä analysointipaikkojen ja näytteenottotapojen kesken, huomataan, että pienellä keskiarvon muutoksella nollahypoteesi hylättiin. Tämä ei kuitenkaan ole koko totuus, sillä analysointipaikkojen kesken luvut korreloivat keskenään huomattavasti enemmän, kuin vastaavasti näytteenottotapojen kesken. Mitä enemmän verrattavat parit korreloivat keskenään, sitä pienemmällä keskiarvojen erolla nollahypoteesi hylätään.

Taulukko 4: Analysointipaikkojen vertailun tunnuslukuja.

	Naistenlahti	Tamk
<b>Minimi</b>	32,1 %	31,9 %
<b>Maksimi</b>	50,1 %	48,6 %
<b>Keskiarvo</b>	39,8 %	38,9 %
<b>Keskihajonta</b>	4,3	4,4

Taulukko 5: Parittainen kahden otoksen t-testi analysointipaikkojen keskiarvoille.

	Naistenlahti	Tamk
Keskiarvo	39,803	38,912
Varianssi	18,681	19,567
Havainnot	26	26
Pearsonin korrelaatio	0,928	
Arvioitu keskiarvojen ero	0	
va	25	
t Tunnusluvut	2,742	<b>Testisuuren arvo</b>
P(T<=t) yksisuuntainen	0,006	
t-kriittinen yksisuuntainen	1,708	
P(T<=t) kaksisuuntainen	0,011	<b>p-arvo</b>
t-kriittinen kaksisuuntainen	2,060	<b>Kriittinen arvo</b>

Tuloksen mukaan keskiarvot poikkeavat säännöllisesti toisistaan niin, että Tamkissa mitattujen näytteiden kosteusprosentit ovat pienempiä. Tätä selittää näyteastioiden erilaisuus. Naistenlahdessa näyteastiat olivat laakeita, ja niihin tuli enintään 30 mm kerros haketta. Tamkissa käyttämäni näyteastiat olivat lämmönkestäviä mittalaseja, jolloin 200 gramman minimirajan saavuttamiseksi jouduin laittamaan haketta jopa 100 mm kerroksen. Näytteet punnitaan sekä ennen että jälkeen kuivatuksen. Tuoreen näytteen ja kuivan näytteen erotus kertoo veden määrän tuoreessa näytteessä. Tamkissa vettä oli haihtunut järjestelmällisesti vähemmän, joka näkyy pienempänä

Lauri Jylänki

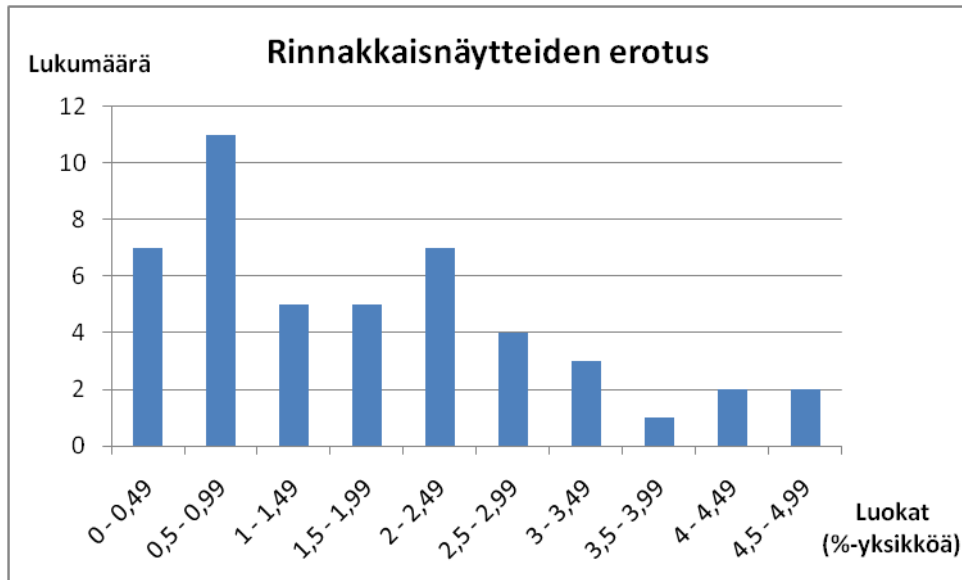
kosteusprosenttina. Standardiin ei siis ole turhaan kirjoitettu enimmäisrajaa näytteen kuivatuspaksuudelle.

### 8.1.3 Rinnakkaisnäytteiden vertailua

Naistenlahdessa mitatuista näytteistä on rinnakkaisnäytteiden erotuksia yhteensä 47. Näistä on kuviossa 7 havaittavissa suurta hajontaa. Lähes puolessa tapauksista erot ovat yli 1,5 prosenttiyksikköä. Kosteusmäärityksen standardissa sanotaan, että rinnakkaismääritysten ero saa olla enintään  $1/50$  rinnakkaismääritysten keskiarvosta. Toisin sanoen tämä on yksi prosenttiyksikkö, kun puun kosteus on 50 %. Vain 32 % eli 15 näytettä läpäisi tämän vaatimuksen. Pienimmillään erot olivat 0,1 prosenttiyksikköä ja suurimmillaan jopa 4,6 prosenttiyksikköä. Keskimäärin erot olivat 1,8 prosenttiyksikköä, kun ne keskimäärin olisivat saaneet olla 0,88 prosenttiyksikköä.

Analysointipaikkojen välillä erot olivat samansuuntaiset, kuitenkin niin, että Tamkissa tehdyissä mittauksissa erot olivat keskimäärin hieman pienemmät. Tamkin keskiarvo oli 1,4 prosenttiyksikköä ja Naistenlahden 1,7 prosenttiyksikköä. Mittaustuloksia vertailussa oli 26. Muutamassa tapauksessa tulokset korreloivat selvästi keskenään. Muun muassa suurimmat erot tulivat samasta näytteestä. Naistenlahden 4,4 prosenttiyksikköä ja Tamkin 4,2 prosenttiyksikköä. Näytteiden erot saattavat johtua suuresta tai vaihtelevasta partikkelikoosta, jolloin näytteiden homogenisointi olisi ratkaisu rinnakkaisnäytteiden suureen vaihteluun.

Lauri Jylänki



Kuvio 7: Rinnakkaisnäytteiden erotusten sijoittuminen eri luokkiin. Mitä pienempi luokan otsikko, sitä lähempänä rinnakkaisnäytteet ovat olleet toisiaan. sis. 47 Naistenlahden näytettä.

## 8.2 Muuntokertoimia

Tiiviyslaskelmat on tehty Naistenlahden 47 minun ottaman näytteen pohjalta. Laskelmissa oli tärkeää saada nimenomaan jokaisesta kuormasta kosteusprosentti, koska jokaisesta kuormasta on tiedossa massa ja irtokuutiot. Tein laskelmat kuitenkin myös toimituserien kosteusprosenttien mukaan ja keskimääräiset tulokset olivat lähes samat kuin tarkasti mitatuilla kosteuksilla. Laskelmat tein 41 kuorman mukaan, koska 6 kuormasta puuttui viralliset kosteustiedot.

Laskelmissa erityisen tärkeän osuuden muodostavat puulajiosuudet, sillä eri puulajeilla kuiva-tuoretiheydet vaihtelevat merkittävästi. Männyn kuiva-tuoretiheys karsitulla rangalla on  $390 \text{ kg/m}^3$ , kuusella  $400 \text{ kg/m}^3$  ja koivulla  $490 \text{ kg/m}^3$ . Terminaaliin tuodaan pyöreää puuta pinolle välittämättä siitä, mitä puulajia se edustaa. Tällöin on mahdotonta tietää, että mitä puulajia haketettu tavara edustaa. Yhdistyksessä tiedetään kuitenkin, että mitä puulajia keskimäärin on hakattu. Laskelmien perustana onkin se oletus, että koivua olisi hakkeesta puolet ja havupuuta toinen puolisko. Laskutoimituksesta tulee  $437,5 \text{ kg/m}^3$ , kun koivua on puolet ja havupuuta jakaantuu vielä tasan männyn ja kuusen kesken. Kahden kuorman osalta käytin kuitenkin pienempiä arvoja, koska näistä toinen oli kokonaan metsähaketta ja toinen puoliksi metsähaketta. Taulukon 7 mukaan muuntoluvuksi irtokuutioista

Lauri Jylänki

kiintokuutioiksi tulee 2,62 ja toisin päin kiintokuutioista irtokuutioiksi 0,38. Yleisesti puhutaan muuntoluvuista 2,5 ja 0,4. Yhdessä 150 irtokuution kuormassa 2,62:n ja 2,5:n ero tekee yli 2,5 kiintokuutiota.

Taulukosta 6 nähdään mitä kaikkia tietoja tarvitaan, että saadaan muuntoluku laskettua. Yksittäisten kuormien muuntoluvut eivät pidä paikkaansa, sillä ei tiedetä mitä puulajia ne sisältävät. Kun lasketaan, että kuormissa on keskimäärin puolet koivua, voidaan laskea keskimääräinen muuntoluku.

Taulukko 6: Muuntoluvun laskentaa. Irtokuutioiden muunto kiintokuutioihin muuntoluvun avulla.

Paino	Kosteus	Tuoretiheys		Kuiva-tuoretiheys			
		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	i-m <sup>3</sup>	k-m <sup>3</sup>	i-m <sup>3</sup> /k-m <sup>3</sup>	k-m <sup>3</sup> /i-m <sup>3</sup>
38040	32,1 %	645	437,5	150	59	2,54	0,39
37660	33,3 %	656	437,5	150	57	2,61	0,38
37400	33,8 %	661	437,5	150	57	2,65	0,38
41280	38,3 %	709	437,5	145	58	2,49	0,40
41420	38,4 %	710	437,5	150	58	2,57	0,39
38520	39,4 %	722	437,5	138	53	2,59	0,39
40820	39,5 %	723	437,5	145	56	2,57	0,39
41400	40,1 %	730	437,5	138	57	2,43	0,41
42300	40,9 %	740	437,5	145	57	2,54	0,39
41740	41,7 %	751	437,5	138	56	2,48	0,40
43840	43,3 %	771	437,5	145	57	2,55	0,39
43420	44,2 %	784	437,5	150	55	2,71	0,37
39560	45,0 %	795	437,5	135	50	2,71	0,37
42660	47,1 %	827	437,5	135	52	2,62	0,38
44880	50,1 %	876	437,5	135	51	2,64	0,38
41840	53,1 %	933	437,5	120	45	2,68	0,37
43620	55,0 %	973	437,5	120	45	2,68	0,37

Taulukon 7 tiedoista kosteuden ja tuoretiheyden maksimia edustaa ainoa metsähakekuorma, mitä laskelmissa on mukana ollut. Suurimmat kiintokuutiot muodostuivat 33 % kosteudella ja 39 800 kg painolla, kuljettajan arvioitua irtokuutioiksi 146. Pienimmät kiintokuutiot muodostuivat 56 % kosteudella ja 38 260 kg painolla, kuljettajan arvioitua irtokuutioiksi 120. Samalle kuormalle lankesi myös suurin muuntoluku 3,13 ja toisinpäin pienin muuntoluku 0,32. Pienimmät kuljettajan arvioimat irtokuutiot saatiin kuormasta, jonka kosteus oli 58,2 %. Tässä kuormassa oli puoliksi metsähaketta ja puoliksi rankahaketta.

Lauri Jylänki

Taulukko 7: Muuntoluvun laskennan tunnuslukuja.

				tuoretiheys			
	i-m <sup>3</sup>	Paino	Kosteus	kg/m <sup>3</sup>	k-m <sup>3</sup>	i-m <sup>3</sup> /k-m <sup>3</sup>	k-m <sup>3</sup> / i-m <sup>3</sup>
<b>Keskiarvo</b>	137	40994	44,0 %	789	53	2,62	0,38
<b>Minimi</b>	100	34080	32,1 %	645	38	2,38	0,32
<b>Maksimi</b>	150	46500	62,9 %	1025	61	3,13	0,42
<b>keskihajonta</b>	11	2426	7,0 %	98	6	0,17	0,02

Hakkeen tiiviuden lisäksi selvitin, että kuinka paljon energiaa analysoimissani kuormissa oli tilavuusyksikköä kohden. Aluksi laskin irtotiheyden MWh/i-m<sup>3</sup>. Taulukosta 8 nähdään, että 19 MJ/kg lämpöarvolla sain energiatiheydeksi 0,79 MWh/i-m<sup>3</sup>. Megawattitunnit kiintokuutiota kohden laskin aiemmin todetulla 2,62 kertoimella. Tulokseksi sain 2,07 MWh/k-m<sup>3</sup>. Kosteuden ja tehollisen lämpöarvon vaikutusta energiatiheyteen tarkastellaan taulukoissa 8 ja 9.

Taulukko 8: Tehollisen lämpöarvon vaikutus tutkimuksen keskimääräisiin tuloksiin. MWh/k-m<sup>3</sup> on laskettu 2,62 kertoimella. Laskelmassa kosteus oli 44 %, paino 40 994 kg ja tilavuus 137 i-m<sup>3</sup>.

Tehollinen MJ/kg	Toimitustilassa MJ/kg	MWh/kuorma	MWh/i-m <sup>3</sup>	MWh/k-m <sup>3</sup>	MWh/tonni
18,50	9,29	105,49	0,77	2,01	2,58
18,75	9,43	107,08	0,78	2,04	2,62
19,00	9,57	108,67	0,79	2,07	2,66
19,25	9,71	110,26	0,80	2,10	2,7
19,50	9,85	111,86	0,81	2,13	2,74

Taulukko 9: Kosteuden vaikutus energiatiheyteen. Taulukossa on käytetty Tammi – Maaliskuun maksuperusteisia tietoja. Sis. 226 rankahakekuormaa. Laskelmassa tehollinen lämpöarvo on 19 MJ/kg.

Kosteus %	Paino kg	Tilavuus i-m <sup>3</sup>	Toimitustilassa MJ/kg	MWh/kuorma	MWh/i-m <sup>3</sup>	MWh/k-m <sup>3</sup>	MWh/tonni
35,0	37418	140	11,49	119,4	0,85	2,24	3,2
40,0	40382	139	10,42	116,8	0,84	2,20	2,9
45,0	40661	139	9,35	105,7	0,76	2,00	2,6
50,0	41743	133	8,27	95,8	0,72	1,88	2,3

Lauri Jylänki

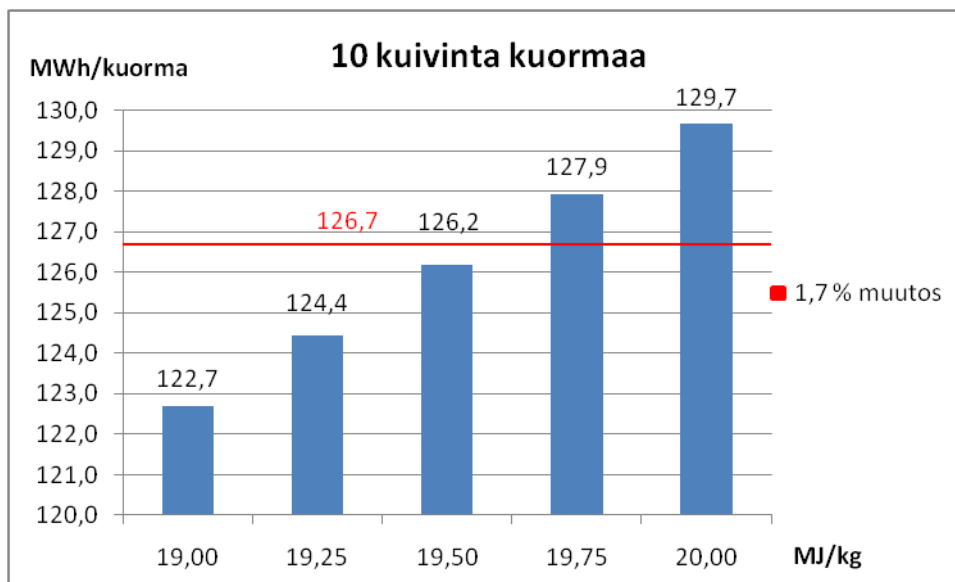
## 9 Johtopäätökset

Näytteenottotapojen vertailusta ilmenee, että kosteuksien keskiarvot menevät näinkin pienellä vertailumäärällä lähes samaan. Toimituserien tulokset vaihtelivat paljon, joten yksittäisten toimituserien kosteustuloksiin ei kannata luottaa. Toimitusmäärien ollessa yli 100 000 i-m<sup>3</sup> lämmityskaudessa, kannattaa luottaa enemmän keskiarvoihin kuin yksittäisten toimituserien tuloksiin. Tasaiset tulokset puoltavat sitä ajatusta, että näytteitä ei kannattaisi ottaa näin tarkasti. Saattaisi olla jopa riittävää, että näytteitä otettaisiin satunnaisotannalla, mikäli vain tiedettäisiin että toimitukset jatkuvat. Satunnaisotannat voitaisiin sitoa vaikka etukäteen arvioitaviin toimitusmääriin hakelajeittain ja vuodenaikaan. Automaattinen näytteenotto vaikutti yhden näytteen perusteella saavan totuudenmukaisen tuloksen. Näytteenottoon kaivataankin puolueettomuutta, että osataan huomioida mm. lumi hakkeen joukossa. Automaattisessa näytteenotossa on kuitenkin vielä kehitettävää. Se saattaa ottaa vahingossa näytettä vaikka väärästä kuormasta, mikäli tavara holvaa kuljettimella. Holvanneesta kuormasta tulee vääristynyt näyte ja seuraavaan kuormaan tulee edellisen kuorman tavaraa.

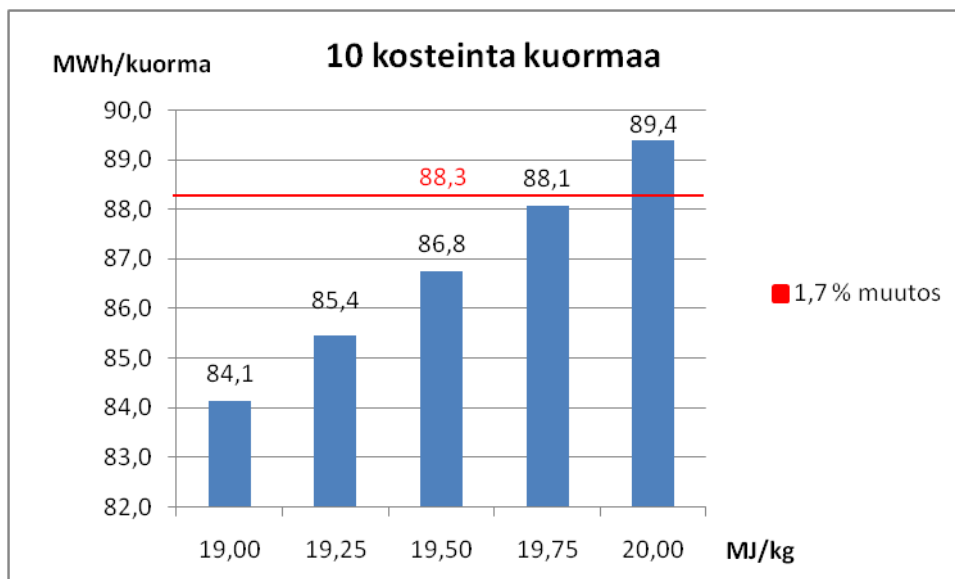
Naistenlahden automaattisessa näytteenotossa on hyvänä puolena se, että se samalla homogenisoi näytteen. Tällöin saadaan sekoitettua näyte kunnolla ja rinnakkaismääritysten väliset erot jäävät pienemmiksi. Tämä on aivan ehdotonta, mikäli halutaan tarkkuutta toimintaan kokonaisvaltaisesti. Jos lämpöarvon määrittämisessä käytetään 1 gramman pillerin punnituksessa 10<sup>-5</sup>g tarkkuutta, pitäisi myös kosteutta pystyä mittaamaan tarkemmin kuin keskimäärin 1,7 prosenttiyksikön tarkkuudella. Kuviosta 8 on nähtävissä, että tämä tarkkuus vastaa tehollisena lämpöarvona yli 0,5 MJ/kg 35,8 % kosteudessa. Kosteuden määrittämisessä tarkkuuden merkitys kasvaa sitä suuremmaksi, mitä kosteammasta tavarasta on kyse. Kuviosta 9 nähdään, että sama 1,7 prosenttiyksikön muutos 54,7 % kosteudessa vastaa jo yli 0,75 MJ/kg muutosta.



Lauri Jylänki



Kuvio 8: Mittaustarkkuuden vaikutus kuorman energiamäärään (MWh). 10 kuivimman kuorman keskiarvot (35,8 %). Punainen viiva kertoo 1,7 % kosteuden laskun vaikutuksen 19 MJ/kg lämpöarvossa. Laskelmissa on käytetty 47 Naistenlahden näytettä.



Kuvio 9: Mittaustarkkuuden vaikutus kuorman energiamäärään (MWh). 10 kosteimman kuorman keskiarvot (54,7 %). Laskelma on tehty kuten Kuviossa 5.

Mittausten tarkkuuteen keskittyvät standardit on tehty alun perin Naistenlahdessa turpeelle, jolla sisäiset kosteuden vaihtelut ovat vähäisempiä. Erot johtuvatkin pääosin suuresta vaihtelusta palakokojakaumassa. Varsinkin kantomurskeella palakokojakauma vaihtelee paljon ja palakoko on suurta. Tämän tutkimuksen pohjalta

Lauri Jylänki

voisin sanoa, että kantomurskeen kohdalla homogenisointi varmasti kannattaisi. Palakoon merkitystä olisi voinut tutkia paremmin seulomalla näytteistä hienojakoisen aineksen ja suuren palakoon omiksi rinnakkaisnäytteikseen. Tähän liittyen olisi voinut myös tutkia, että kuinka paljon kuivatusajalla on merkitystä. Oletuksena tähän, että hienojakoisesta tavarasta kosteus haihtuu nopeammin kuin karkeajakoisesta tavarasta.

Hakkeen tiiviys kuormassa oli tuloksien mukaan keskimäärin 2,62 irtokuutiota yhtä kiintokuutiota kohden. Toisinpäin 0,38 i-m<sup>3</sup>/k-m<sup>3</sup>. Alakankaan (2000, 65[Uusvaara & Verkasalo 1987] mukaan talvella haketetulla koivurangalla tiiviysluku on 0,44 kun haketetaan päältäpuhaltavalla rumpuhakkurilla. Vastaava luku mäntykokopuuhaikkeella on 0,49. Ero on siis pyöräkuormaajalla kuormatun ja rumpuhakkurilla täytetyn kuorman välillä merkittävä. Aiemmin tuloksissa mainitsin, että minun mittaamillani ja naistenlahdessa toimituserittäin mitatuilla muuntolukujen keskiarvoilla ei ollut suurta eroa. Niinpä laskin muuntoluvun myös tammi - maaliskuussa toimitettujen 226 rankahakekuorman mukaan, joiden kosteudet on mitattu toimituserittäin. Tulokseksi tuli 2,66 tai toisinpäin 0,38. Tämän tutkimuksen johtopäätöksenä käyttäisin talvella haketetulla ja kuormatulla rankahakeella muuntolukua 0,38, ja toisinpäin tarkasti mitattua arvoa 2,62. Energiatiheyttä varten voisi käyttää lukua 0,79 MWh/i-m<sup>3</sup>, tehollisen lämpöarvon ollessa 19 MJ/kg. Vastaavasti kiintokuutioista puhuttaessa 2,07 MWh/k-m<sup>3</sup>. Energiatiheyden muuntolukua kannattaa käyttää vain kun kuormatietoja ei sillä hetkellä ole saatavilla, koska kuormatiedoista sen saa laskettua tietämättä puulajia. Muuntolukuja käytettäessä on syytä myös muistaa, että tulokset pätevät talvella tehtyihin mittauksiin ja saattavat olla kesällä epätarkkoja.

Taulukko 10: Muuntoluvun vaikutus kiintokuutioiden määrään. Muuntoluku 0,38 vastaa tämän tutkimuksen tulosta ja 0,44 rumpuhakkurilla tehdyn koivurankahakkeen muuntolukua.

Kuorma	Paino	Kosteus	tuoretiheys		i-m <sup>3</sup>	Muuntoluku	k-m <sup>3</sup>
			kuiva	tuoretiheys			
			kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>			
1	42660	47,1 %	827	437,5	135	0,38	51
2	42660	47,1 %	827	437,5	135	0,44	59

Hakeyrittäjälle maksetaan tehdyistä hakekuutioista ja hinnoittelussa on syytä ottaa huomioon millä lailla hake on tehty. Tienvarsihaketuksessa, jossa haketetaan suoraan

Lauri Jylänki

rekan kyytiin, joudutaan tekemään enemmän yhtä hakekuutiota kohden, koska tavara menee tällöin tiiviimpään. Metsähakkeella kannattaisikin tapauskohtaisesti laskea muuntoluvut, koska tällöin tiedetään haketettava puulaji. Kokopuurankahakkeesta saadaan leimikon tiedoista alustavasti tietää, mitkä ovat puulajien osuudet. Tietojen todenperäisyys kuitenkin vaihtelee ja puulajiosuuksien arviointi on syytä tehdä vielä varastopaikalla. Terminaalissa haketetusta tavarasta on jälkikäteen vaikea todeta mitä puutavaralajia se on ollut.

Hakkeen kuljetuksessa tonnit eivät tule täyteen kuljetettaessa kuivinta tavaraa, mutta tällöin saadaan kuormatilan tilavuus hyödynnettyä täysin. Puun kuivatuksella on siis toimittajan kannalta kaksi hyvää puolta. Kuivalla tavaralla on parempi hinta ja sitä saa kuljetettua enemmän kerralla kuin märkää tavaraa. Esimerkiksi 60 % kosteudessa kuormia tarvitsee kuljettaa lähes kaksinkertainen määrä 30 % kosteuteen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että ensinnäkin märkä tavara painaa niin paljon että rekalla ei saa vietyä täyttä kuormaa lain puitteissa. Toinen syy on se, että kosteassa tavarassa energiaa menee kosteuden haihduttamiseen. Tilavuudeltaan vajaissa kuormissa saattaa piillä myös virhemarginaalin vaara. Kun kuorma on vajaa, niin kuljettajan on vaikeampi arvioida tilavuus, kuin kuormasta joka on kukkurallaan haketta.

Puun kuivatus kannattaa tehdä mahdollisimman pitkään pyöreänä puuna. Lumisena talvena kannattaa hakettaa vähän kerrallaan. Kuitenkin niin, että se on hakeyrittäjälle taloudellisesti kannattavaa. Tutkimuksen näytteiden keruuvaiheessa oli havaittavissa, että hakeumassa oli lunta monessa kerroksessa. Pyöreän puun päällä lumi ei haittaa niin paljon, koska haketettaessa suurin osa siitä tippuu maahan, eikä päädy hakeumaan.

Tulevaisuudessa pitää terminaalihakkeen muuntoluku irtokuutioista kiintokuutioiksi laskea tarkemmin. Muuntoluvun laskemista varten täytyy tietää mitä puulajia on kuormiin laitettu. Terminaalissa eri puulajit laitetaan eri pinoihin, etteivät ne mene sekaisin keskenään. Ensisijaisesti ainakin niin, että havupuut ja koivu tulevat erilleen toisistaan. Tämän jälkeen tiedetään mitä haketetaan ja tuloksissa voidaan käyttää puulajikohtaisia tuore-tiheyspainoja. Tuloksien avulla tiedetään puulajikohtaiset muuntoluvut irtokuutioista kiintokuutioiksi.

## Lähteet

Alakangas, Eija 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT.

Espoo: Otamedia Oy. [online] [viitattu 28.3.2010].

([www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf)).

Alakangas, Eija; Asikainen, Antti; Gumse, Seppo-Ilmari; Hakkila, Pentti; Hämäläinen Ilkka ym. 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Bioenergia-lehti. Polttoaineiden hintataso. Huhtikuu 2009. [online] [viitattu 3.5.2010]

[www.puuenergia.fi/bioenergia-lehti/files/hinnat4\\_09.pdf](http://www.puuenergia.fi/bioenergia-lehti/files/hinnat4_09.pdf)

Hakkila, P & Heiskanen, V 1978. Puun ja puutavaran ominaisuuksia. Tapion taskukirja. 18 painos. Jyväskylä. Keskusmetsälautakunta Tapio. S. 448–459.

Hakkila, P., Metsähakkeen tuotantoteknologia, Puuenergian teknologiaohjelma 1999 – 2003, loppuraportti, Teknologiaraportteja 5/2004. Helsinki 2004. s. 135  
([www.tekes.fi/ohjelmat/puuenergia](http://www.tekes.fi/ohjelmat/puuenergia)).

Holopainen, Martti & Pulkkinen Pekka 2002. Tilastolliset menetelmät. Werner Söderström Osakeyhtiö. Helsinki. ISBN 951-0-25571-8.

Hujo, Samuli & Lindblad, Jari 2006. Puukauppa. Hämeenlinna: Paino Karisto Oy.  
Metsäkustannus Oy

Kauppila, Raimo, energianeuvoja, Mhy Kyrösjärvi. Puhelinkeskustelu 7.8.2010.

Kemera-opas 9.11.2009. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja metsäkeskus Pirkanmaa 2002-2008. [online] [viitattu 29.3.2010]

([www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/pdf/amm\\_kemeraj.pdf](http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/pdf/amm_kemeraj.pdf))

Koistinen, Arto; Lindblad, Jari & Äijälä, Olli 2008. Energiapuun mittaust.

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja Metsäntutkimuslaitos. URN:ISBN:978-952-5694-28-4 [online] [viitattu 29.3.2010]

Lauri Jylänki

([www.metla.fi/metinfo/tietopakettit/mittaus/aineistoja/energiapuun-mittausopas-2008.pdf](http://www.metla.fi/metinfo/tietopakettit/mittaus/aineistoja/energiapuun-mittausopas-2008.pdf))

Kuitto, Pekka-Juhani 2005. Metsästä polttoaineeksi. FINBIO - Suomen Bioenergiayhdistys ry. ER-Paino Oy.

Kärhä, Kalle 2008. Metsähakkeen tuotantoprosessikuvaukset. Metsätehon tuloskalvosarja 3/2008. 24.4.2008. [online] [viitattu 29.3.2010]  
[www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja\\_2008\\_03\\_Metsahakkeen\\_tuotantoprosessi\\_kk.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2008_03_Metsahakkeen_tuotantoprosessi_kk.pdf)

Lauhanen, Risto; Lepistö, Tanja & Viirimäki, Juha 2010. Laatuhakkeen tuotanto-opas. Metsäkeskukset. Sastamala: Vammaspaino. ISBN 978-951-98723-5-3 (nid.) ISBN 978-951-98723-6-0 (PDF). [online] [viitattu 29.3.2010]  
([www.puulakeus.net/docs/109-FsT-laatuohje.pdf](http://www.puulakeus.net/docs/109-FsT-laatuohje.pdf))

Mhy Kyrösjärvi [www-sivu]. [viitattu 8.4.2010]. Saatavissa: [www.mhy.fi/kyrosjarvi](http://www.mhy.fi/kyrosjarvi)

Nurmi, J 1993. Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan lämpöarvo. Helsinki. Acta Forestalia Fennica 236. 30 s.

Puupolttoaineiden laatuohje: FINBION julkaisu nro 5/1998

Tampereen Sähkölaitos yhtiöt. Vuosi 2009. Vuosiraportti. Kirjapaino: Hermes Oy  
Maaliskuu 2010. [online] [viitattu 29.3.2010]  
[www.tampereensahkolaitos.fi/NR/rdonlyres/F4E55714-E546-4AB6-9A84-7BFE4D5DBEB6/0/Sahkolaitos\\_vuosiraportti09\\_netti.pdf](http://www.tampereensahkolaitos.fi/NR/rdonlyres/F4E55714-E546-4AB6-9A84-7BFE4D5DBEB6/0/Sahkolaitos_vuosiraportti09_netti.pdf)

Uusvaara, O & Verkasalo, E 1987. Metsähakkeen tiiviys ja muita teknisiä ominaisuuksia. Folia Forestalia 683. Helsinki, Metsäntutkimuslaitos. 53 s. ISBN 951-40-0775-1.

Vapo Oy 2004, Fakta paikallisista polttoaineista. Zeniitti/ER-Paino 2004. [online] [viitattu 26.3.2010]. ([www.vapo.fi/filebank/1622-vapo\\_vtt\\_09\\_2004\\_fin.pdf](http://www.vapo.fi/filebank/1622-vapo_vtt_09_2004_fin.pdf)).

Lauri Jylänki

## Liitteet

## Liite 1: Puuraaka-aineiden ominaisuuksia

$m^3$  = kiintokuutiometri. Yksi kiintokuutiometri vastaa noin 2,5 irtokuutiometriä haketta (yleinen vaihteluväli 2,2 – 2,6). Tutkimuksessa käytetty myös muodossa  $k\text{-}m^3$ .  
 $i\text{-}m^3$  = irtokuutiometri. Yksi irtokuutiometri haketta on noin 0,4 kiintokuutiometriä (yleinen vaihteluväli 0,38 – 0,46).

(Alakangas Eija, Asikainen Antti & Gumse Seppo-Ilmari ym. 2003, 9.)

Rankahakkeen ominaisuuksia:

Tyypikosteus, p- % (tuore)	40 – 50 (ilmakuiva)
	25 – 30 (ylivuotinen)

Tehollinen lämpöarvo

kuiva-aineessa, MJ/kg	18,5 – 20
-----------------------	-----------

Tehollinen lämpöarvo

saapumistilassa, MJ/kg	7 – 11
------------------------	--------

Irtotiheys saapumistilassa, $kg/i\text{-}m^3$	250 – 350
---	-----------

Energiatiheys, MWh/ $i\text{-}m^3$	0,7 – 0,9
------------------------------------	-----------

Vetyptoisuus kuiva-aineessa (H), %	5,4 – 6
------------------------------------	---------

(Kuitto 2005, 300.)

Rankahakkeen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) kuiva-aineessa puulajeittain:

Mänty	19,33
-------	-------

Kuusi	19,02
-------	-------

Hieskoivu	19,19
-----------	-------

Rauduskoivu	19,15
-------------	-------

Tervaleppä	19,31
------------	-------

Harmaaleppä	19,00
-------------	-------

Haapa	18,65
-------	-------

(Alakangas 2000, 61[Nurmi 1993].)

Kuorellisen pinopuun keskimääräisiä kuiva-tuoretiheyksiä ( $kg/m^3$ ):

Mänty	390
-------	-----

Kuusi	400
-------	-----

Koivu	490
-------	-----

Leppä	360
-------	-----

(Alakangas 2000, 45[Hakkila 1978].)