
METSÄHAKKEEN ENERGIASISÄLTÖ JA SIIHEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tuottavuusvertailu kuljetusyrittäjittäin



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Metsätalouden koulutusohjelma

Evo, 9.1.2012

Matti Pohjoispää

EVO
Metsätalouden koulutusohjelma

Tekijä	Matti Pohjoispää	Vuosi 2012
Työn nimi	Metsähakkeen energiasisältö ja siihen vaikuttavat tekijät – tuottavuusvertailu kuljetusyrittäjittäin	

TIIVISTELMÄ

Työn toimeksiantaja L&T Biowatti Oy, on Suomen johtava valtakunnallinen energia- ja metsäsektorin palveluyritys. Uusiutuvan energian käyttö on Suomessa lisääntynyt viime vuosien aikana merkittävästi. Kilpailu bioenergiamarkkinoilla on kiristynyt, joten energiapuuhankinnan joka vaihetta tulee kyetä tarkastelemaan kriittisesti ja etsiä uusia kehityskohteita.

Tämä opinnäytetyö pureutui energiapuun hankinnan logistisen ketjun loppupäähän eli metsähakkeen autokuljetukseen. Tutkimuksessa vertailtiin neljän kuljetusyrittäjän kuormakohtaista tuottavuutta. Eroihin sekä niiden syihin pyrittiin löytämään vastauksia perehtymällä energiapuun hankinnan vaiheisiin korjuusta vastaanottoon lämpö- ja voimalaitoksella.

Tutkimusaineisto on koottu L&T Biowatti Oy:n tietojärjestelmästä. Se sisältää neljän kuljetusyrittäjän yhden lämmityskauden aikana toimittamat hakekuormat neljään lämpö- ja voimalaitokseen. Tutkimus toteutettiin laskeamalla yrittäjittäin keskilukuja energiasisältöön liittyvistä muuttujista sekä vertailemalla niitä. Tärkeimmän tuloksen tilastollinen merkitsevyys todettiin keskiarvotestillä.

Metsähakkeen energiasisältöön vaikuttaa hyvin moni asia. Suurin vaikutus on hakkeen sisältämällä kosteudella. Pyrkimys mahdollisimman kuivaan ja puhtaaseen hakkeeseen energiapuun hankinnan joka vaiheessa, on tärkein energiasisältöön positiivisesti vaikuttava asia.

Kuormakohtaisissa tuottavuuksissa ja kuljetuskapasiteetin hyödyntämisissä löydettiin eroja yrittäjittäin. Yhden yrittäjän osalta syytä heikolle tuottavuudelle ei löydetty. Jatkossa tulee selvittää, onko kuljetusten ohjauksessa tai yrittäjän toiminnassa jotain sellaista, jota muuttamalla tuottavuutta saataisiin parannettua.

Avainsanat Energiasisältö, metsähake, kuljetusyrittäjä, tuottavuusvertailu

Sivut 46 s.

Evo
Degree Programme in Forestry

Author

Matti Pohjoispää

Year 2012

Subject of Bachelor's thesis

The Energy Content of Forest Processed Chips and the Elements Affecting It – Productivity Comparison of Transport Entrepreneurs

ABSTRACT

This Bachelor's thesis is commissioned by L&T Biowatti Ltd which is the leading service company in the field of energy and forestry in Finland. The use of renewable energy sources in Finland has substantially increased in the past years. Competition on the bio-energy market has become tighter, so every stage of procuring energy wood must be considered critically seeking targets for development.

This Bachelor's thesis focused at the final stage of procuring energy wood which is the truck transportation of forest processed chips. The aim of this survey was to compare productivity by loads of four transport entrepreneurs. This thesis aimed at finding answers to differences between entrepreneurs by examining the stages of procuring energy wood from harvesting to reception at a heating and power plant.

The research data was put together from L&T Biowatti Ltd's information system. The data includes woodchip loads from deliveries of four transport entrepreneurs to four heat and power plants within one heating season. This research was executed by counting averages by entrepreneur from variables related to energy content and by comparing them. The statistical significance of the most important research result was verified with a t-test.

There are many elements that affect the energy content of forest processed chips. The amount of moisture in forest processed chips has the major effect on the energy content. The intention to produce as dry and clean chips as possible in every stage of procuring energy wood is the most important factor that positively affects the energy content.

Differences between entrepreneurs were found when comparing productivity by loads. Differences were also discovered in how well entrepreneurs make the most of their transport capacity. As for one entrepreneur, there was no explanation to weak productivity. In future it should be clarified if there is something to amend in the logistics or in the actions of this entrepreneur to improve the productivity.

Keywords Energy content, forest processed chips, productivity comparison
Pages 46 p.



SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	ENERGIAPUU.....	2
2.1	Metsähakkeen käyttö.....	2
2.2	Energiapuun logistinen ketju.....	4
2.2.1	Korjuu.....	4
2.2.2	Varastointi.....	7
2.2.3	Haketus.....	9
2.2.4	Kaukokuljetus.....	12
2.2.5	Vastaanotto.....	14
3	METSÄHAKE.....	17
3.1	Ominaisuudet.....	17
3.2	Lämpöarvo.....	18
3.3	Näytteenotto ja kosteuden määrittäminen.....	21
4	AINEISTO JA MENETELMÄT.....	23
4.1	Tutkimusaineisto.....	23
4.2	Kuljetuskalusto.....	23
4.3	Tutkimusmenetelmät.....	25
4.3.1	Tutkimuksessa käytetyt laskentakaavat.....	27
5	TULOKSET.....	28
5.1	Tuotteet ja kosteusprosentti tuotteittain.....	28
5.2	Kosteusprosentti.....	32
5.3	Paino tonneissa.....	33
5.4	Tilavuus irtokuutiometreissä.....	34
5.5	Energiasisältö.....	34
5.5.1	MWh/ kuorma.....	34
5.5.2	MWh/ irtokuutiometri.....	35
5.5.3	MWh/ tonni.....	36
5.6	Keskiarvojen testaus.....	37
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	40
7	TULOSTEN TARKASTELU.....	43
	LÄHTEET.....	45



1 JOHDANTO

Työn tilaaja L&T Biowatti Oy on vuonna 1994 perustettu Suomen johtava valtakunnallinen energia- ja metsäsektorin palveluyritys. Henkilöstöä L&T Biowatti Oy työllistää noin 100 ja lisäksi sillä on yli 200 yhteistyöyrittäjän verkosto. Liikevaihto on suuruudeltaan noin 55 miljoonaa euroa ja vuotuiset energiatoimitukset noin 3,5 TWh. Vuodesta 2007 alkaen L&T Biowatti Oy on ollut Lassila & Tikanojan tytäryhtiö. (L&T Biowatti Oy 2011.)

Vertailemalla eri kuljetusyrittäjien toimittamia energiamääriä keskenään päästiin kiinni yrittäjien tuottavuuteen. Vertailu herätti kysymyksen siitä, miksi toinen kuljetusyrittäjä ajaa enemmän energiaa hakekuormaa kohden kuin toinen yrittäjä? Erot ovat osittain selitettävissä kuljetuskaluston asettamilla rajoituksilla, mutta nekään eivät kaikkia eroja selittäneet.

Metsähakkeen autokuljetuksesta aiheutuvat kustannukset vaikuttavat suoraan puunhankinnan kokonaiskustannuksiin ja puustamaksukykyyn. Toiminnan tehostaminen ja seuranta on siis tässäkin työvaiheessa järkevää niin metsänomistajan, kuljetusyrittäjän, voimalaitosasiakkaan kuin hakekeentoimittajan kannalta.

Hakkeen kuljetuksessa käytettävien hakeautojen ominaisuudet vaihtelevat yrittäjittäin. Eroja on kuormatilavuuksissa ja kantavuuksissa. Kuljetuskalustosta riippumatta on kuitenkin jokaisen yrittäjän aina tärkeintä hyödyntää käytettävissä oleva kuljetuskapasiteetti mahdollisimman hyvin.

Pyrkimys mahdollisimman kuivaan ja puhtaaseen metsähakkeeseen logistisen ketjun joka vaiheessa on tärkein lopputuotteen energiasisältöön vaikuttava tekijä. Selvittämällä kuljetusyrittäjien tuottavuutta ja löytämällä keinoja sen parantamiseen pystytään kuormakohtainen energiasisältö kuitenkin aina maksimoimaan riippumatta metsähakkeen laatuominaisuuksista.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää L&T Biowatti Oy:n lämpö- ja voimalaitoksille toimittamien hakekuormien energiasisältöjä ja niiden vaihtelua kuljetusyrittäjittäin. Eroihin, niiden syihin sekä keinoihin parantaa kuormakohtaisia energiamääriä, pyrittiin löytämään vastauksia perehtymällä energiapuun logistiseen ketjuun.

2 ENERGIAPUU

Energiapuulla tarkoitetaan energiakäyttöön menevää puuta tai puutavaraa, jonka alkuperäinen puunkoostumus on säilynyt. Energiapuun eri muotoja ovat hake, kantomurske, pelletti, briketti sekä pilke. Tässä luvussa ja koko tutkimuksessa keskitytään energiapuuhun hakkeen (= metsähakkeen) osalta, sillä siitä koko tutkimusaineistokin koostuu. Metsähakkeen raaka-aineita ovat karsittu ranka, kokopuu, energiakäyttöön ohjattu kuitupuu, hakkuutähteet, kannot, juurakot ja järeä runkopuu. Metsähaketta saadaan nuoren metsän hoitokohteilta, muilta harvennuskohteilta sekä uudistusaloilta. (metsavastaa.net 2010; puulakeus.net 2006; Ylitalo 2011.)

Tässä tutkimuksessa olevan aineiston energiapuu on hakkuutähteestä eli metsätähteestä, kokopuusta tai runkopuusta tuotettua metsähaketta.

2.1 Metsähakkeen käyttö

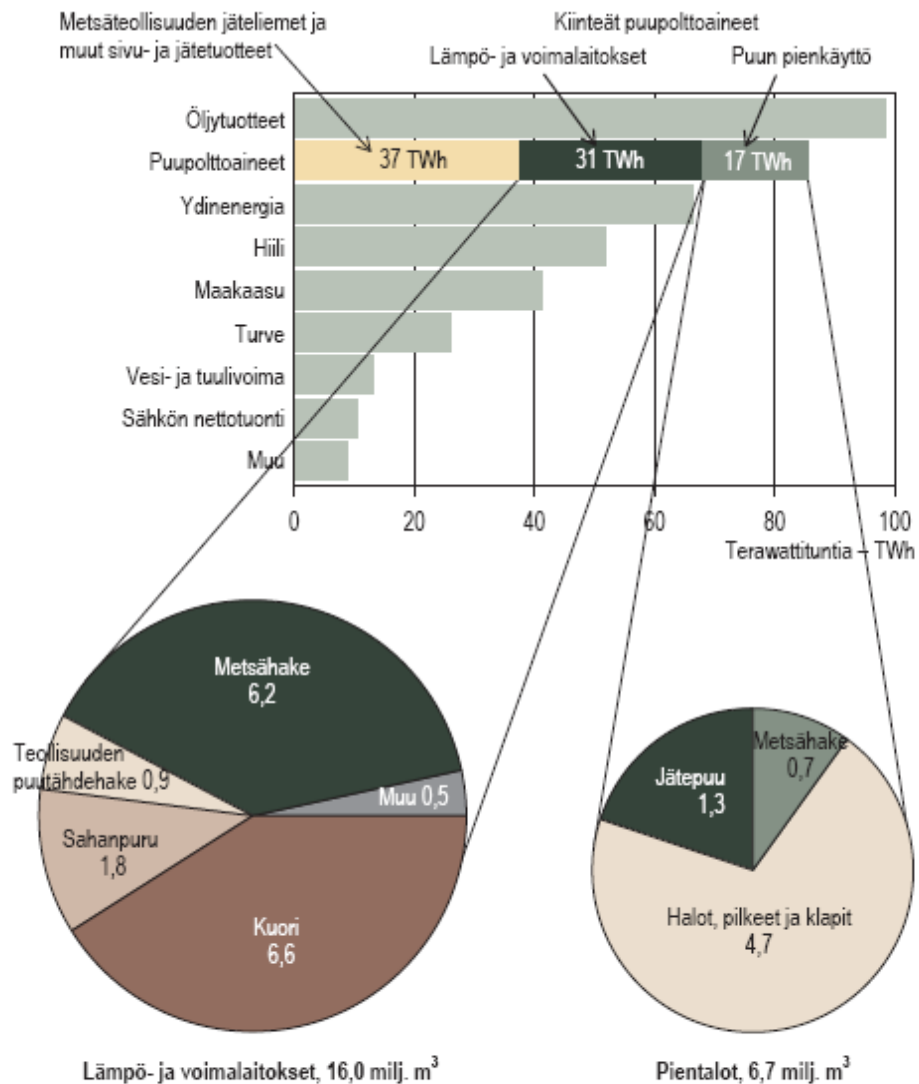
Vuonna 2010 karsitun rangan, kokopuun ja kuitupuun lämpö- ja voimalaitosten käyttö metsähakkeen raaka-aineena oli 2,5 miljoonaa kuutiometriä. Hakkuutähteitä käytettiin 2,2 miljoonaa kuutiometriä sekä kantoja ja juurakoita miljoona kuutiometriä. Järeää runkopuuta käytettiin 0,5 miljoonaa kuutiometriä. Vuonna 2010 lämpö- ja voimalaitokset käyttivät metsähaketta yhteensä 6,2 miljoonaa kuutiometriä, joka on 15 % enemmän kuin vuonna 2009. Osatekijöinä kasvuun olivat metsäteollisuuden tuotannon elpyminen sekä pakkastalven lisäämä rakennusten lämmitystarve. (Ylitalo 2011.)

Metsähaketta käytetään lämpö- ja voimalaitosten lisäksi lämmitykseen myös pientaloissa, pääasiassa maataloilla. Lämmityskauteen 2007–2008 kohdistuneen polttopuun käyttötutkimuksen mukaan pientaloissa poltetaan metsähaketta 0,7 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Näin ollen metsähakkeen kokonaiskäyttö ylsi vuonna 2010 Suomessa kaiken kaikkiaan 6,9 miljoonaan kuutiometriin. (Ylitalo 2011.)

Kansallisessa metsäohjelmassa 2010 metsähakkeelle oli asetettu tavoitteeksi 5 miljoonan kuutiometrin vuotuinen käyttö vuoteen 2010 mennessä. Tämä tavoite ylitettiin selvästi. Kansallisessa metsäohjelmassa 2015 vuotuinen käyttötavoite metsähakkeelle on vuoteen 2015 mennessä 8–12 miljoonaa kuutiometriä. Hallituksen ilmasto- ja energiapolitiikan ministerityöryhmän julkaisemassa uusiutuvan energian velvoitepaketissa tavoitteena on vuoteen 2020 mennessä nostaa metsähakkeen lämpö- ja voimalaitoskäyttö 12–13 miljoonaan kuutiometriin vuodessa. (Ylitalo 2011.)

Tilastokeskuksen ennakkotietojen mukaan energian kokonaiskulutus Suomessa oli vuonna 2010 yhteensä 401 TWh, joka on 9 % enemmän kuin vuonna 2009. Yksittäisistä energialähteistä määrällisesti eniten lisääntyivät puupolttoaineiden ja kivihiilen kulutus. Sen sijaan ydinenergian käyttö ja sähkön nettotuonti supistuivat. (Ylitalo 2011.)

Kuten kuvasta 1 nähdään, käytettiin vuonna 2010 puuperäisiä polttoaineita yhteensä 85 TWh, joka on viidennes energian kokonaiskulutuksesta. Edellisvuoteen verrattuna puuperäisten polttoaineiden kulutus kasvoi 15 %. Kiinteitä puupolttoaineita käytettiin 48 TWh ja metsäteollisuuden jäteliemiä 36 TWh. Kiinteistä puupolttoaineista kului lämpö- ja voimalaitoksissa 31 TWh, joka vastaa 16 miljoonaa kuutiometriä puuta sekä pientaloissa 17 TWh, joka vastaa 6,7 miljoonaa kuutiometriä puuta. Puupolttoaineet ovat toiseksi merkittävin energialähde Suomessa öljytuotteiden jälkeen. (Ylitalo 2011.)



Energian kokonaiskulutus Suomessa vuonna 2010 oli 401 TWh (ennakkotieto huhtikuu 2011).
 Öljytuotteet kattavat myös liikenteen käyttämät polttoaineet.

Lähteet: SVT: Tilastokeskus; SVT: Metsäntutkimuslaitos

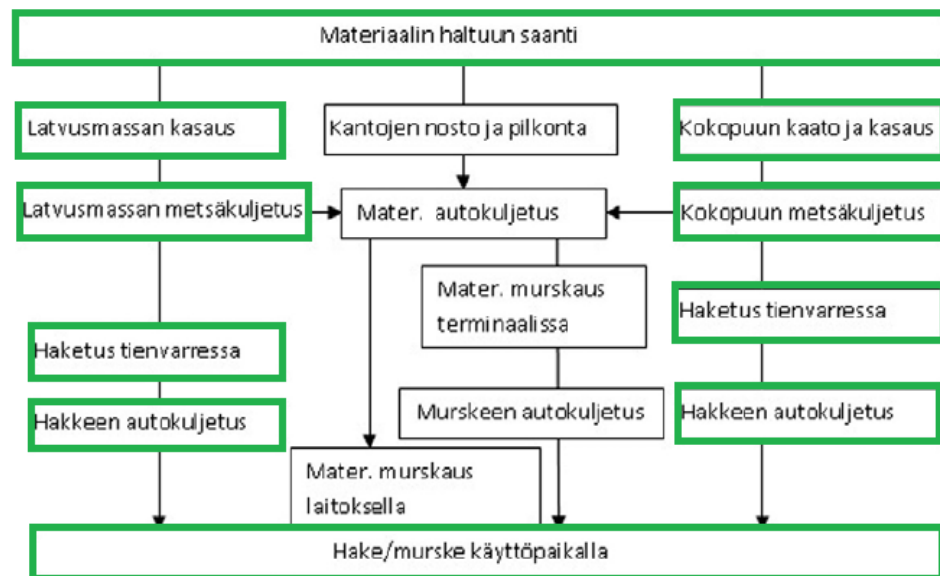
Kuva 1. Energian kulutus Suomessa energialähteittäin 2010 (Ylitalo 2011)

2.2 Energiapuun logistinen ketju

Seuraavissa luvuissa käydään läpi energiapuun logistiikka korjuun, välivarastoinnin, haketuksen, kaukokuljetuksen ja vastaanoton osalta. Jokainen luku on jo itsessään laaja kokonaisuus. Tähän työhön on pyritty keräämään kustakin aiheesta ensisijaisesti sellaista tietoa, jolla on vaikutusta metsähakkeen energiasisältöön tai laatuun joko suoraan tai välillisesti. Kuvassa 2 on havainnollistettu energiapuun hankinnan vaiheiden ketjutumista. Tässä tutkimuksessa mukana olevat toimitusketjut on kuviossa merkitty vihreällä värillä.

Biopolttoaineiden logistiikka ei pääosiensa suhteen eroa muiden tavaroiden logistiikasta. Metsähakkeen logistiikkaan kuuluu useita eri osa-alueita kuten varastointia, kuljetusta, eräkoon määrittämistä, varastotiloja, vaihtomaisuuden hallintaa sekä kysynnän hallintaa. Logistiikka tutkii edellä olevien tehtävien fyysistä toteutusta ja niistä aiheutuvia kustannuksia. (Lähdevaara, Savolainen, Paananen & Vanhala 2010.)

Lopputuotteen eli metsähakkeen laatu on otettava huomioon logistisen ketjun kaikissa vaiheissa alusta lähtien, sillä laitospäässä vaikutusmahdollisuudet ovat enää vähäiset. (Hakkila 2004.)



Kuva 2. Metsähakkeen toimitusketjun erilaisia toteutusvaihtoehtoja. Tässä tutkimuksessa mukana olevat toimitusketjut on merkitty vihreällä värillä. (Lähdevaara ym. 2010.)

2.2.1 Korjuu

Metsähakkeeksi tuotettavaa energiapuuta korjataan pääasiassa nuoren metsän hoitokohteilta, muilta harvennuskohteilta sekä uudistusaloilta. Harvennuskohteilta korjataan energiapuuta yleensä karsittuna rankana tai kokopuuna. Tällöin puhutaan pienpuuhakkeesta. Latvus- ja oksamassaa eli hakkuutähdettä korjataan pääasiassa kuusi- mänty- tai koivuvaltaisiin leimikoihin kohdistuvista pätehakkuista. Erityisesti kuusikoiden pätehak-

kuista voidaan myös kannot korjata talteen energiaksi. Myös männyn päätehakkuualoilta on kannonnosto mahdollista. (Lepistö & Viirimäki 2010; Hakkila 2004.)

Järeää runkopuuta käytetään hakkeen raaka-aineena silloin, kun se ei kelpaa teollisuudelle lahovikaisuuden, liiallisen mutkaisuuden, lenkouden tai haaraisuuden vuoksi. Energiapuuta on korjattavissa myös pellon-, tien-, ja ojanvarsilta, joissa hakkuukertymä voi olla suuri ja korjuukustannukset metsikköharvennusta alhaisemmat. (Lepistö ym. 2010; Lähdevaara ym. 2010.)

Hakkuutähdehaketta saadaan päätehakkuukuusikoista nyrkkisäännön mukaan noin 0,6 irtokuutiometriä ainespuukertymän kiintokuutiometriä kohti. Irtokuutiometri vastaa 0,4 kiintokuutiometriä. Hakkuutähteiden korjuu ainespuuleimikon päätehakkuun jäljiltä on mahdollista, mikäli hakkuutähteet ovat kasoille puitu eikä niiden yli ole ajettu. Hakkuutähteestä latvussmassaa eli oksia neulasineen on 80–90 prosenttia, ja loppu on hukkarunkopuuta. Kasvupaikan tuotoskyvyn säilyttämiseksi, keruutyön tuottavuuden nostamiseksi ja hakkeen puhtauden varmistamiseksi ei kaikkia hakkuutähteitä kuitenkaan oteta talteen. Tapion hyvän metsänhoidon suositusten mukaisesti 30 prosenttia hakkuutähteestä on hyvä jättää keräämättä. (Hakkila 2004; Knuutila 2003, 64.)

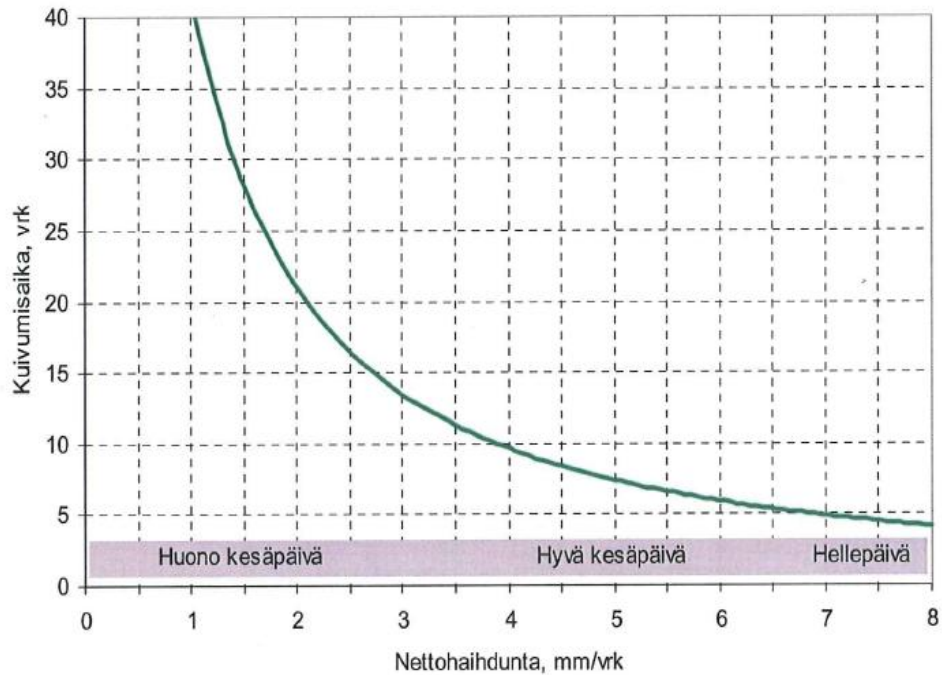
Hakkuutähteiden tulisi mahdollisuuksien mukaan antaa kuivahtaa palstalla kasoissa ennen metsäkuljetusta. Vuodenajasta riippuen on tuoreen hakkuutähteen kosteus noin 50–60 prosenttia. Sääolosuhteista riippuen jo 1–3 viikon palstakuivatus laskee hakkuutähteen kosteuden alle neljäänkymmenen prosenttiin. Lisäksi niiden neulas- ja klooripitoisuus alenee tässä ajassa noin puoleen. (Hillebrand 2009.)

Palstakasoissa olevat hakkuutähteet kuivuvat suuremman pinta-alansa ja harvan sijoittumisensa takia välivarastossa olevia hakkuutähteitä nopeammin. Metsäkuljetus välivarastopinoon tulee kuitenkin tehdä hyvissä ajoissa ennen syyssateita. Maan ravinnetasapainon säilyttämisen ohella hakkuutähteiden palstakuivatuksella lievennetään lämpö- ja voimalaitosten polttokattiloiden tuhka- ja korroosio-ongelmia. Kesällä kuivissa olosuhteissa neulas- ja klooripitoisuus alkavat varista jo pian hakkuun jälkeen. Alle kuukauden kuluessa hakkuusta on suurin osa neulasista varissut maahan. (Hillebrand 2009; Knuutila 2003, 77.)

Kuvassa 3 on havainnollistettu palstalla kuivumassa olleiden hakkuutähteiden kuivumisaikaa vuorokautisen nettohaihdunnan funktiona. Funktiossa haihdunnan ja sateen erotus on asetettu siten, että 50 prosenttia sadevedestä on oletettu imeytyvän hakkuutähteisiin. Vuorokautisen nettohaihdunnan ollessa esimerkiksi 5 millimetriä, kuivuvat hakkuutähteet 35 prosentin kosteuteen noin viikossa. Mikäli nettohaihdunta on 1,5 millimetriä vuorokaudessa, kestää hakkuutähteiden kuivuminen 35 prosentin kosteuteen noin kuukauden. (Hillebrand 2009.)

Tyypillisenä poutaisena kesäpäivänä vuorokautinen haihdunta on 4–6 millimetriä ja hellepäivinä 8–9 millimetriä vuorokaudessa. Viileinä ja pilvisi-

nä päivinä haihdunta on 1–3 millimetriä vuorokaudessa. (Hillebrand 2009.)



Kuva 3. Palstalla kuivumassa olleiden hakkuutähteiden kuivumisaika vuorokautisen nettohaidunnan funktiona. (Hillebrand 2009.)

Tavallinen puutavarakoura ei sovellu hakkuutähteen kuormaukseen, sillä se nostaa hakkuutähteen mukana helposti maa-ainesta. Parhaaksi kouramalliksi on todettu ns. sormityyppinen hakkuutähtekoura. Hakkuutähtekouran mukana ei nouse helposti epäpuhtauksia, ja se uppoaa kasaan paremmin kuin puutavarakoura. Kouraisutaakkojen koko on hakkuutähtekouralla lähes 45 prosenttia suurempi, minkä vuoksi myös kuormista tulee tiiviimpiä. Tämä parantaa metsäkuljetuksen tuottavuutta 15–25 prosenttia ajomatkasta riippuen. (Knuutila 2003, 64.)

Energiapuun talteenotto nuorista metsistä edistää niiden kunnostushakkuuta ja vaikuttaa positiivisesti metsien tulevaan tuottoon. Harvennuskohdeilla korjuu voidaan toteuttaa niin, että kaikki puut ohjautuvat energiantuotantoon, tai korjuussa erotellaan aines- ja energiapuu. Jälkimmäistä vaihtoehtoa kutsutaan integroiduksi korjuuksi. (Hakkila 2004; Lepistö ym. 2010.)

Kuitu- ja energiapuu voidaan katkoa giljotiiniterällä, mutta tukkipuun katkontaan tulee käyttää ketjusahalla varustettua kouraa. Kokopuukorjuussa hakkuukoneessa käytetään usein joukkokäsittelykouraa, joka leikkaa puut giljotiiniterällä ja kerää ne kourakasoihin hakkuun yhteydessä. (Lepistö ym. 2010.)

Pienpuuhakkeen, eli kokopuusta ja karsitusta rangasta valmistetun hakkeen tuotannossa ei palstakuivatuksella ole yhtä suurta merkitystä kuin hakkuutähteen kohdalla. Näin ollen on usein korjuun kannalta järkevintä ajaa kaadetut puut välittömästi tienvarsivarastoon. Mikäli varastopaikka on huono, pienpuun palstakuivatus kuitenkin korostuu. Kesäaikainen 2–4

viikon pituinen palstakuivatus voi olla järkevää kohteilla, joissa maapohjan kantavuus on riittävän hyvä ja varastopaikka huono. (Hillebrand 2009; Lepistö ym. 2010.)

Tienvarsivarasto syntyy lähikuljetuksen tuloksena. Ajokoneen kuljettaja on hakkeen tuotantoketjussa avainasemassa, sillä hänen ammattitaitonsa määrittää energiapuuerän puhtauden sekä varaston kuivattavan vaikutuksen. Varaston puhtaudella on vaikutusta hakkurin työskentelyyn, sillä kouranippujen puhtaaksi ravistelu vie aikaa. (Lepistö ym. 2010.)

Varastopinossa olevat epäpuhtaudet voivat vioittaa hakkuria, jolloin sitä joudutaan huoltamaan useammin. Varastopinossa esiintyviä yleisiä epäpuhtauksia ovat maa-aines sekä metsäkuljetuksessa käytettävän ajokoneen kuormatilan metalliset lisäpankot. Tästä syystä lisäpankot tulisi aina kiinnittää huolellisesti pulteilla. (Lepistö ym. 2010.)

2.2.2 Varastointi

Tienvarsivarastointi on oleellinen osa metsähakkeen tuotanto- ja laatu järjestelmää. Varastoinnilla luodaan joustoa kuljetuksiin, torjutaan toimitushäiriöitä ja ennen kaikkea parannetaan lopputuotteen eli metsähakkeen laatua. (Hakkila 2004.)

Tärkein energiapuun tienvarressa kuivumiseen vaikuttava tekijä on itse varastopaikka. Varastopinon peittäminen edistää kuivumista toiseksi eniten ja välipuiden käytöllä on vain melko pieni vaikutus kuivumiseen. Välipuiden käyttö (Kuva 4) jakaa haketusurakoitsijoiden mielipiteitä, sillä moni kokee välipuut varsinaista työtä hidastavina. (Lepistö ym. 2010.)



Kuva 4. Varastopino, jonka kasaamisessa on käytetty välipuita (Lepistö ym. 2010.)

Hyvä varastopaikka sijaitsee kuivapohjaisella muuta ympäristöä korkeammalla kohoumalla tai mäellä. Paikan tuulisuus ja aurinkoisuus edistävät puiden kuivumista. Varastopaikan alustan tulisi olla tasainen eikä siinä

saisi olla alikasvospuita tai irtokiviä. Tarpeen vaatiessa tulee huolehtia varastopaikan ennakkoraivauksesta. Tämä tapahtunee jouhevasti samassa yhteydessä mikäli varsinainen leimikkokin ennakkoraivataan. (Energiapuun varastointiohje n.d.)

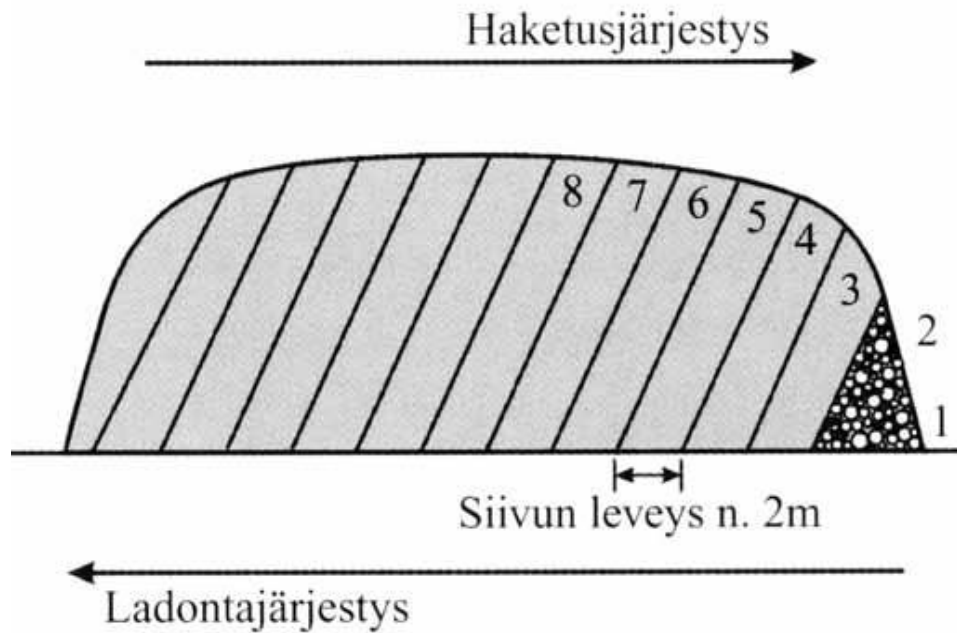
Eryteisesti mikäli kyseessä on talvella haketettava varasto, tulee pino sijoittaa siten, että hakeauto pääsee kuormattuna lähtemään liikkeelle joko tasaiselta maalta tai myötämäkeen. Myös haketus- ja kuljetuskalustolle riittävän kääntöpaikan löytyminen varastopaikan läheltä tulee varmistaa. Varastopinoa ei tule kuitenkaan koskaan sijoittaa sähkölinjan alle työturvallisuuden takaamiseksi. (Energiapuun varastointiohje n.d.)

Mikäli asiaan voi vaikuttaa, tulee lumen auraus varastopinoon estää. Talvisin olisi hyvä muutenkin poistaa enimmäkseen lumet pinon pohjalta ennen varaston kasaamista. (Energiapuun varastointiohje n.d.)

Varastopinon tulisi olla irti maasta. Tämä on mahdollista aluspuiden käytön avulla. Esimerkiksi haapa, leppä tai muu myyntiin kelpaamaton järeä puu on tähän tarkoitukseen hyvinkin käyttökelpoista. Mikäli järeää puuta ei ole käytettävissä, voidaan aluspuut tehdä muustakin energiapuusta. Vedettömiä oja käytetään joskus ilmavan varaston rakentamiseen. Niiden käyttöä ei kuitenkaan voi suositella, sillä alapuolisen tuen puuttuminen voi johtaa pinon romahtamiseen. (Lepistö ym. 2010.)

Haketusvaiheessa energiapuu saadaan kerättyä tarkemmin, nopeammin ja puhtaammin aluspuiden päältä kuin ilman aluspuita. Aluspuiden käytöllä varmistetaan lisäksi se, että kosteus ei pääse imeytymään pinon alimpiin osiin ja estetään maahan kiinni jäätyminen. (Hillebrand 2009.)

Varastopinon ladonta tulisi suorittaa siivuittain täyteen korkeuteensa (Kuva 5). Korkeassa varastopinossa sateelle altistuvien pintapuiden osuus koko varaston tilavuudesta on pienempi, joten myös kosteusprosentti on tällaisessa pinossa yleensä alhaisempi. Rungot tulisi latoa suoraan, jotta haketusvaiheessa pino purkautuisi helpommin ja lumen variseminen haketettavaan pinoon saataisiin estettyä. (Energiapuun varastointiohje n.d.; Lepistö ym. 2010.)



Kuva 5. Varasto kootaan siivuittain muutaman metrin levyisissä osissa täyteen korkeuteen. (Energiapuun varastointiohje n.d.)

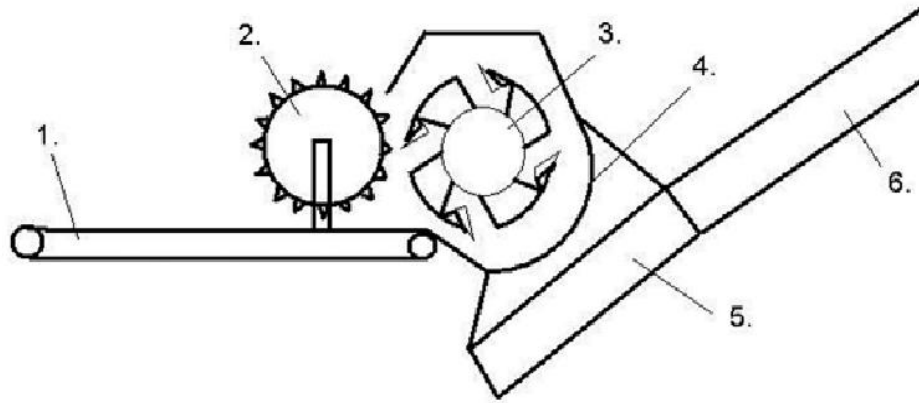
Karsitulla rangalla ja kokopuulla varaston päällimmäisen kerroksen tulisi muodostaa vähintään 0,5 metriä paksu ja 0,5–1 metriä muuta varastoa ulompana oleva lippa. Lipattomassa varastossa kaikki rungonpäät altistuvat sateelle ja vesi valuu niitä myöten pinon sisään. (Lepistö ym. 2010.)

Jos pienkokopuun annetaan kuivaa avoimella tienvarsivarastolla kesän yli, laskee sen kosteus alle neljäänkymmeneen prosenttiin. Pienkokopuun varastopinojen peittämisellä saadaan noin 6 prosenttiyksikköä kuivempaa haketta kuin ilman pinojen peittoa. Hakkuutähdevarastoilla peittämisen vaikutus on suurempi – niissä kosteus pysyy 10–15 prosenttia alhaisempana kuin peittämättömissä pinoissa. (Hillebrand 2009.)

Pienkokopuun kohdalla peittämistä tärkeämpi tekijä on varastopaikan sijainti. Varjossa sijaitsevien pienkokopuubarastopinojen kosteus on 7–17 prosenttiyksikköä suurempi kuin avoimella paikalla olevien pinojen kosteus. (Hillebrand 2009.)

2.2.3 Haketus

Metsäbiomassa tuotetaan hakkeeksi hakkurilla. Hakkurit ovat tyypiltään joko rumpu-, laikka-, tai ruuvihakkureita, joista rumpuhakkuri on suuressa kokoluokassa käytetyin. Hakkuri rakennetaan yleensä pyörialustaiselle ajoneuvolle kuten autoon tai traktoriin. Rumpuhakkurin pääkomponentit (Kuva 6) ovat 1) syöttöpöydän ketjukuljetin, 2) syöttölaitteen piikkirumpu, 3) terärumpu, 4) hakeseula, 5) hakkeenheitin ja 6) hakkeenheittimen torvi. (Lähdevaara ym. 2010.)



Kuva 6. Rumpuhakkurin pääkomponentit (Lähdevaara ym. 2010.)

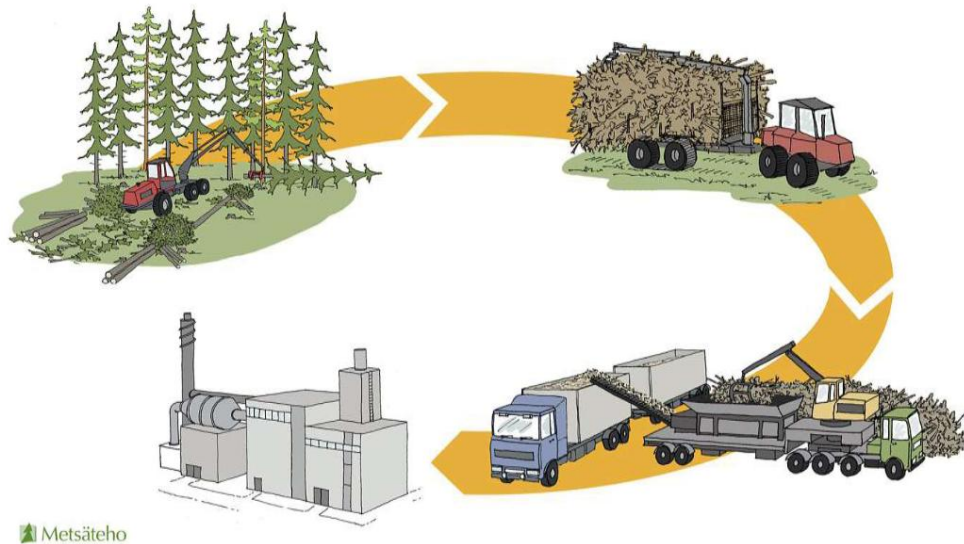
Rumpuhakkurilla puuaines pilkotaan hakkeeksi teräsrummussa, jossa on kahdesta kuuteen terää lieriömäisen rummun ympärillä. Leikkautunut puuaines sinkoutuu suurella nopeudella hakeseulaan ja läpäisee sen, mikäli palakoko on pienempi kuin seulan silmäkoko. Muussa tapauksessa hakkepalat sinkoutuu takaisin ja se leikkautuu lisää. Seulalla mahdollistetaan tasakokoisen hakkeen tuotto. (Lähdevaara ym. 2010.)

Hakettaminen on metsähakkeen tuotantoketjun laitteistokriittisin vaihe etenkin kovilla pakkasilla. Hakkurikaluston ylläpito ja huolto vaativat käyttäjältään paljon osaamista. Laadukkaan haketuksen lopputuloksena on puuraaka-aineesta riippumatta tasakokoinen hake, jonka tuottaminen vaatii hakettajalta paljon käytännön tuomaa kokemusta. Hakkurilla oikein konttiin syötetty hake pakkautuu tiiviisti ja tehostaa kuljetusta. (Kiema, Pasanen & Parviainen 2005.)

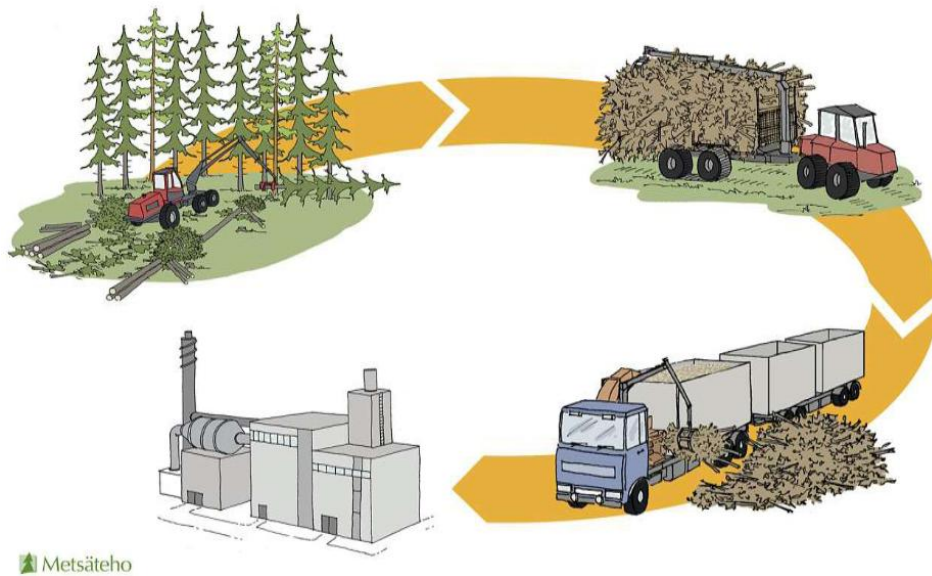
Hakkuutähteen haketus on yleisesti ottaen hitaampaa kuin kokopuun haketus, sillä irtonaisen hakkuutähteen syöttö hakkurille on hidasta. Tuoreen puun haketus on tehokkaampaa kuin kuivan puun haketus. (Lepistö ym. 2010 & Laurila 2007.)

Tässä tutkimuksessa mukana ollut metsähake oli tienvarressa hakettua, jolloin puhutaan välivarastohaketuksesta. Välivarastohaketus voidaan toteuttaa joko erillisellä autohakkurin ja hakeauton yhdistelmällä tai hakkuriautolla. Autohakkurissa hakkurikone syöttöpöytineen on sijoitettu kuorma-auton alustan päälle. Hakkuriautoja on nykyään käytössä verrattain vähäinen määrä. (Lähdevaara ym. 2010.)

Tienvarressa autohakkuri valmistaa haketta suoraan hakeautoihin, jotka kuorman täytyttyä toimittavat sen hakkeen käyttöpaikalle ja palaavat sitten hakemaan uutta kuormaa. Hakkuri-hakeautoyhdistelmä muodostaa niin sanotun kuumen ketjun (Kuva 7), koska haketus-, kuljetus-, ja kuormaustavaiheet liittyvät kiinteästi toisiinsa. Hakkuri joutuu keskeyttämään tuotannon, mikäli seuraava hakeauto ei ole odottamassa hakkeen valmistusta ja kuormausta. (Lähdevaara ym. 2010.)



Kuva 7. Tienvarsihaketus erillisen hakkurin ja hakeauton yhdistelmällä (Kärhä 2008.)



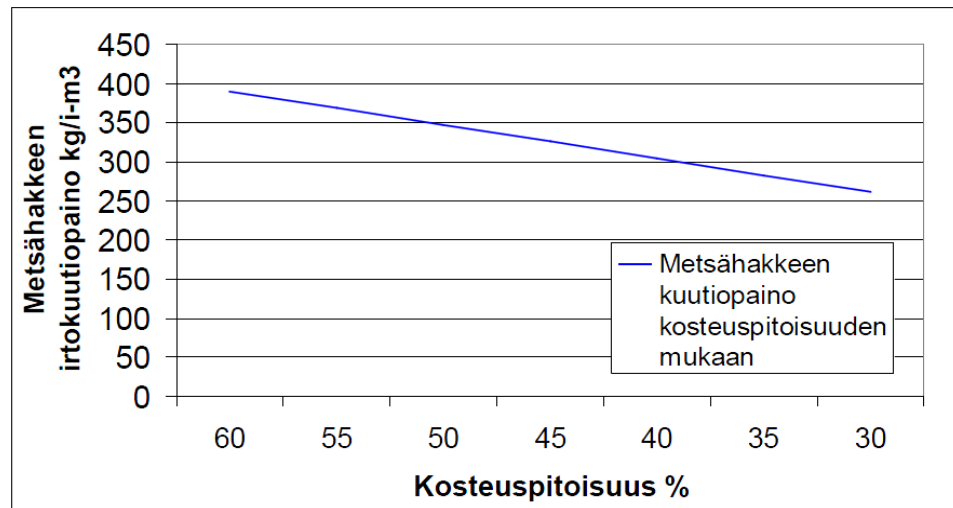
Kuva 8. Tienvarsihaketus hakkuriautolla (Kärhä 2008.)

Hakkuriautossa on kiinteän kuormaimen ja hakkurin lisäksi kuormatila hakkeelle. Autoon voidaan lisäksi liittää perävaunu. Hakkuriautolla kuljetustehokkuus on pienemmän kuormatilan takia huonompi kuin autohakkuri-hakeautoyhdistelmällä. Toisaalta hakkuriautolla vältetään kuuman ketjun muodostuminen, yksinkertaistetaan toimitusketjua ja vähennetään tarvittavien koneiden ja työntekijöiden määrää (Kuva 8). (Lähdevaara ym. 2010.)

2.2.4 Kaukokuljetus

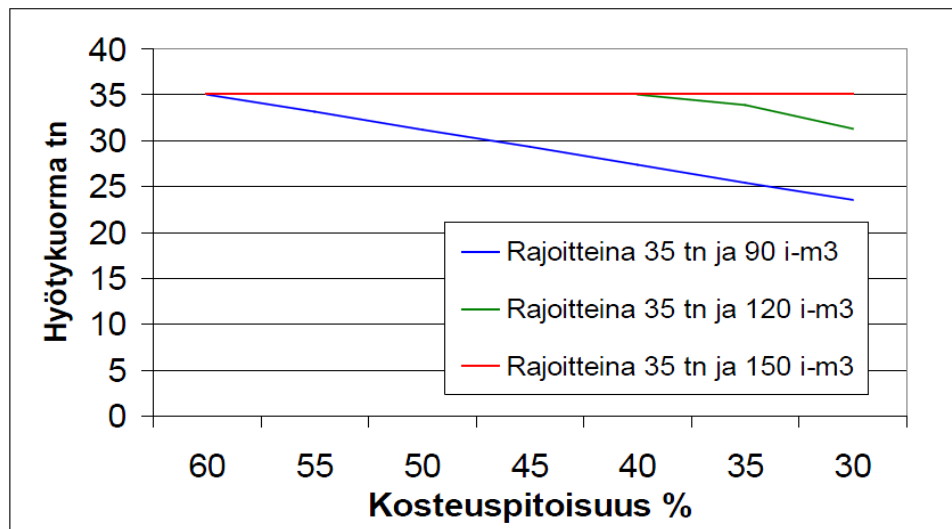
Hakkeen käytetyin kaukokuljetusmenetelmä on autokuljetus. Vuonna 2010 hakkeen keskimääräinen kuljetusmatka kotimaan liikenteessä koko valtakunnan tasolla oli 94 kilometriä. (Knuutila 2003, 73; Tilastokeskus 2011.)

Kuljetusvaiheen taloudellisuuteen vaikuttavat kuljetettavan raaka-aineen tilavuuspaino (Kuva 9), energiatiheys, muoto, kuljetusmatka ja kalusto-kohtaiset ominaisuudet. Metsäpolttoaineiden kuljetustaloutta huonontaa eniten alhainen energiatiheys ja tilavuuspaino. (Knuutila 2003, 73.)



Kuva 9. Metsähakkeen tilavuuspaino suhteessa kosteuspitoisuuteen. (Ranta 2010.)

Kuivahtanutta metsähaketta tai hakkuutähdettä kuljetettaessa kuormatilan tilavuus rajoittaa autoyhdistelmän kokonaispainon sijaan kuorman kokoa (Kuva 10). Metsäpolttoaineiden varastointi tienvarressa tarkoituksena alentaa lopputuotteen kosteutta vaikeuttaa edelleen autoyhdistelmän kantavuuden hyödyntämistä. Ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaispaino on Suomessa 60 tonnia. (Knuuttila 2003, 73.)



Kuva 10. Autokuorman hyötykuorma suhteessa hakkeen kosteuspitoisuuteen. (Ranta 2010.)

Käytännössä kuivallakaan hakkeella kuormatilaa harvoin saadaan aivan täyteen, sillä kun auto kuormataan haketorven kautta puhaltamalla, voi kuorman takaosa jäädä vajaaksi. (Hakkila 2004.)

Mikäli kaukokuljetusmatka on lyhyt, varastopaikka ahdas tai laitoksen vastaanottokyky pieni, voidaan hakkeen kuljetuksessa käyttää pelkkää vetoautoa, jonka kuormatilavuus on enimmillään 60 irtokuutiometriä. (Hakkila 2004.)

Tuoreen metsähakkeen osalta taas autoyhdistelmän sallittu kokonaispaino rajoittaa kaluston täyden kuormatilavuuden hyödyntämistä (kuvio 5). Metsähakkeen palakokojakauma ja kuormausmenetelmä vaikuttavat myös omalta osaltaan kuorman tilavuuspainoon ja kuormatilan hyödyntämiseen. Tehokas puhallus hakkurilla kuormatessa ei kuitenkaan välttämättä johda tiiviimpään kuormaan, mikäli sitä verrataan heittimellä varustettuihin hihnakuumaimiin tai kauhakuormaukseen. (Knuuttila 2003, 73.)

Hakkeen tiiviyyteen kuormassa vaikuttavat palan muoto, palakokojakauma, oksat, puulaji, vuodenaika, kuormausmekaniikka sekä painuma kuljetuksessa. (Knuuttila 2003, 30.)

Mitä litteämpiä hakepalaset ovat, sitä alhaisempi on kuorman tiiviys. Epätasainen palakokojakauma taas tarkoittaa korkeampaa tiiviyyttä, sillä suurempien palasten välit täyttyvät hienommilla hakepalasilla. Hakkeeseen jäävät oksanpätkät alentavat myös tiiviyyttä. (Knuuttila 2003, 30.)

Puulajilla on vaikutusta hakkeen tiivyyteen, sillä hauraasta pehmeästä puusta tehty hake sisältää enemmän hienojakoista ainesta kuin kovasta puusta tehty hake. Esimerkiksi leppähakkeen tiiviyys on korkeampi kuin koivuhakkeen. (Knuutila 2003, 30.)

Mikäli haketus tapahtuu talvella ja puu on jäässä, syntyy haketuksessa jäätyneen puun haurauden takia enemmän hienoainesta kuin sulasta puusta, mikä tarkoittaa korkeampaa tiiviyttä. (Knuutila 2003, 30.)

Hakkeen tiiviyys kasvaa kuljetuksen aikana riippuen lähtötilanteen tiivyydestä, matkan pituudesta, tien laadusta sekä kuorman mahdollisesta jäätymisestä. (Knuutila 2003, 30.)

Koistisen (2010) pro gradu -tutkielmassa on selvitetty kaukokuljetuksen aikana tapahtuvaa kuormien irtokuutiometrimääräistä tiivistymistä. Metsätähdehakkeella ja rankahakkeella tiivistyminen oli 3,5 irtokuutiometriä matkalla välivarastolta laitokselle ja kokopuuhakkeella 3,8 irtokuutiometriä. Tiivistymistä oli mitattu yhteensä 11 ajoneuvoyhdistelmästä ja 29 kon-
tista. Tutkimus toteutettiin kesä–marraskuun 2010 välisenä aikana.

Kaukokuljetuksen kalustokohtaisia ominaisuuksia ovat kuormatilan monikäyttöisyys, kokonaispaino, tilavuus ja purkulaitteisto. Ajoneuvon suurin sallittu korkeus on 4,2 metriä ja leveys 2,6 metriä. 7-akselisen perävau-
nuyhdistelmän suurin sallittu pituus on 22 metriä. Mikäli hakeauto on yli 22 metriä pitkä, on suurin sallittu leveys 2,55 metriä. Moduuliyhdistelmän suurin sallittu pituus on 25,25 metriä. Molemmissa tapauksissa yhdistelmän suurin sallittu kokonaispaino on 60 tonnia. (Knuutila 2003, 73.)

Käytännössä yhdistelmän pituusmittaa rajoittaa sen ajettavuus metsäauto-
tiestöllä ja korkeutta lastausvälineiden kuten hakkurin ulottuvuus. Tyypilinen kuormatilavuus kiinteäkuormatila-
isilla täysperävaunuyhdistelmillä on 110–130 kiintokuutiometriä ja kantavuus auton rakenteista ja purkulait-
teista riippuen 33–37 tonnia. (Knuutila 2003, 73.)

2.2.5 Vastaanotto

Tässä luvussa selostamani toiminnot laitosalueella tapahtuvasta hakkeen vastaanotosta perustuvat pääasiassa havaintoihini, jotka sain vierailtuani neljällä tutkimuksessa mukana olleella lämpö- ja voimalaitoksella.

Hakkeen vastaanotto lämpö- ja voimalaitoksella alkaa hakeauton saapumisella laitosalueelle. Ensimmäisenä hakeauto ajaa vaa'alle, jossa tunnista-
dutaan esimerkiksi syöttämällä auton rekisterinumero vaakajärjestelmään. Tämän jälkeen syötetään vaa'alle tiedot tuotteesta eli kuorman hakelajista ja arvio kuorman tilavuudesta.

Operaatiopäällikkö Juho-Oskari Haukkalan (henkilökohtainen tiedonanto 5.12.2011) mukaan suuri osa nykyään käytössä olevista vaa'oista on kaksi-
levyisiä, jolloin koko yhdistelmä voidaan punnita kerralla. Muussa tapauk-
sessa vetoauto ja perävau-
nu punnitaan samalla vaa'alla erikseen.

Seuraava vaihe hakkeen vastaanotossa on punnituksen jälkeen ajaa auto vastaanottoasemalle, jossa kuorma puretaan hakkeen vastaanottotaskuun vastaanottoasemasta ja kuljetuskalustosta riippuvalla tavalla. Tässä vaiheessa otetaan kuormasta myös hakenäyte. Näytteenoton tarkempi toteutus riippuu lämpö- ja voimalaitoksesta sekä kuljettajasta. Manuaalisessa eli käsin tapahtuvassa näytteenotossa on eroavaisuuksia yksittäisnäytteiden määrässä sekä näytteenottokohdissa.

Yksi tapa ottaa näyte käsin hakekuormasta on ottaa kuorman purkuvaiheessa yksi näyte perävaunun ovien avaamisen jälkeen ja toinen yksittäisnäyte purettuun kuormasta. Vetoautosta näytteet otetaan samalla tavalla. Yksittäisnäyte voi olla suuruudeltaan noin kaksi litraa. On kuitenkin lopujen lopuksi kuljettajan itsensä päätettävissä, kuinka tarkasti hän näytteenoton ohjeistusta noudattaa.

Manuaalisesti otetut näytteet kuljettaja toimittaa erilliseen astiaan, johon laitetaan liitteeksi kyseisen kuorman kuormakirja. Yhdestä hakekuormasta otetut useat yksittäisnäytteet samassa astiassa muodostavat siis kokoomanäytteen. Laitoshenkilökunta huolehtii kokoomanäytteen käsittelystä tästä eteenpäin.

Kun kuorma on purettu ja näytteet otettu, ajaa hakeauto takaisin vaa'alle. Vaa'alla suoritetaan punnitus samaan tapaan kuin tullessa, mutta nyt kuorma tyhjänä. Kuorma täytenä tehtävää punnitusta kutsutaan tulopunnitukseksi ja kuorma tyhjänä tehtävää punnitusta lähtöpunnitukseksi.

Kun lähtöpunnitus on suoritettu, kuittaa kuljettaja haketoimituksen valmiiksi ja poistuu laitosalueelta. Kuljettajille sattuu jonkin verran virheitä vaa'alla toimiessa. Virheet ovat näppäilyvirheen tapaisia ja useimmiten laitoshenkilökunnan korjattavissa. Vaa'at taarataan yleensä kolmen vuoden välein riippumattoman tahon toimesta.

Hakkilan (2004) mukaan vastaanottoasema tulee sovittaa käytettyyn kuljetuskalustoon ja -järjestelmään, ja sen tulee pystyä käsittelemään monenlaisia polttoaineita. Hakeautot tyhjentävät kuormansa vastaanottotaskuun tai siiloon sivukipillä, peräkipillä tai perästä purkavan lattian avulla. Sivulle kippaavalla perävaunullisella hakeautolla purkuun kuluu aikaa noin 15 minuuttia ja perästä purkavalla hakeautolla noin 30 minuuttia. (Hakkila 2004.)

Tukokset purkupaikan polttoainetaskussa ja riittämätön siirtokapasiteetti pitkittävät autojen viipymää laitoksella ja aiheuttavat ruuhkia. Jonotuksen välttämiseksi täytyy toisaalta myös saapuminen rytmittää oikein. (Hakkila 2004.)

Hakkilan (2004) mukaan varsinkin suuremmilla lämpö- ja voimalaitoksilla on käytössään murskaimia vastaanottoaseman yhteydessä, joilla saadaan poistettua hakkeesta epäpuhtauksia ja ylisuuria kappaleita. Syötteen juoksevuus paranee ja saadaan estettyä laitteiden kulumista ja rikkoontumista. Pienillä lämpölaitoksilla näitä laitteita kuitenkin harvoin on käytössä, jolloin hakkeessa ei voida sallia ylisuuria kappaleita.

Käsittelyjärjestelmän toimivuus riippuu pitkälti polttoaineen laadusta. Siilojen purkaantuminen estyy ja kuljettimet häiriintyvät, jos polttoaine on liian märkää, siinä on liikaa epäpuhtauksia tai jos sen energiatiheys on suunnitteluarvoja pienempi. Pieni laitos on tässäkin tapauksessa alttiimpi hakkeen laadusta johtuville häiriöille kuin iso laitos. (Hakkila 2004.)

3 METSÄHAKE

Metsähakkeen raaka-aineita ovat karsittu ranka, kokopuu, kuitupuu, hakkuutähteet, kannot, juurakot ja järeä runkopuu. Metsähaketta saadaan nuoren metsän hoitokohteilta, muilta harvennuskohteilta sekä uudistusaloilta. (Ylitalo 2011.)

Kokopuuhake valmistetaan karsimattomasta puusta ja rankahake karsituisista rangoista. Hakkuutähteestä eli latvoista, oksista ja raivauspuusta tehdään hakkuutähdehaketta eli metsätähdehaketta. (Alakangas 2000.)

Tässä tutkimuksessa mukana oleva metsähake on edellisessä kappaleessa mainituista raaka-aineista tuotettua.

3.1 Ominaisuudet

Metsähakkeen laatu koostuu monesta ominaisuudesta, joiden keskinäinen painoarvo riippuu laitoksen käsittely- ja kattilatekniikasta sekä mahdollisten seospolttoaineiden ominaisuuksista. (Hakkila 2004.)

Laajamittaisessa käytössä metsähakkeen laatutekijöitä ovat pääasiassa:

- kosteus (%)
- lämpöarvo (MJ/kg)
- energiatiheys (MWh/i-m³)
- hiilidioksidin ominaispäästö (CO₂/MWh)
- neulaspitoisuus (%)
- puhtaus ja tuhkapitoisuus (%)
- palakoko (mm).

Edellä mainitut ominaisuudet vaikuttavat paitsi keskiarvojen myös vaihtelun kautta, jotka ennakoarvaamattomana tapahtuessaan koetaan laitospäässä haitalliseksi. Vaihtelua esiintyy kuorman sisällä, kuormien välillä ja myös vuodenajoittain. (Hakkila 2004.)

Kaikista metsähakkeen ominaisuuksista eniten laatuun vaikuttava on kosteus. Se ilmoittaa veden osuuden polttoaineen kokonaismassasta. (Hakkila 2004.)

Kosteus vaikuttaa metsähakkeessa monella tavalla. Kaatotuoreessa havupuussa on talviaikaan kiintokuutiometriä kohti lähes 400 kg kuiva-ainetta ja 500 kg vettä. Toisin sanoen yli puolet kuorman painosta olisi vettä, mikäli puu toimitettaisiin tuoreena käyttöpaikalle. Vesi kohottaa kuljetuskustannuksia sitä enemmän mitä pidemmästä kaukokuljetusmatkasta on kyse. (Hakkila 2004.)

Erityisesti pienemmissä kattiloissa polton hyötysuhde kärsii liian kosteasta polttoaineesta. Tällöin palaminen jää epätäydelliseksi eikä puun lämpöarvoa pystytä hyödyntämään kokonaisuudessaan. Talvella kostea hake saat-

taa jäätyä kuormassa, mistä seuraa ongelmia purkupaikalla ja syöttölinjoilla. (Hakkila 2004.)

Suuret laitokset sen sijaan sietävät metsähakkeessa melko korkeitakin kosteuspitoisuuksia ja kosteusvaihteluita, sillä ne soveltavat kattiloissaan kerrosleijutekniikkaa ja koska puuta usein poltetaan tasalaatuiseen jyrshinturpeeseen sekoitettuna. (Hakkila 2004.)

Kerrosleijupoltossa metsähake poltetaan ilmavirran avulla leijutettavassa hehkuvan hiekan ja tuhkan muodostamassa kerroksessa. Metsähake liikkuu ja sekoittuu kerroksessa jatkuvasti ja kaasujen ja lämmön siirtyminen on hyvin tehokasta. (Jätelaitosyhdistys n.d.)

Puun biomassakomponenttien ja metsähakelajien väliset kosteuserot kaatohtokella ovat vähäiset, mutta niiden kuivumisessa ja saavutetun kuivumistason ylläpitämisessä on selviä eroja. (Hakkila 2004.)

Kokopuuhake on keskimäärin kuivempaa kuin metsätähdehake. Erot metsähakkeen keskimääräisissä kosteuksissa suurten ja pienten laitosten välillä johtuvat pitkälti siitä, että pienet laitokset käyttävät enemmän kuivempaa kokopuuhaketta kuin isot laitokset. Suuretkin laitokset ottavat kosteuserot laadunohjauksessa huomioon siten, että ne pyrkivät kohdistamaan kuivemman kokopuuhakkeen toimitukset talvikauteen. (Hakkila 2004.)

Kosteuden ohella tärkeä metsähakkeen laatuominaisuus on sen alhainen energiatiheys esimerkiksi öljyyn verrattuna. Energiatiheydellä tarkoitetaan polttoaineen tilavuusyksikön sisältämää energiamäärää (MWh/i-m³). Alhainen energiatiheys vaikuttaa haitallisesti kuormien kokoon, kuljetuskustannuksiin, hankinta-alueen laajuuteen, varastojen tilantarpeeseen sekä laitosten purkulaitteiden ja kuljetinten kapasiteettiin. (Hakkila 2004.)

Alhaisen energiatiheiden vuoksi metsähaketta kuljettavalta autokalustolta vaaditaan suurta kuormatilaa. Suuren kuormatilan merkitys korostuu silloin, kun haketta kuljetetaan kaukaa. (Hakkila 2004.)

Hakkeen palakoko ja tasaisuus ovat merkittäviä laatuominaisuuksia etenkin pienissä lämpölaitoksissa, sillä hienoaines ja tikut vaikeuttavat polttoaineen syöttöä kattilaan. Tavallisesti hakepalan tavoitepituus on 30–40 millimetriä. (Knuutila 2003, 31.)

3.2 Lämpöarvo

Lämpö- ja voimalaitokset teettävät lämpöarvon määrittämisen ulkopuolisella taholla yleensä kuukausittain. Tieto on peräisin tutkimuksen yhteydessä tehdyiltä lämpö- ja voimalaitosvierailuilta. Lämpöarvon määrittäminen tehdään kokoomanäytteestä, jossa on mukana yksittäisnäytteet kunkin haketoimittajan kaikista kyseisen kuukauden aikana toimittamista hakekuormista hakeleijutettuna. Määritettävä lämpöarvo on kalorimetrinen.

Kalorimetrisessä eli ylemmässä lämpöarvossa otetaan huomioon palamisen yhteydessä höyrystyvän veden höyrystymisenergia. Suomessa lämpö-

arvo ilmoitetaan yleensä kuitenkin tehollisena eli alempana lämpöarvona. Tehollinen lämpöarvo saadaan johdettua muunnoskaavan avulla kalorimetrisestä lämpöarvosta ottamalla huomioon polttoaineen sisältämän vedyn palamisessa syntyvän ja savukaasuissa poistuvan vesihöyryn haihduttamiseen kuluva lämpömäärä. (Alakangas 2000.)

Tässä tutkimuksessa on tulosten vertailukelpoisuuden parantamiseksi tehollinen eli alempi lämpöarvo asetettu vakioksi (19 MJ/kg) kaikille hakekuormille ja toteutuneet energiasisällöt on laskettu sen mukaan.

Kalorimetrinen lämpöarvo määritetään punnitsemalla ilma-kuivasta analyysinäytteestä noin yksi gramma, joka poltetaan nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa (Kuva 11) happiatmosfäärissä ja vapautuva lämpö mitataan. Samanaikaisesti määritetään analyysinäytteen kosteus, jonka avulla ilma-kuivan näytteen lämpöarvo muunnetaan vastaamaan absoluuttisen kuivan näytteen lämpöarvoa. Tuloksena ilmoitetaan kahden rinnakkaismäärityksen keskiarvona saatu kalorimetrinen lämpöarvo absoluuttisen kuivalle näytteelle, joka lasketaan alla olevan yhtälön mukaisesti. Rinnakkaismääritysten välinen ero saa korkeintaan olla 0,120 MJ/kg. Lämpöarvomääritysten ilmoitustarkkuus on 0,01 MJ/kg. (Alakangas 2000.)

$$Q_{r,d} = Q_{gr,ad} * \frac{100}{100 - Mad}$$

Kaavassa $Q_{r,d}$ on kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)

$Q_{gr,ad}$ on analyysikostean eli ilma-kuivan näytteen kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/kg)

Mad on ilma-kuivan näytteen analyysikosteus (%)



Kuva 11. Pommikalorimetri (Evttek, 2006.)

Absoluuttisen kuivan polttoaineen tehollinen eli alempi lämpöarvo saadaan vastaavasta kalorimetrisestä lämpöarvosta alla olevan yhtälön mukaisesti. (Alakangas 2000.)

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - 0,02441 * M$$

Kaavassa $Q_{net, d}$ on kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/kg)

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

0,02441 (MJ/kg) on veden höyrystymislämmöstä aiheutuva korjaustekijä (+25 astetta celsiusta)

M on polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palaessa syntynyt vesimäärä prosentteina.

Kolmantena lämpöarvona voidaan ilmoittaa tehollinen lämpöarvo saapumistilassa. Se on kolmesta tässä luvussa esitellystä lämpöarvosta alin, sillä siinä lämpöarvoa laskettaessa vähennetään energiamäärä, joka joudutaan käyttämään polttoaineen luontaisesti sisältämän ja palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen. (Alakangas 2000.)

Saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo ($Q_{net, ar}$) lasketaan alla olevan yhtälön mukaisesti. (Alakangas 2000.)

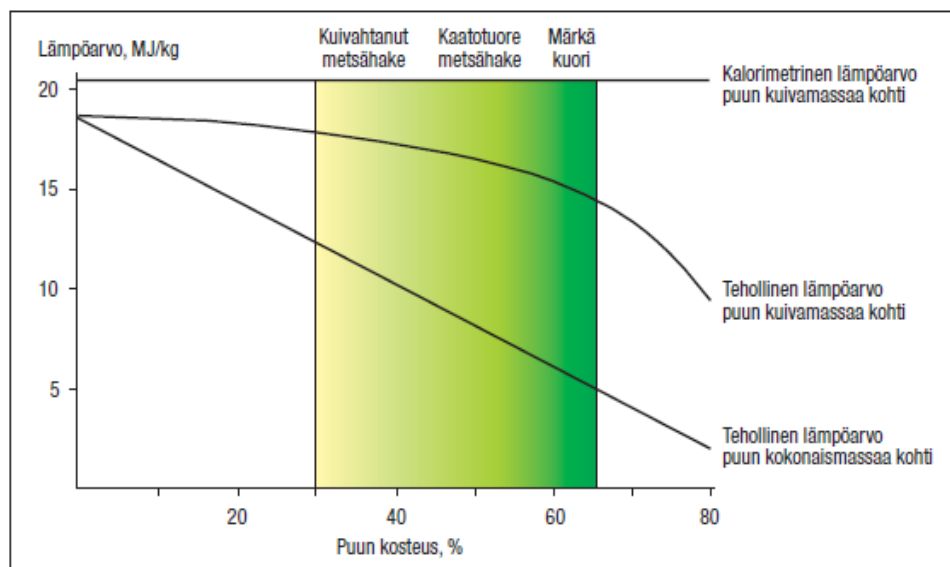
$$Q_{net, ar} = Q_{net, d} * \frac{100 - Mar}{100} - 0,02441 * Mar$$

Kaavassa $Q_{net, ar}$ on saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/ kg)

$Q_{net, d}$ on kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/ kg). Tässä tutkimuksessa kaikkien kuormien teholliseksi lämpöarvoksi asetettiin 19 MJ/ kg.

Mar on vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa (%) painotettuna kostean polttoaineen massalla.

Kuten kuvasta 12 nähdään, on kosteudella suuri vaikutus metsähakkeen teholliseen lämpöarvoon. haihduttaminen vie poltossa lämpöenergiaa 0,7 KWh/kg. Mikäli talvella kaadetun havupuun kosteus saadaan pudotettua 55 prosentista 40 prosenttiin, niin alkuperäisestä vesimäärästä häviää puolet pois ja tehollinen lämpöarvo nousee 8 prosenttia. (Hakkila 2004.)



Kuva 12. Kosteuden vaikutus puun lämpöarvoon (Hakkila 2004.)

3.3 Näytteenotto ja kosteuden määrittäminen

Metsähakkeen kosteuden määrittämisessä tarvittava näyte toimitetusta polttoaine-erästä eli kuormasta haketta otetaan kuljettajan tai automatiikan toimesta. Näytteenottotavat ja näytteenottokohdat vaihtelevat tässä tutkimuksessa mukana olleiden laitojen ja kuljetusyrittäjien kesken. Myös näytteen käsittelyssä ennen varsinaista analyysiä on eroja laitoksittain. Havaintoni perustuvat tutkimuksen yhteydessä tapahtuneisiin vierailuihin neljällä eri lämpö- ja voimalaitoksella.

Yksittäisnäyte tarkoittaa pientä määrää polttoainetta, joka otetaan kerrallaan polttoaine-erästä. Kokoomanäyte taas on yleisnimitys näytteelle, joka muodostetaan yhdistämällä samasta polttoaine-erästä otetut yksittäisnäytteet. (Alakangas 2000.)

Alakankaan (2000) mukaan kotimaisten polttoaineiden kosteusanalyysissä käytetty menetelmä pohjautuu ISO 589 -standardiin.

Kosteusnäytteiden koko määräytyy käytettävän punnitustarkkuuden sekä hakkeen palakoon mukaan. Kun punnitustarkkuus on 0,01 grammaa, punnitaan vähintään kaksi 30–100 gramman suuruista näytettä, ja kun punnitustarkkuus on 0,1 grammaa, punnitaan kaksi 200–400 gramman suuruista näytettä. (Alakangas 2000.)

Kosteusnäytteet kuivataan ilmastoidussa lämpökaapissa 105 ± 2 °C lämpötilassa vakio painoonsa. Mikäli näyte on enintään 30 millimetrin paksuise-

na kerroksena, riittää useimmiten 16 tunnin kuivausaika. Näytteitä ei kuitenkaan saa kuivata yli vuorokautta. (Alakangas 2000.)

Kuivauksen jälkeen kosteusnäytteiden annetaan jäähtyä eksikaattorissa huoneen lämpötilaan, minkä jälkeen näytteet punnitaan. Eksikaattori on laboratorioissa käytössä oleva astia, jolla estetään jäähtyvää ainetta absorboimasta kosteutta ilmasta. Mikäli eksikaattoria ei ole käytettävissä punnitaan näytteet kuumina välittömästi sen jälkeen, kun ne otetaan lämpökappista. (Alakangas 2000; Opetushallitus, n.d.)

Kosteusmäärittäessä on varmistettava, ettei käytettäviin astioihin ole imeytynyt kosteutta ja että ne kestävät kuivauslämpötilan (105 °C). (Alakangas 2000.)

Hakenäytteiden kosteus lasketaan kuivauksen aikana tapahtuvasta massamuutoksesta alla olevan yhtälön mukaisesti. (Alakangas 2000.)

$$Mar = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100$$

Kaavassa Mar on märkápainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa (%)

m1 on märän näytteen massa (g)

m2 on kuivatun näytteen massa (g)

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

Seuraavassa kolmessa luvussa käsitellään tutkimusaineistoa ja sen keruuta, tutkimusmenetelmiä ja käytettyjä laskentakaavoja. Varsinaista aineistonkeruutyötä esimerkiksi kenttätöiden muodossa ei tutkimuksessa tehty, sillä aineisto on saatu kokoon tietokantahaulla.

4.1 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineisto on koottu L&T Biowatti Oy:n aikavälillä 1.7.2010–30.6.2011 toimittamista hakekuormista, eli se kattaa yhden kokonaisen kalenterivuoden. Tutkimusaineisto on saatu kokoon L&T Biowatti Oy:n tietojärjestelmästä tietyin hakuehdoin, joita selostan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Tutkimuksen perusjoukoksi valittiin neljään eri lämpö- ja voimalaitokseen toimitetut hakekuormat neljältä eri yrittäjältä. Tuotteista valittiin mukaan metsätähdehake, kokopuuhake sekä rankahake. Kaikki aineistossa mukana olevat tuotteet ovat tienvarsihaketettuja ja metsävarastoilta peräisin, eli eivät esimerkiksi terminaalista toimitettuja. Hakuun valittiin mukaan kuormista seuraavat tiedot:

- päivämäärä (milloin erä on toimitettu lämpö- ja voimalaitokselle)
- yrittäjä (kuljetusyrittäjän nimi)
- kuormakirja (kuormakirjan numero)
- vaakatosite
- toimittaja (metsävarasto, mistä puu on peräisin)
- asiakas (lämpö- ja voimalaitos)
- tuote (metsätähdehake, kokopuuhake, rankahake)
- kuorman tilavuus irtokuutiometreissä
- kuorman paino tonneissa
- työmaanumero
- kosteusprosentti (hakekuorman mitattu kosteusprosentti).

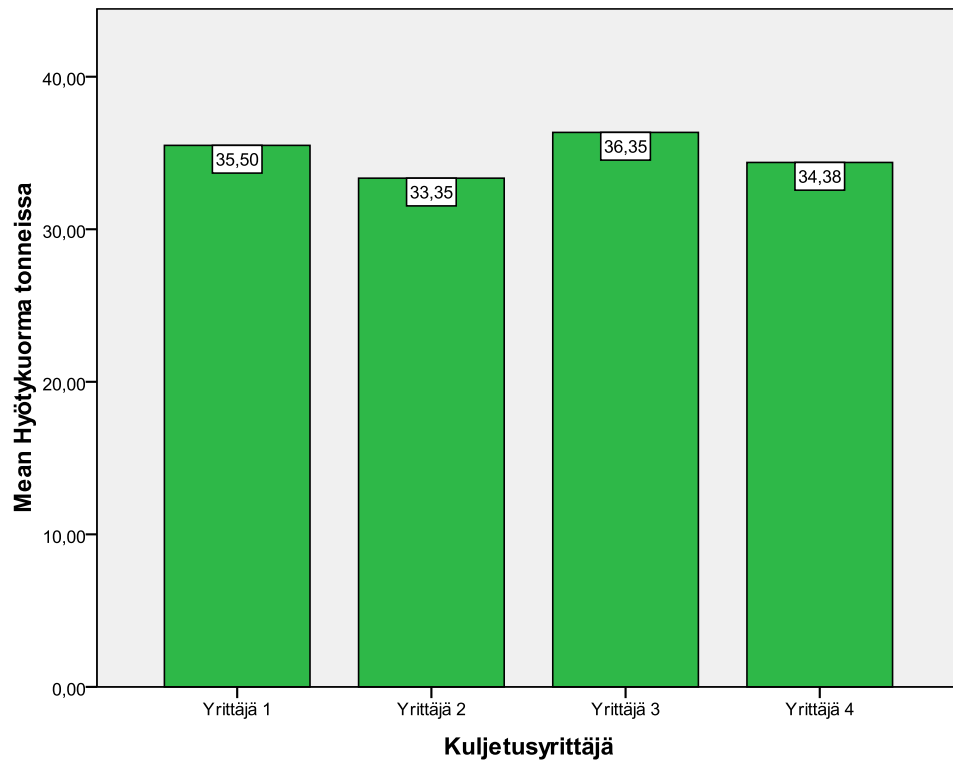
Haun tulokset siirrettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan. Aineistosta poistettiin sellaiset hakekuormat, jotka on toimitettu pelkällä vetoautolla ilman perävaunua. Tällöin puhutaan vetoautokuormista eli nuppikuormista. Karsinta tehtiin suodattamalla tilavuudeltaan alle 60 irtokuutiometrin kuormat aineistosta pois. Lopullisessa tutkimusaineistossa havaintoyksiköjä oli siis kaiken kaikkiaan 1428 kappaletta, joista jokainen vastaa yhtä hakekuormaa.

4.2 Kuljetuskalusto

Tutkimuksessa mukana olleiden kuljetusyrittäjien kuljetuskalustossa on eroja yrittäjittäin. Olennaiset erot tutkimuksen kannalta koskevat kuormatilavuutta sekä tyhjäpainoa, eli ajoneuvoyhdistelmän kokonaispainoa ilman kuormaa.

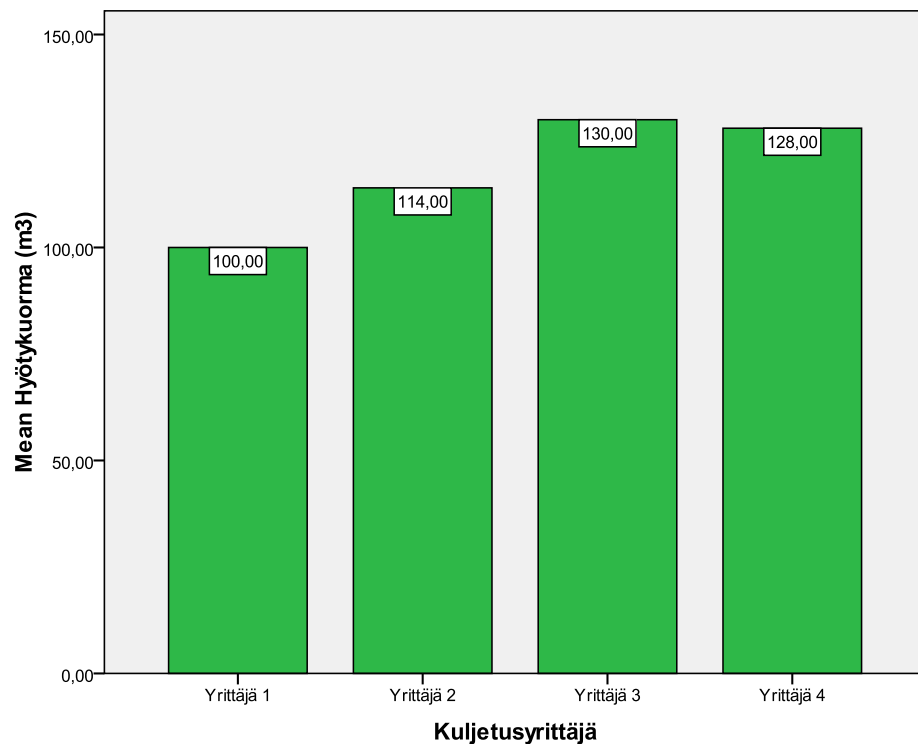
Suurin sallittu kokonaismassa kaikille ajoneuvoyhdistelmille on 60 tonnia, josta vähentämällä auton tyhjäpaino saadaan selville hyötykuorman enimmäismäärä. Kuormatilavuus tarkoittaa kuormatilan tilavuutta irtokuutiometreissä.

Kuvassa 13 on esitetty kuljetusyrittäjien autokaluston hyötykuorman enimmäismäärä tonneissa. Luvut ovat kunkin yrittäjän osalta keskiarvoja tai painotettuja keskiarvoja koko autokalustosta. Tiedot ovat peräisin L&T Biowatin operaatiopäällikkö Juho-Oskari Haukkalalta.



Kuva 13. Kuljetuskaluston hyötykuorman enimmäismäärä tonneissa yrittäjittäin.

Kuvassa 14 on esitetty kuljetusyrittäjien autokaluston kuormatilavuudet irtokuutiometreinä. Luvut ovat kunkin yrittäjän osalta keskiarvoja tai painotettuja keskiarvoja koko autokalustosta. Tiedot ovat peräisin L&T Biowatin operaatiopäällikkö Juho-Oskari Haukkalalta.



Kuva 14. Kuljetuskaluston kuormatilavuudet irtokuutiometreissä yrittäjittäin.

4.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus oli luonteeltaan kvantitatiivinen eli määrällinen tutkimus. Kvantitatiivinen tutkimus perustuu numeerisen tiedon keräämiseen ja sen tilastomatematiikkaan analyysiin. Tilastomatematiikkaan analyysin yhtenä tavoitteena on mahdollisimman selkeästi kuvata ja havainnollistaa havaintojoukkoa. Tutkimus toteutettiin kokonaistutkimuksena, eli koko perusjoukko tutkittiin. (Rantanen n.d.)

Aineiston ollessa siihen valittujen havaintoyksikköjen osalta lopullisessa muodossaan, laskettiin siihen vielä uusia muuttujia, eli tiedot kuormakohtaisista megawattitunneista, kuormakohtaisista megawattitunneista irtokuutiometriä kohden sekä kuormakohtaisista megawattitunneista tonnia kohden. Näiden muuttujien laskentaan tarvittiin luvussa 5.2.1. esiteltyjä laskentakaavoja.

Laskennassa asetettiin kuiva-aineen teholliseksi eli alemmaksi lämpöarvoksi 19 MJ/ kg kaikille kuormille. Tämä tehtiin siitä syystä, että laitospään vaikutus tuloksiin haluttiin poistaa ja tuloksista saatiin keskenään vertailukelpoisempia.

Kun saatiin laskettua tiedot yrittäjittäin keskimääräisistä kuormakohtaisista megawattitunneista, keskimääräisistä kuormakohtaisista megawattitunneista irtokuutiometriä kohden sekä keskimääräisistä kuormakohtaisista megawattitunneista tonnia kohden todellisilla kosteusprosentteilla, laskettiin niiden rinnalle vielä samat muuttujat sillä oletuksella, että kosteusprosentti olisi kaikille kuljetusyrittäjille sama. Kosteudeksi määritettiin 40,78 prosenttia, joka on kaikkien tutkimusaineistossa olevien kuormien keskimääräinen kosteusprosentti kahden desimaalin tarkkuudella.

Muuttamalla tehollinen lämpöarvo ja kosteusprosentti vakioksi saatiin kuorman punnitusta lukuun ottamatta poistettua käytännössä kokonaan laitos- ja metsäpään vaikutus kuorman energiasisällön määräytymiseen.

Lämpöarvo määritetään lämpö- ja voimalaitosten toimesta usein kuukausittain jokaiselle tuotteelle erikseen. Näin ollen voisi laitoksittain vaihteleva lämpöarvo heikentää tulosten vertailukelpoisuutta, kun halutaan laitoksesta riippumattomasti tarkastella kuljetusyrittäjien tuottavuutta.

Vakioimalla kosteusprosentti ja tehollinen lämpöarvo voitiin siis ajatella kuljetusyrittäjien ajavan kosteudeltaan ja lämpöarvoltaan samanlaista tuotetta sellaiseen toimitusosoitteeseen, jolla ei ole vaikutusta kuorman energiasisällön määräytymiseen.

Tutkimusaineiston tilastomatemaattinen käsittely tapahtui pääasiassa SPSS Statistics 17 -ohjelmalla, jolla luotiin myös kuvaajat. Exceltaulukkolaskentaohjelmaa käytettiin tutkimuksen alkuvaiheessa uusien muuttujien laskennassa. Graafisen tarkastelun ja keskilukujen tarkastelun lisäksi käytettiin keskiarvotestiä selvittämään saatujen tulosten tilastollista merkitsevyyttä. (Rantanen n.d.)

Välimatka- ja suhdeasteikollisia muuttujia voidaan testata keskiarvotestien, kuten t-testin avulla. Tässä tutkimuksessa näitä muuttujia olivat irtokuutiometrit, tonnit, kosteusprosentti, kuormakohtaiset megawattitunnit, kuormakohtaiset megawattitunnit irtokuutiota kohden sekä kuormakohtaiset megawattitunnit tonnia kohden. Nominaaliasteikollisista muuttujista tarkasteltiin niiden suhteellisia osuuksia. Nominaaliasteikollisia muuttujia olivat tässä tutkimuksessa kuljetusyrittäjä sekä tuote. (Puhakka 2005.)

Tutkimuksessa käytetty riippumattomien otosten t-testi valittiin siitä syystä, että se sopi parhaiten tilanteeseen, jossa halutaan vertailla pareittain toisistaan riippumattomia ryhmiä. Ryhmät, eli kuljetusyrittäjien toimittamat hakekuormat ovat toisistaan riippumattomia, sillä niillä ei ole mitään vaikutusta toisiinsa. (Mauranen & Puntila 1995.)

Riippumattomien otosten t-testin oletuksia ovat siis muuttujien normaali-jakautuneisuus sekä riippumattomat otokset. (Mauranen & Puntila 1995.) Testin pari muodostettiin yrittäjien 1 ja 3 välille, sillä niiden välinen ero oli testattavan muuttujan ja tutkimuksen tavoitteiden kannalta ehdottomasti merkittävin.

Myös muiden yrittäjien kesken muodostettiin parit ja testattiin tilastollinen merkitsevyys. Muiden paitsi yrittäjien 3 ja 4 sekä yrittäjien 1 ja 4 väliset erot todettiin tilastollisesti merkitseviksi tai erittäin merkitseviksi. Näitä testejä ei kuitenkaan edellisessä kappaleessa mainitsemistani syistä sisällytetty tähän opinnäytetyöraporttiin.

Ennen varsinaista testausta asetettiin hypoteesit. Nollahypoteesiksi asetettiin se, että muuttujien keskiarvojen välillä ei ole eroa. Vastahypoteesiksi asetettiin se, että muuttujien keskiarvojen välillä on eroa.

Riippumattomien otosten t-testin yhteydessä testataan myös, ovatko molempien osajoukkojen varianssit eli keskihajonnat yhtä suuret. Testauksen tulos vaikuttaa testisuureen valintaan.

Avainarvo tulkitessa SPSS:n tulostamaa t-testiä on testisuureen arvon ohella sen merkitsevyytaso, josta käytetään myös lyhenteitä p ja sig. Merkitsevyytaso mittaa tehdyn johtopäätöksen tilastollista luotettavuutta, toisin sanoen todennäköisyyttä tehdä virheellinen johtopäätös, kun nollahypoteesi hylätään. Opinnäytetöissä yleisesti käytetty merkitsevyytason raja on 0,05, eli virheellisen johtopäätöksen todennäköisyys on 5 prosenttia. (Puhakka 2005.)

4.3.1 Tutkimuksessa käytetyt laskentakaavat

Saapumistilassa olevan polttoaineen tehollinen lämpöarvo ($Q_{net, ar}$) lasketaan yhtälön 1 mukaisesti.

$$Q_{net, ar} = Q_{net, d} * \frac{100 - Mar}{100} - 0,02441 * Mar$$

Kaavassa $Q_{net, ar}$ on saapumistilaisen polttoaineen tehollinen lämpöarvo (MJ/ kg)

$Q_{net, d}$ on kuiva-aineen tehollinen eli alempi lämpöarvo (MJ/ kg). Tässä tutkimuksessa kaikkien kuormien teholliseksi lämpöarvoksi asetettiin 19 MJ/ kg.

Mar on vastaavan polttoaine-erän kokonaiskosteus saapumistilassa (%) painotettuna kostean polttoaineen massalla.

Toimitettu energiamäärä W lasketaan yhtälön 2 mukaisesti.

$$W = \frac{Q_{net, ar}}{3,6} * m$$

Kaavassa $\frac{Q_{net, ar}}{3,6}$ on saapumistilaisen tehollisen lämpöarvon (MJ/ kg) muunto yksiköihin MWh/ t.

m on toimitetun polttoaineen massa tonneissa. (Alakangas 2000.)

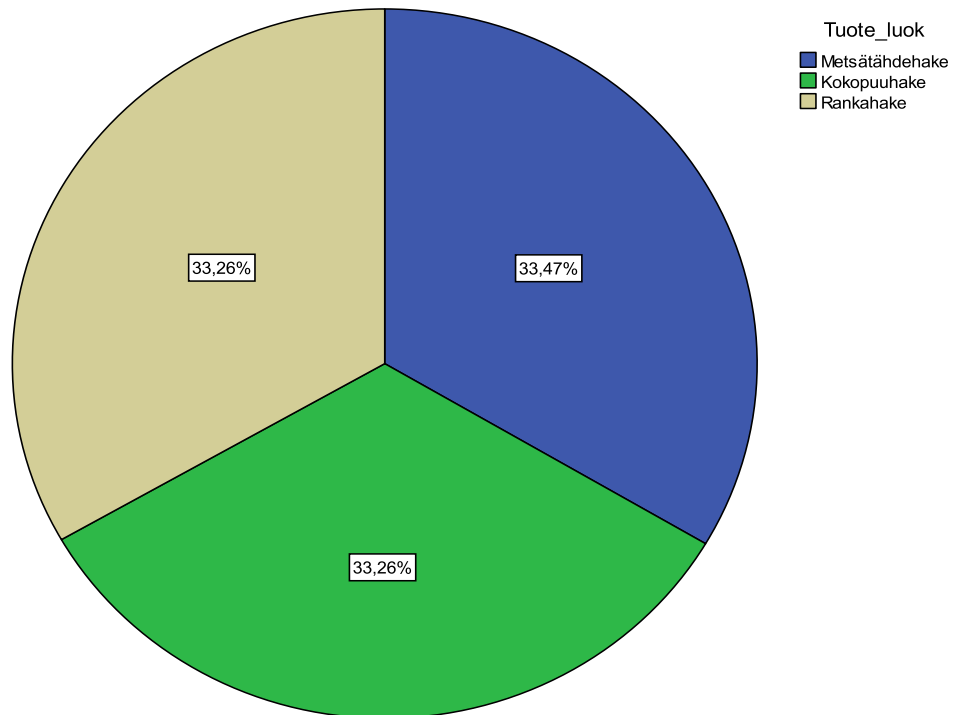
5 TULOKSET

Tässä luvussa on esitelty tutkimuksen tulokset. Tuloksiin liittyy myös luku keskiarvojen testauksesta, jossa on testattu tutkimuksen tavoitteiden kannalta merkittävimmän eron tilastollinen merkitsevyys.

5.1 Tuotteet ja kosteusprosentti tuotteittain

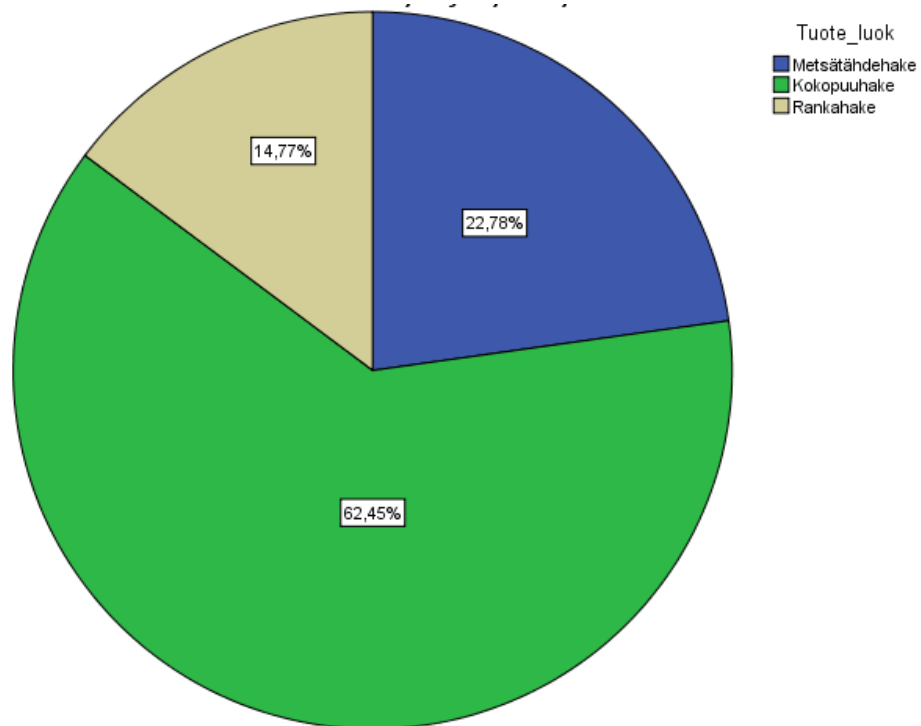
Seuraavassa luvussa esitellään kuljetusyrittäjien toimittamien eri tuotteiden eli metsätähdehakkeen, kokopuuhakkeen sekä rankahakkeen prosentuaalinen jakauma kaikista kuormista. Kappaleen lopussa on lisäksi taulukko tuotteiden keskimääräisistä kosteusprosentteista.

Yrittäjä 1 on kuljettanut metsätähdehaketta 33,47 prosenttia kaikista toimittamistaan kuormista, kokopuuhaketta 33,26 prosenttia ja rankahaketta 33,26 prosenttia (Kuva 15).



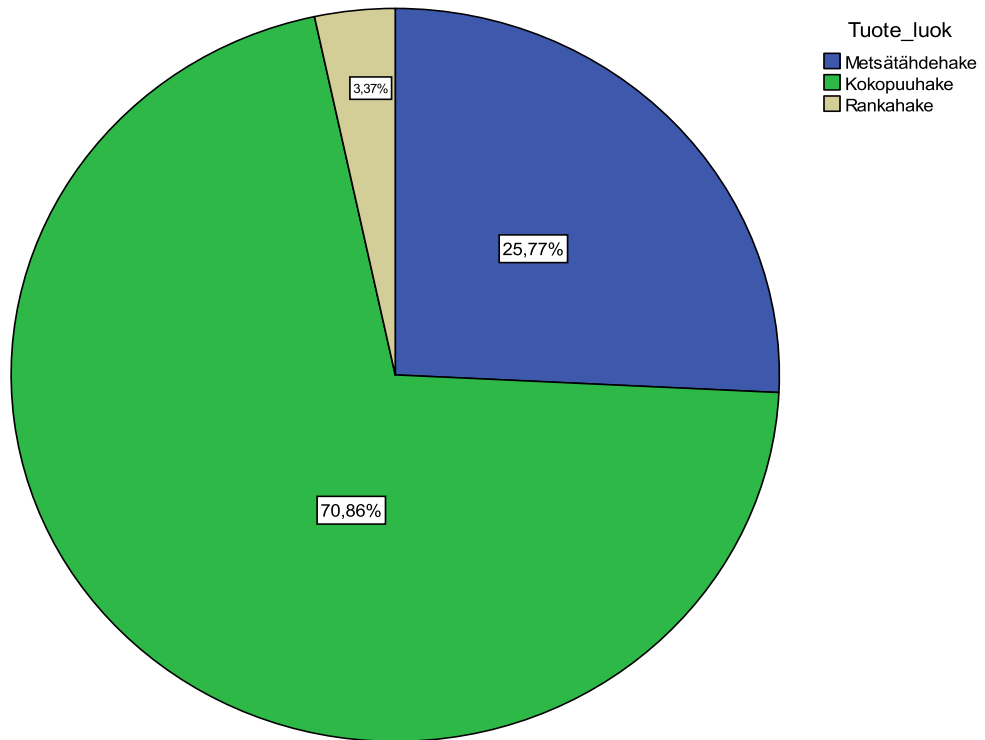
Kuva 15. Yrittäjän 1 kuljettamien tuotteiden prosentuaalinen jakauma

Yrittäjä 2 on kuljettanut metsätähdehakea 22,48 prosenttia kaikista toimittamistaan kuormista, kokopuuhakea 62,45 prosenttia sekä rankahaketta 14,77 prosenttia (Kuva 16).



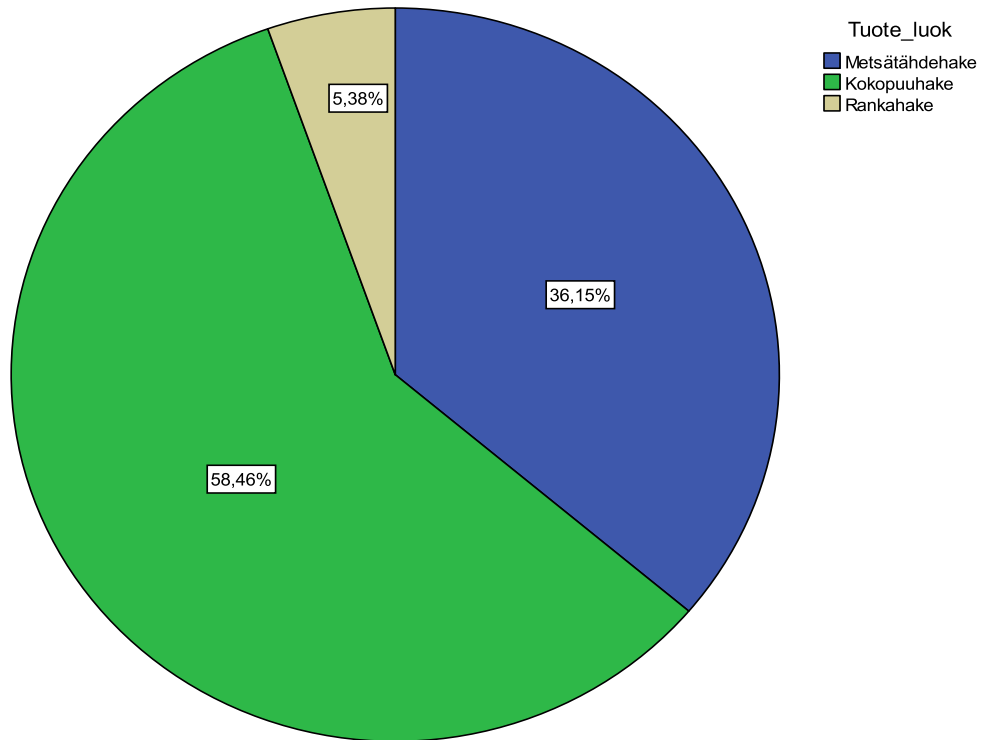
Kuva 16. Yrittäjän 2 kuljettamien tuotteiden prosentuaalinen jakauma

Yrittäjä 3 on kuljettanut metsätähdehakea 25,77 prosenttia kaikista toimittamistaan kuormista, kokopuuhakea 70,86 prosenttia sekä rankahaketta 3,37 prosenttia (Kuva 17).



Kuva 17. Yrittäjän 3 kuljettamien tuotteiden prosentuaalinen jakauma

Yrittäjä 4 on kuljettanut metsätähdehakea 36,15 prosenttia kaikista toimittamistaan kuormista, kokopuuhakea 58,46 prosenttia sekä rankahaketta 5,38 prosenttia (Kuva 18).



Kuva 18. Yrittäjän 4 kuljettamien tuotteiden prosentuaalinen jakauma

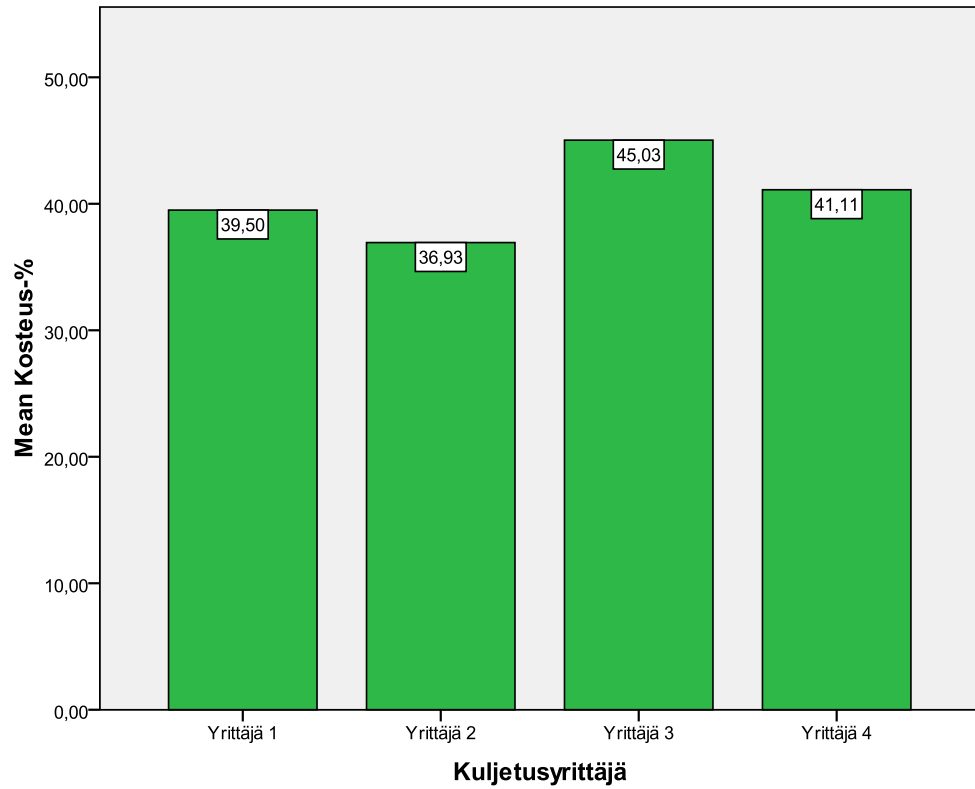
Metsätähdehakkeen keskimääräinen kosteus tutkimusaineistossa on noin 42,86 prosenttia, kokopuuhakkeen 38,96 prosenttia ja rankahakkeen 42,90 prosenttia (Taulukko 1).

Metsätähdehake	N	Valid	438
		Missing	0
	Mean		42,8595
Kokopuuhake	N	Valid	765
		Missing	0
	Mean		38,9595
Rankahake	N	Valid	225
		Missing	0
	Mean		42,8991

Taulukko 1. Keskimääräinen kosteusprosentti tuotteittain

5.2 Kosteusprosentti

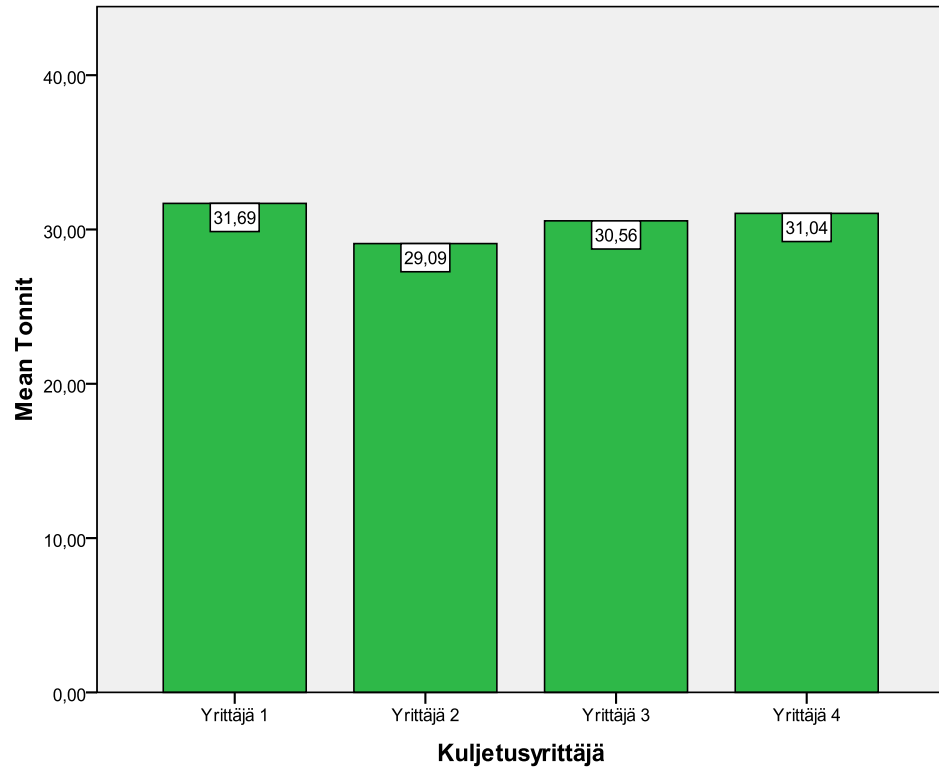
Yrittäjän yksi toimittamien hakekuormien keskimääräinen kosteusprosentti oli 39,50, yrittäjän kaksi 36,93 prosenttia, yrittäjän kolme 45,03 prosenttia ja yrittäjän neljä 41,11 prosenttia (Kuva 19).



Kuva 19. Hakekuormien keskimääräiset kosteusprosentit.

5.3 Paino tonneissa

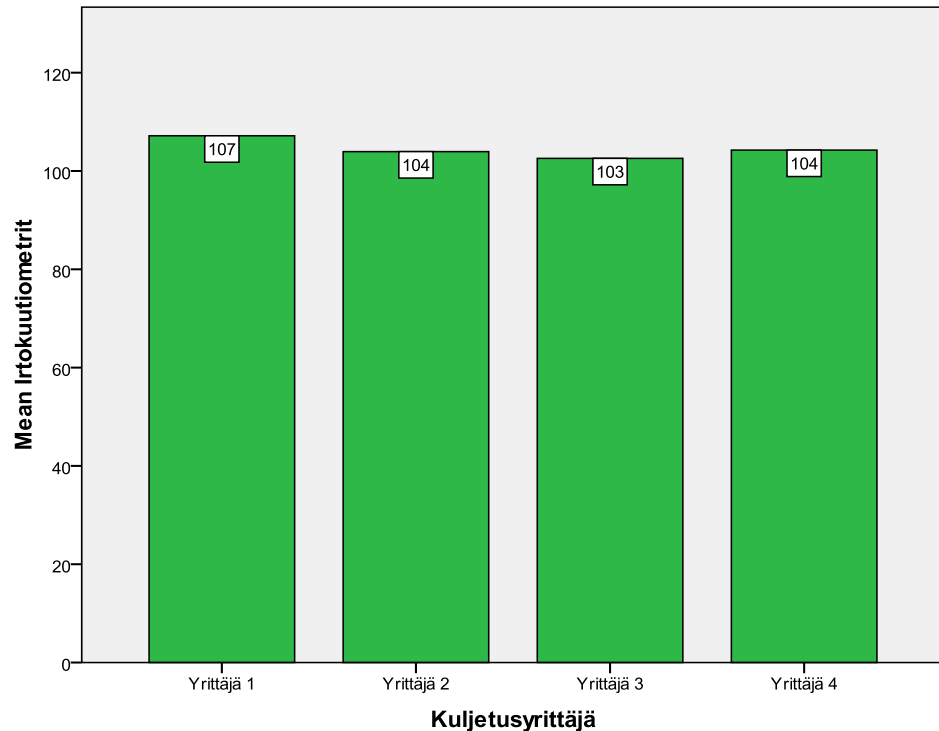
Yrittäjän yksi toimittamien hakekuormien keskimääräinen paino oli 31,69 tonnia, yrittäjällä kaksi 29,09 tonnia, yrittäjällä kolme 30,56 tonnia sekä yrittäjällä neljä 31,04 tonnia (Kuva 20).



Kuva 20. Hakekuormien keskimääräinen paino tonneissa.

5.4 Tilavuus irtokuutiometreissä

Yrittäjän yksi toimittamien hakekuormien keskimääräinen tilavuus irtokuutiometreissä mitattuna oli 107 irtokuutiometriä, yrittäjän kaksi 104 irtokuutiometriä, yrittäjän kolme 103 irtokuutiometriä sekä yrittäjän neljä 104 irtokuutiometriä (Kuva 21).



Kuva 21. Hakekuormien keskimääräiset irtokuutiometrit.

5.5 Energiasisältö

Tässä luvussa on esitetty tutkimuksessa saadut tulokset kuormakohtaisten-, irtokuutiometrikohtaisten- sekä tonnikohtaisten energiasisältöjen osalta.

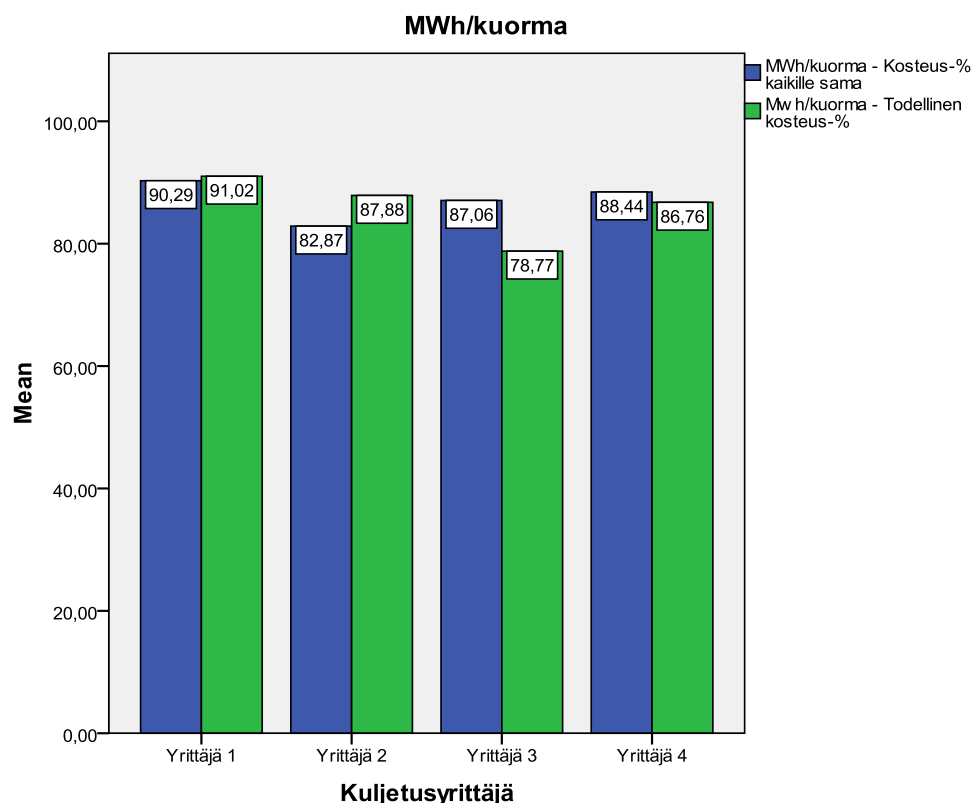
5.5.1 MWh/ kuorma

Luvussa on kuvattu kuormien keskimääräisiä energiasisältöjä yrittäjittäin kahdella tavalla (Kuva 22). Kuvaajan sininen palkki kuvaa energiasisältöä silloin, jos lämpöarvon lisäksi kosteusprosentti asetetaan vakioksi (40,78). Vihreä palkki puolestaan kuvaa energiasisältöä todellisilla kosteuslukemilla, ja siinä lämpöarvo on edelleen vakio (19 MJ/kg).

Vertailtaessa energiasisältöjä kuormittain vakioksi asetetulla kosteusprosentilla (sininen palkki) huomataan yrittäjän 1 kohdalla lukeman olevan 90,29 MWh, yrittäjällä kaksi 82,87 MWh, yrittäjällä kolme 87,06 MWh ja yrittäjällä neljä 88,44 MWh.

Kuvaajan sinisten palkkien tuloksia tarkasteltaessa tulee muistaa, että vaikka kosteusprosentti on asetettu vakioksi, on laskennassa käytetyt kuormien painot silti punnittu todellisilla kosteuksilla. Keskimääräistä kuivempaa haketta toimittaneiden yrittäjien tulokset ovat siis todellisuudessa suurempia kuin kuvaajassa. Keskimääräistä kosteampaa haketta toimittaneiden yrittäjien tulokset ovat vastaavasti todellisuudessa pienempiä.

Vertailtaessa energiasisältöjä kuormittain todellisilla kosteusprosentteilla (vihreä palkki) huomataan yrittäjän yksi kohdalla lukeman olevan 91,02 MWh, yrittäjällä kaksi 87,88 MWh, yrittäjällä kolme 78,77 MWh sekä yrittäjällä neljä 86,76 MWh. Yrittäjien 1 ja 3 välisen eron tilastollinen merkitsevyys on testattu keskiarvotestillä luvussa 5.6.



Kuva 22. Kuormien keskimääräinen energiasisältö megawattitunneissa.

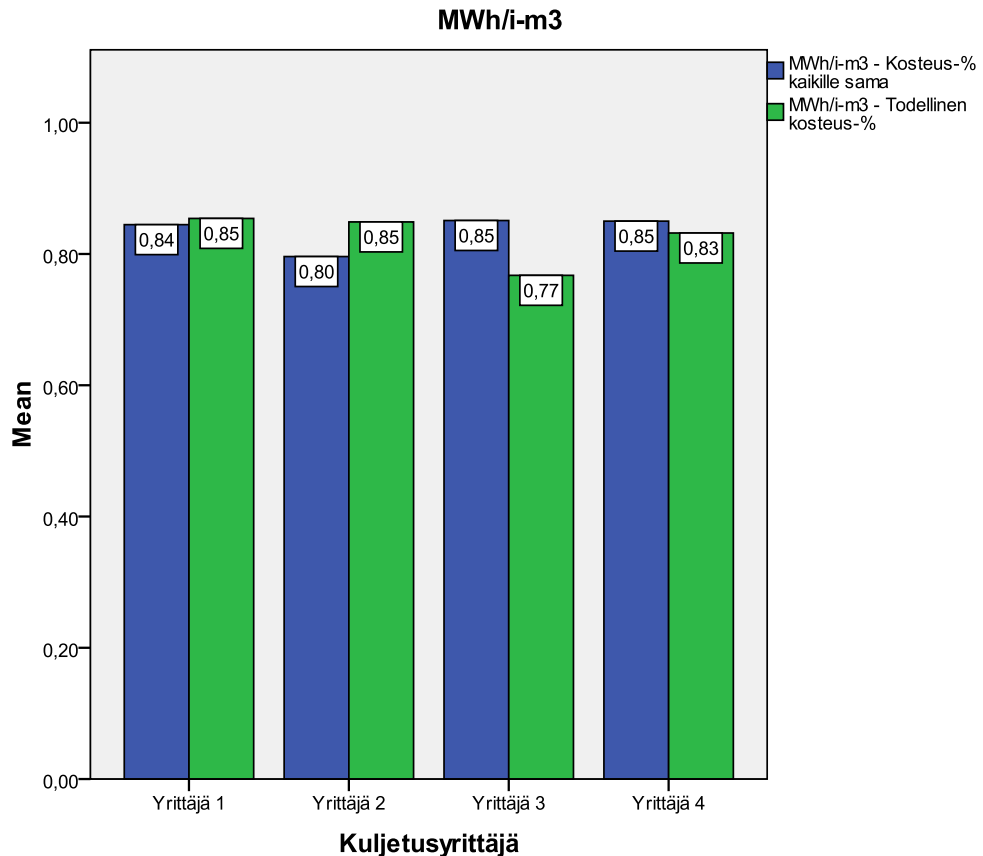
5.5.2 MWh/ irtokuutiometri

Tässä luvussa on kuvattu kuormien keskimääräisiä energiasisältöjä per irtokuutiometri haketta yrittäjittäin kahdella tavalla (Kuva 23). Kuvaajan sininen palkki kuvaa energiasisältöä silloin, jos lämpöarvon lisäksi kosteusprosentti asetetaan vakioksi (40,78). Vihreä palkki puolestaan kuvaa energiasisältöä todellisilla kosteuskilpimillä, ja siinä lämpöarvo on edelleen vakio (19 MJ/kg).

Vertailtaessa energiasisältöjä per irtokuutiometri haketta vakioksi asetetulla kosteusprosentilla (sininen palkki) huomataan yrittäjän yksi kohdalla

lukeman olevan 0,84 MWh/i-m³, yrittäjällä kaksi 0,80 MWh/i-m³, yrittäjällä kolme 0,85 MWh/i-m³ ja yrittäjällä neljä 0,85 MWh/i-m³.

Vertailtaessa energiasisältöjä per irtokuutiometri haketta todellisilla kosteusprosentteilla (vihreä palkki) huomataan yrittäjän yksi kohdalla lukeman olevan 0,85 MWh/i-m³, yrittäjällä kaksi 0,85 MWh/i-m³, yrittäjällä kolme 0,77 MWh/i-m³ ja yrittäjällä neljä 0,83 MWh/i-m³.



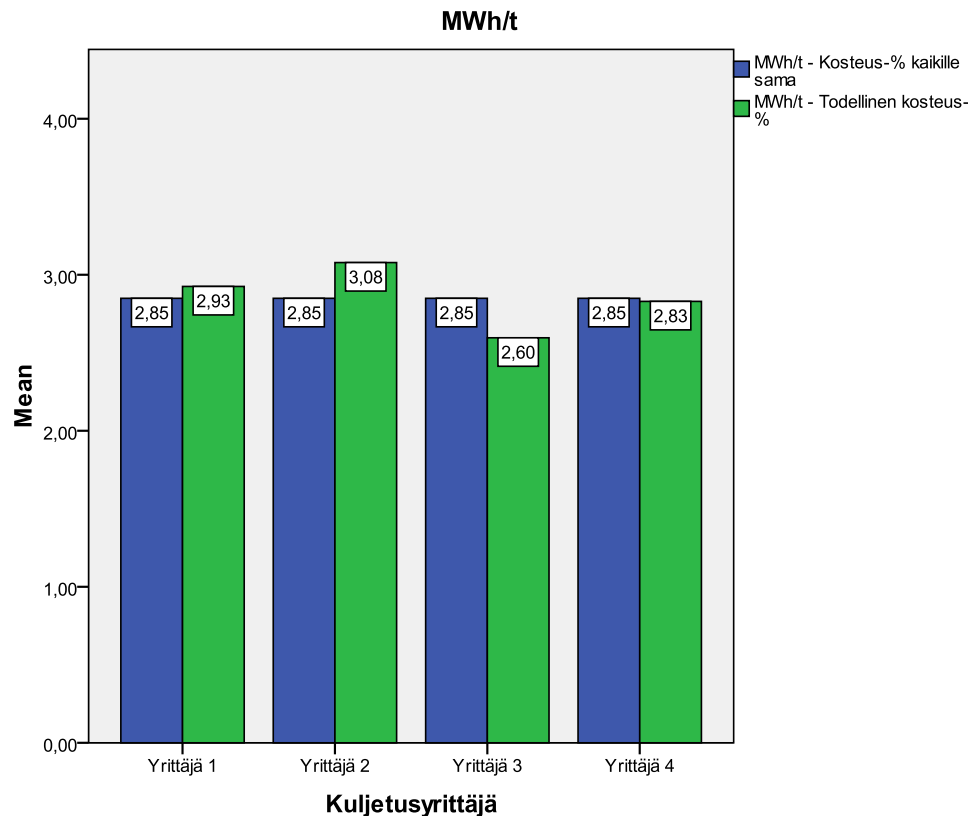
Kuva 23. Kuormien keskimääräinen energiasisältö megawattitunneissa irtokuutiometriä kohden.

5.5.3 MWh/ tonni

Luvussa on kuvattu kuormien keskimääräisiä energiasisältöjä per tonni haketta yrittäjittäin kahdella tavalla (Kuva 24). Kuvaajan sininen palkki kuvaa energiasisältöä per tonni silloin, jos lämpöarvon lisäksi kosteusprosentti asetetaan vakioksi (40,78). Lukemissa ei yrittäjien kesken luonnollisesti ole eroa, sillä jos kosteusprosentti ja lämpöarvo ovat kaikille samoja, ei eroa tässä vertailussa pääse syntymään. Vihreä palkki puolestaan kuvaa energiasisältöä tonnia kohden todellisilla kosteuslukemilla, ja siinä lämpöarvo on vakio (19 MJ/kg).

Vertailtaessa energiasisältöjä tonnia haketta kohden todellisilla kosteusprosentteilla (vihreä palkki) huomataan yrittäjän yksi kohdalla lukeman

olevan 2,93 MWh/t, yrittäjällä kaksi 3,08 MWh/t, yrittäjällä kolme 2,60 MWh/t ja yrittäjällä neljä 2,83 MWh/t.



Kuva 24. Kuormien keskimääräinen energiasisältö megawattitunneissa tonnia kohden.

5.6 Keskiarvojen testaus

Riippumattomien otosten t-testillä haluttiin selvittää, onko yrittäjien 1 ja 3 toimittamien hakekuormien keskimääräisissä energiasisällöissä hakkeen kosteuden ollessa kaikille sama tilastollisesti merkitsevää eroa, vai johtuu-ko ero satunnaisvaihtelusta. Nollahypoteesi on, että yrittäjien välillä ei ole eroa ja vastahypoteesi on, että yrittäjien välillä on eroa.

Keskiarvot halutaan testata juuri yrittäjien 1 ja 3 osalta siksi, että kyseisten yrittäjien kohdalla havaittiin kuljetuskapasiteetti huomioon ottaen silmiin pistävin ero toimitetuissa energiasisällöissä.

Yrittäjän 3 kuljetuskapasiteetti on niin kuormatilavuuden kuin enimmäishyötykuorman osalta suurin. Yrittäjän 1 kuormatilavuus taas on pienin ja enimmäishyötykuorman määrä toiseksi suurin. Näistä lähtökohdista huolimatta yrittäjä 1 toimittaisi kuvion 17 mukaan enemmän energiaa kuormaa kohden siinäkin tapauksessa, että hake olisi kaikille yhtä kosteaa.

Yrittäjän 1 toimittamien hakekuormien määrä on 475 kappaletta ja niiden energiasisältö megawattitunneissa on ollut keskimäärin noin 90,3. Yrittäjän 3 toimittamien hakekuormien määrä on 326 kappaletta ja niiden energiasisältö megawattitunneissa on ollut keskimäärin noin 87,1. Keskiarvo-

jen välillä siis näyttäisi olevan eroa. Keskihajonnat ovat lähellä toisiaan. (Taulukko 2)

Taulukko 2. Yrittäjien 1 ja 3 toimittamien hakekuormien keskimääräinen energiasisältö jos hakkeen kosteus on kaikille sama, energiasisältöjen keskihajonnat ja keskiarvon keskivirheet.

	Kuljetus- yrittäjä	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
MWh/kuorma - Kosteus-%	Yrittäjä 1	475	90,2878	17,14026	,78645
kaikille sama	Yrittäjä 3	326	87,0648	18,70398	1,03592

Riippumattomien otosten t-testissä on ensin testattu, ovatko ryhmien varianssit tarpeeksi lähellä toisiaan. Nollahypoteesina on, että varianssit ovat yhtä suuret ja vastahypoteesina on, että ne eivät ole yhtä suuret. Koska Sig. = 0,078 (>0,05), säilyy nollahypoteesi voimassa eli varianssit ovat yhtä suuret. Nyt tulkinta tehdään siis taulukon yläosasta Equal variances assumed (Taulukko 3).

Testi tehdään kaksisuuntaisena, sillä hypoteesissa ei ole arvioita poikkeaman suunnasta. Keskiarvojen erojen tilastollista merkitsevyyttä osoittava Sig. (2-tailed) on 0,012. Voidaan siis tehdä johtopäätös, että yrittäjien 1 ja 3 toimittamien kuormien energiasisällöissä megawattitunneissa on tilastollisesti merkitsevä ero 5 prosentin merkitsevyytasolla. (Taulukko 3)

Kuten luvussa 5.5.1. on mainittu, vaikka kosteusprosentti on asetettu vakioiksi, on laskennassa käytetyt kuormien painot silti punnittu todellisilla kosteuksilla. Yrittäjien 1 ja 3 välisen eron tilastollinen merkitsevyys on siis todellisuudessa jopa suurempi kuin testin osoittama, sillä yrittäjä 3 on toimittanut kosteampaa haketta kuin yrittäjä 1 (luku 5.2.). Kosteampi hake painaa enemmän kuin kuiva hake.

Taulukko 3. Keskiarvotesti yrittäjien 1 ja 3 toimittamien hakekuormien keskimääräistä energiasisällöistä, jos hakkeen kosteus on kaikille sama.

Independent Samples Test								
	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means					
							95% Confidence interval of the Difference	
	F	Sig.	Sig. (2-tailed)	t	Std. Error Difference	Lower	Upper	
Equal variances assumed MWh/ku orma – kosteus-% kaikille sama	3,123	0,078	0,012	11,187	1,2797	0,71095	5,7349	
			0,013	11,179	1,30063	0,66904	5,777	

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuljetusyrittäjien autokalusto asettaa omat rajoituksensa sille, kuinka suuria kuormia tai kuinka monta megawattituntia energiaa autoilla voidaan lähtökohtaisesti kuljettaa. Ajoneuvoyhdistelmät ovat eri painoisia, mutta kullekin yhdistelmälle lain asettama suurin sallittu kokonaismassa on 60 tonnia. Kuormatilavuuden suuruudelle ei ole laissa määritettyä ylärajaa, mutta ajettavuus ja kuormattavuus asettavat sille kuitenkin rajansa.

Mikäli tienvarsivarasto saadaan haketettua tyhjäksi ja kuorma jää vajaaksi, siirrytään normaalikäytännön mukaisesti seuraavalle varastolle jossa kuorma haketetaan täyteen. Kun vetoautokuormat on karsittu tutkimusaineistosta pois, tulisi siis kaikkien toimitettujen kuormien olla täysiä joko kuormatilavuuden tai kantavuuden osalta.

Kostea hakea kuljettaessa kuorman suurin sallittu kokonaismassa 60 tonnia täytyy ennen kuormatilavuutta. Kuivalla hakkeella tilanne on usein päinvastainen, eli kuormatila täyttyy vaikka painorajoitus ei vielä tulisi-kaan vastaan.

Luvussa 4.2. esitellään kuljetusyrittäjien autokaluston hyötykuorman enimmäismäärä sekä kuormatilavuudet. Kun vertaillaan näitä tietoja toimitettujen kuormien painoihin luvussa 5.3., nähdään, että kunkin yrittäjän kohdalla on jääty muutaman tonnin päähän lain asettamasta kuorman suurimmasta sallitusta kokonaismassasta.

Kuormatilavuus vaikuttaa siis keskimäärin olevan rajoittavampi tekijä kuin kuorman suurin sallittu kokonaismassa. Metsähakkeen raaka-aineen kuivatuksella ennen kaukokuljetusta on suora vaikutus asiaan. Vaikutusta voidaan ajatella olevan myös hakkurityypillä sekä haketuksessa käytetyllä seulalla, sillä mitä pienempiä hakelastut ovat sitä tiiviimpään ne mahtuvat. Lisäksi hakkeen kuormauksella on vaikutusta, sillä mitä tehokkaammin hake kuormaan puhalletaan, sitä tiiviimpään se yleensä asettuu.

Yrittäjällä 3 on ajatettu kosteinta hakea (luku 5.2.) ja tämän kuljetuskaluston kuljetuskapasiteetti on niin kuormatilavuuden kuin enimmäishyötykuormankin osalta suurin. Silti kuormien keskimääräinen paino tonneissa on toiseksi alin. Muut yrittäjät ovat ajaneet täydempiä kuormia ja hyödyn-äneet pienemmän kuljetuskapasiteettinsa paremmin. Vaikka yrittäjien 1 ja 4 toimittama hake on ollut kuivempaa eli kevyempää, on kuormien keskimääräinen paino tonneissa ollut silti suurempi kuin yrittäjällä 3.

Yrittäjän 1 autokalustossa on pienin kuormatilavuus, mutta kuljettajien tekemien arvioiden mukaan tämä on kuitenkin toimittanut eniten irtokuutiometrejä kuormaa kohden. Yrittäjän 1 toimittamien kuormien paino tonneissa on lisäksi ollut korkein, vaikka se on toimittanut toiseksi kuivinta hakea.

Kuten luvusta 5.5.1. nähdään, yrittäjä 1 on toimittanut myös eniten megawattitunteja kuormaa kohden. Kyseinen yrittäjä toimittaisi eniten mega-

wattitunteja kuormaa kohden myös silloin, kun hake olisi lämpöarvon lisäksi myös kosteusprosentin osalta kaikille samanlaista. Yrittäjä 1 hyödyntää toisin sanoen kuljetuskapasiteettinsa vertailluista yrittäjistä parhaiten.

Yrittäjien 1 ja 3 välinen ero kuormien energiasisältöjen keskiarvoissa hakkeen ollessa lämpöarvon lisäksi myös kosteudeltaan kaikille samanlaista on testattu keskiarvotestillä luvussa 5.6. Testi osoitti eron olevan tilastollisesti merkitsevä. Tilastollinen merkitsevyys on todellisuudessa jopa suurempi kuin testin osoittama, sillä energiamäärä on laskettu todellisten kosteuspitoisuuksien punnitustuloksilla eikä vakioksi asetetun kosteusprosentin punnitustuloksilla.

Metsähakkeen raaka-aineesta johtuvat erot eivät ilmiötä selitä, sillä kuten luvusta 5.1. nähdään, on yrittäjä 1 toimittanut rankahaketta kolmanneksen kaikista toimittamistaan kuormista. Muut yrittäjät ovat toimittaneet rankahaketta reilusti vähemmän.

Karsitusta rangasta valmistettu hake, rankahake, ei sisällä oksia ynnä muuta pienikokoista puuainesta yhtä paljon kuin metsätähteestä tai kokopuusta valmistettu hake. Näin ollen myös siitä valmistetussa hakkeessa on hienoainesta vähemmän. Hienoaines hakkeen joukossa parantaa sen tiiviyyttä.

Toiseksi eniten megawattitunteja kuormaa kohden ajaa yrittäjä 2, mikä selittyy sillä, että sen ajama hake on kuivinta. Yrittäjän 3 ajama hake on kosteinta, joten siinä on myös vähiten megawattitunteja kuormaa kohden.

Mikäli hake olisi lämpöarvon lisäksi myös kosteudeltaan kaikille samanlaista, määräytyisi kuormakohtainen energiasisältö suoraan kuorman painon mukaan. Tällöin painavimpia kuormia ajava yrittäjä olisi tuottoisin ja kevyimpiä kuormia ajava vähiten tuottoisin.

Tieto irtokuutiometreistä kuormaa kohden (luvussa 5.4.) on tienvarsivarastolla silmämääräisesti tehty arvio. Operaatiopäällikkö Juho-Oskari Haukkanen mukaan käytännössä hakkurikuljettaja korkeammalla työskennellessään ilmoittaa autokuljettajalle kuorman tilavuuden kuormatilan vesitilavuuteen perustuen. Kuljettajien tulisi osata arvioida myös kuorman tiivistymisen vaikutus.

Luvussa 5.5.2. esitetyt tulokset irtokuutiometrin sisältämästä energiamäärästä mikäli hake olisi kaikille yhtä kosteaa, kertoo, että yrittäjän 2 toimittamissa hakekuormissa olisi vähiten megawattitunteja irtokuutiometriä hakea kohden.

Yrittäjä 2 on toimittanut kuivinta hakea. Kuiva hake ei asetu kuormaan yhtä tiiviisti kuin kosteampi hake, joka voisi selittää eron. Toinen vaihtoehto on, että yrittäjä 2 arvioi kuormiensa irtokuutiometrimääräisen sisällön liian suureksi. Irtokuutiometrin sisältämä energiamäärä nimittäin on saatu jakamalla megawattitunnit irtokuutiometreillä.

Yrittäjän 3 toimittamien kuormien todellinen energiasisältö irtokuutiometriä kohden on alin, joka on looginen tulos, sillä sen toimittama hake on ollut kosteinta. Yrittäjän 4 toimittama hake on ollut toiseksi kosteinta ja samasta syystä energiasisältö irtokuutiometriä kohden on toiseksi alin.

Kosteusprosentin vaihtelua yrittäjittäin selittää alueellinen vaihtelu. Esimerkiksi yrittäjällä 2 ajatetaan kuivempia hake-eriä kuin muilla yrittäjillä, sillä tämä toimittaa haketta pienehköön lämpölaitokseen. Mitä pienempi lämpölaitos, sitä kuivempaa haketta se vaatii. Vastaavasti yrittäjällä 3 ajatetaan hake-eriä isoon lämpö- ja voimalaitokseen, jossa sallitaan hakkeessa suurempia kosteuspitoisuuksia.

Kuormien keskimääräisistä painoista ei kuljetuskaluston lähtökohtaisen kuljetuskapasiteetin ja hakkeen toimituspaikan eroista johtuen tule siis vetää suoria johtopäätöksiä yrittäjien tuottavuudesta. Kuivempi hake on kevyempää kuin kosteampi hake.

Yhden haketonnin sisältämä energia (luvussa 5.5.3.) on yrittäjällä 2 korkein, sillä sen toimittama hake on kuivinta. Yrittäjä 3 on tuottanut vähiten megawattitunteja tonnia kohden. Tulosta tukee tieto siitä, että kyseisen yrittäjän toimittama hake on ollut kosteinta.

Mikäli hake olisi lämpöarvon lisäksi myös kosteusominaisuuksiltaan kaikille samanlaista, toimittaisivat kaikki yrittäjät tonnia kohden saman verran energiaa. Tämä johtuu siitä, että yllä mainitussa tilanteessa ainut vaikuttava tekijä hakkeen energiasisällön määräytymiseen olisi kuorman punnittu massa.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Metsähakkeen energiasisältöön voidaan vaikuttaa monella tavalla. Tärkeimpänä toimena energiasisällön parantamiseksi voidaan pitää metsähakkeen raaka-aineen kuivattamista. Kun ylimääräinen kosteus saadaan raaka-aineesta pois, paranee sen energiasisältö ja kuljetus tehostuu.

Metsähakkeen tuotannon jokainen työvaihe sisältää toimia, jotka oikein tekemällä voidaan edesauttaa laadukkaan ja energiasisällöltään hyvän lopputuotteen valmistumista. Luvussa 2.2. on esitelty logistinen ketju työvaiheittain ja nostettu esille asioita, joilla on kussakin vaiheessa vaikutusta metsähakkeen energiasisältöön.

Tämä tutkimus painottui logistisen ketjun loppupäähän eli kaukokuljetukseen. Kuljetusvaiheessa ei niinkään voida enää vaikuttaa hakkeen sisältämään energiaan, vaan koko kuorman energiasisältöön. Mahdollisimman täydet kuormat riippumatta raaka-aineen sisältämästä energiasta takaavat kunkin kuorman kohdalla aina mahdollisimman suuren energiasisällön.

Tutkimuksen tavoitteet täyttyivät osittain. Kuljetusyrittäjien väliset erot tuottavuudessa saatiin selville ja osaan niiden syistä löydettiin vastaus. Yrittäjien 2 ja 4 osalta autokaluston kuljetuskapasiteetti ja kosteusprosentin vaihtelu selittää erot toimitetuissa kuormakohtaisissa megawattitunneissa.

Yrittäjä 1 taas toimittaa kuormassa energiaa enemmän kuin mitä sen autokaluston kuljetuskapasiteetista voisi etukäteen päätellä. Yrittäjän 3 osalta tilanne on päinvastainen. Sen tulisi kuljetuskaluston puolesta olla vertailun kärjessä.

Johtopäätöksissä esiin nousseet erot kuljetuskapasiteetin hyödyntämisessä yrittäjittäin ovat merkille pantavia asioita. Tulee selvittää, onko kuljetusten ohjauksessa tai yrittäjän 3 toiminnassa jotain sellaista, mihin puuttumalla autokaluston suuri kantavuus ja kuormatilavuus saadaan paremmin hyödynnettyä.

Niin ikään yrittäjän 1 hyvän tuottavuuden ja kuljetuskapasiteetin syitä tulee selvittää ja antaa sille kiitosta. Parhaassa tapauksessa yrittäjän 1 toiminnassa ja käytännöissä on jotain sellaista, jota soveltamalla saadaan muidenkin yrittäjien tuottavuutta parannettua.

Kuljetusyrittäjien autokaluston erot kuljetuskapasiteetissa niin kuormatilavuuden kuin kantavuudenkin osalta tulisi logistiikassa huomioida aina mahdollisuuksien mukaan.

Milloin alueellinen sijoittuminen sen sallii, tulisi suurilla kuormatilavuuksilla varustetuilla hakeautoilla ajattaa mahdollisimman paljon kuivia hake-eriä. Autoilla, joiden kantavuus on suuri ja kuormatilavuus pieni tulisi taas ajattaa kosteampia hake-eriä.

Tutkimuksen tuloksia voi hyödyntää L&T Biowatti Oy:n ja sen yhteistyöyrittäjien toiminnan kehittämisessä. Kuljetusyrittäjien kuljetuskaluston vaihtuminen ja uudistuminen tulee tuloksia myöhemmin tarkastellessa ottaa huomioon.

Metsähakkeen autokuljetuksesta aiheutuvat kustannukset vaikuttavat suoraan puunhankinnan kokonaiskustannuksiin ja puustamaksukykyyn. Toiminnan tehostaminen ja seuranta on siis tässäkin työvaiheessa järkevää niin metsänomistajan, kuljetusyrittäjän, voimalaitosasiakkaan kuin hakkeentoimittajankin kannalta.

LÄHTEET

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Otamedia Oy, Espoo. VTT Tiedotteita 2045.

Energiapuun varastointiohje. Metsäenergian uudet mahdollisuudet 2008-2010. N.d. Metsäkeskus Keski-Suomi.

Evttek (nykyinen Metropolia). 2006. Viitattu 8.11.2011.
http://nww.evttek.fi/n/erkkir/kemiabio/49_pommikalorimetri/

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Teknologiaraportti 5/2004.

Haukkala, J-O. 2011. Operaatiopäällikkö. L&T Biowatti Oy. Henkilökohdainen tiedonanto 5.12.2011.

Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi. Yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. VTT:n raportti nro VTT-R-07261-09.

Jätelaitosyhdistys. N.d. Energiahyödyntäminen – leijupetipoltto. Viitattu 1.11.2011
<http://www.jly.fi/energia32.php?treeviewid=tree3&nodeid=32>

Kiema, M., Pasanen, K. & Parviainen, J. 2005. iEnvironment2 – Biolog. Bioenergian logistiikka. Loppuraportti. Kuopion yliopisto. Tekes.

Knuuttila, K. 2003. Puuenergia. Jyväskylän Teknologiatekes Oy. Gummerus Kirjapaino Oy.

Koistinen, T. 2010. Metsähakkeen määrä- ja laatumittausten virheiden tarkastelu logistisessa ketjussa sekä niiden vaikutus hakkeen toimitus- ja hankintakustannuksiin. Itä-Suomen yliopisto. Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. Metsätieteen Pro Gradu.

Kärhä, K. 2008. Metsähakkeen tuotantoprosessikuvaukset. Metsätehon tuoskalvosarja 3/2008. Metsäteho Oy.

Lauhanen, R., Laurila, J. 2007. Bioenergian tuotannon haasteet ja tutkimustarpeet. Metlan työraportteja 42. PDF-tiedosto. Viitattu 30.10.2011.
<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp042.pdf>

Lepistö, T. & Viirimäki, J. 2010. Laatuhaakkeen tuotanto-opas. Metsäkeskukset. Sastamala: Vammaspaino. ISBN: 978-951-98723-6-0. PDF-tiedosto. Viitattu 10.10.2011.
<http://www.puulakeus.net/docs/109-FsT-laatuhaakeopas.pdf>

Lähdevaara, H., Savolainen, V., Paananen, M. & Vanhala, A. 2010. Mailta ja mannuilta, soilta ja saloilta. Selvitys Keski-Suomen biomassakuljetusten logistiikasta. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 107.

L&T Biowatti Oy. 2011. Puusta puhdasta energiaa. Yritysesittely. [Yrityksen sisäinen verkkolevy] Viitattu 22.12.2011.

Mauranen, K., Puntila, E. 1995. Biostatistiikka. Kuopion yliopisto. Viitattu 20.10.2011.

<http://www.uku.fi/~mauranen/bis/bis1toc.html>

Metsavastaa.net. 2010. Suomi energiapuun hyödyntämisen kärkimaita. Viitattu 9.10.2011.

<http://www.metsavastaa.net/perustietoa-energiapuusta>

Opetushallitus. N.d. Kvantitatiivisia analyyssimenetelmiä. Viitattu 8.11.2011.

<http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/kemia/labra/kvantti.html>

Puhakka, V. 2005. Tutkimusmenetelmät. Kvantitatiivisen aineiston käsittely – analysointimenetelmiä. PDF-tiedosto. Viitattu 20.10.2011.

http://www.tol.oulu.fi/kurssit/tutkimusmenetelmat/Tutkimusmenetelmat26_9.pdf

Puulakeus.net. 2006. Puu. Viitattu 9.10.2011

<http://www.puulakeus.net/111.html>

Ranta, T. 2010. Metsäenergian tehokkaat kuljetusmuodot. LUT Energia. PDF-tiedosto. Viitattu 30.10.2011.

http://www.kainuu.fi/UserFiles/kylateemaohjelma/File/8%20T_%20Ranta.pdf

Rantanen, P. n.d. Kvantitatiivinen metodologia verkossa. Perusteiden keräys. Helsingin yliopisto. PDF-tiedosto. Viitattu 20.10.2011.

https://www.edu.helsinki.fi/svy/kvanti/perusteet/mat/perusteet_oppim.pdf

Tilastokeskus. 2011. Liitetaulukko 10. Keskimääräinen kuljetusmatka ja kuormausaste kotimaan liikenteessä tavaralajeittain vuonna 2010. Viitattu 30.10.2011.

http://www.stat.fi/til/kttav/2010/kttav_2010_2011-05-26_tau_010.fi.html

Ylitalo, E. 2011. METLA. Metsätilastotiedote 16/2011. Puun energiakäyttö 2010. Viitattu 9.10.2011.

<http://www.metla.fi/tiedotteet/metsatilastotiedotteet/2011/puupolttoaine2010.html>

