



**HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI**

**HAKKUUTÄHTEEN FAST TRACK -HANKINNAN
KANNATTAVUUS JA MAHDOLLISUUDET**

Jyrki-Pekko Kinnunen
Maisteritutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden laitos
Metsäteknologia
5/2016

Tiedekunta - Fakultet - Faculty Maatalous- ja Metsätieteellinen tiedekunta		Laitos - Institution - Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä - Författare - Author Jyrki-Pekko Kinnunen			
Työn nimi - Arbetets titel Hakkuutähteen fast track -hankinnan mahdollisuudet ja kannattavuus			
Oppiaine - Läroämne - Subject Metsäteknologia			
Työn laji/ Ohjaaja - Arbetets art/Handledare - Level/Instructor Pro gradu -tutkielma / Lauri Sikanen, Veli-Pekka Kivinen		Aika - Datum - Month and year 5 / 2016	Sivumäärä - Sidoantal - Number of pages 56+4
Tiivistelmä - Referat - Abstract <p>Tutkielma on osa Luonnonvarakeskuksen, Cleen Oy:n sekä FIBIC Oy:n yhteistyöhanketta Tulevaisuuden kestävä bioenergiaratkaisut (BEST). Tutkimuksessa tuodaan ensimmäistä kertaa esille uusi tienvarsihaketusketjuun perustuvaa hakkuutähteen hankintamuoto, jossa keväällä, kesällä ja syksyllä syntyvä hakkuutähte ohjataan kuivaamatta suoraan polttoon. Tavoitteena oli arvioida fast track -hankintaketjun kustannusvaikutuksia nykyisessä hankintaympäristössä sekä tunnistaa sen merkittävimmät kustannuksiin vaikuttavat tekijät. Työssä selvitettiin, onko hankintayrityksen mahdollista pienentää hankintakustannuksia ohjaamalla hakkuutähtehake työlajiperusteisesti käyttöpaikalle.</p> <p>Aineistona käytettiin BEST-hankkeessa mukana olevan suuren bioenergia-alan toimijan kuusivaltaisten uudistushakkuuleimikoiden tietoja. Lisäksi laskennassa apuna käytettiin tämän hetken uusimpia laskentamalleja ja laskennan kannalta oleellisia tilastotietoja ja tutkimustuloksia. Aineiston pohjalta luotiin vertailulaskelmaa varten kaksi skenaariota. Vertailulaskelmassa verrattiin fast track- ja perinteisen menetelmän työvaiheittaisia yksikkökustannuksia. Kustannuksia verrattiin myös saatuun energiamäärään nähden.</p> <p>Tulokset osoittivat, että fast trackin -hankinnan hankintakustannukset olivat perinteiseen hankintaan verrattuna pienemmät. Fast track -hankintakustannukset olivat keskimäärin 7,1–13,3 % pienemmät kuin perinteisen hankinnan. Merkittävimmän kustannuseron muodostit varastointikustannus, jossa kuiva-ainetappio oli perinteisellä hankinnalla 5,3–11,5 % suurempi kuin fast track -hankinnan. Varastoinnista kertynyt pääomakustannus oli 0,4–1,9 % fast track -hankintaa suurempi. Tuoreen hakkuutähteen tehokkaampi haketus pienensi sekä haketuskuukustannuksia, että kaukokuljetuskustannuksia fast track -hankinnassa.</p> <p>Fast track -hankinnalla on mahdollista pienentää hakkuutähteen hankintakustannuksia. Siinä pääomakustannusten ja kuiva-ainetappion osuudet jäävät huomattavasti pienemmiksi, johtuen varastoinnin jättämisestä pois kesäkaudella. Vaikka laskelmat osoittivatkin fast track -hankinnan mahdollisuudet säästää hankintakustannuksissa, on kuitenkin muistettava, että hyödyn tavoittamiseksi hakkuutähtevolyyymi täytyy suhteuttaa voimalaitosten kysyntään.</p>			
Avainsanat - Nyckelord Fast track -hankinta, hakkuutähte, hankintakustannus, varastointikustannus, kuiva-ainetappio, pääomakustannus			
Säilytyspaikka - Förvaringsställe - Where deposited			
Muita tietoja - Övriga uppgifter - Additional information			

Tiedekunta - Fakultet - Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos - Institution - Department Department of Forest Sciences	
Tekijä - Författare - Author Jyrki-Pekko Kinnunen			
Työn nimi - Arbetets titel Fast track supply of harvesting residues for energy – opportunities and profitability			
Oppiaine - Läroämne - Subject Forest engineering			
Työn laji/ Ohjaaja - Arbetets art/Handledare - Level/Instructor Master Thesis / Lauri Sikanen, Veli-Pekka Kivinen		Aika - Datum - Month and year 5 / 2016	Sivumäärä - Sidoantal - Number of pages 56+4
Tiivistelmä - Referat – Abstract <p>This study is part of the joint research program of Sustainable Bioenergy Solutions for Tomorrow (BEST) by Natural Resource Institute Finland. This is the first study to examine and analyze the fast track supply chain for harvesting residues. The fast track supply chain is based on roadside chipping of logging residues, in which chips from final felling harvested during spring, summer and autumn are transported straight to the power plant with maximum of half month roadside storing. The aim of this study was to evaluate the cost effects of fast track supply chain. In addition, the factors affecting to the unit costs were investigated. Activity-based costing was used as a study method for analyzing the supply alternatives of logging residues.</p> <p>Data for this study was acquired from a large-scale industrial company purchasing forest biomass. Data consisted roadside storage locations and volumes (solid-m³) of logging residues from Norway spruce dominated final fellings. All activities were identified and costs were calculated in each supply method. Supply costs were presented in euros per megawatt hour were also compared to the total received energy.</p> <p>According to the results supply costs of fast track method was smaller than the costs of the conventional supply method. On average fast track supply costs were 7.1–13.3 % smaller than conventional supply method. Storing cost, including dry matter loss and capital cost, was the most significant factor for influencing differences in total supply cost. Cost of dry matter loss was 5.3–11.5 % higher in conventional supply method than in fast track supply method. In addition, capital costs were 0.4–1.9 % bigger in traditional procurement.</p> <p>Procurement costs of logging residue supply for energy-use can be decreased by using fast track supply chain. Although results proved that fast track supply chain decreases total procurement costs, one should remember that the volume of logging residues must be fitted to power plant's energy demand.</p>			
Avainsanat - Nyckelord Fast track supply chain, logging residues, supply cost, storing cost, dry matter loss, capital cost			
Säilytyspaikka - Förvaringsställe - Where deposited			
Muita tietoja - Övriga uppgifter - Additional information			

Alkusanat

Tahdon kiittää tämän pro gradu-tutkielmani ohjaajaa Luonnonvarakeskuksen ryhmäpäällikköä ja BEST-ohjelman projektin vetäjää Lauri Sikasta erinomaisesta motivoinnista ja asiantuntevasta ohjauksesta. Kiitän myös tutkimustyön laskennan apuna olleita tutkijoita Ari Laurenia ja Juha Laitilaa. Erityisesti haluan kiittää tuesta ja mielenkiintoisista keskusteluista tutkijaa Kari Väättäistä. Lisäksi haluan kiittää Joensuun Metla-talon kolmannen kerroksen telaketjuaosastoa mahtavasta työseurasta, keskusteluista ja avusta tutkimustyön tekemisessä. Kiitos teille unohtumattomasta talvesta 2015–2016.

Lopuksi haluan kiittää ystäviäni ja perhettäni tuesta tämän työn eri vaiheissa. Suurin kiitos erityisesti kuuluu edesmenneelle äidilleni, jonka positiivisuus, opastus ja tuki läpi elämäni erityisesti opiskeluaikani oli vertaansa vailla.

12.5.2016, Joensuu

Jyrki-Pekko Kinnunen

Käsitteet

Fast Track -hankinta

Nopeutettu hakkuutähteenhankinta eli fast-track -hankinta on uudenlainen hakkuutähteen hankinnan toimintamalli, jossa keväällä, kesällä ja alkusyksystä syntyvä hakkuutähte ohjataan suoraan polttoon.

Hakkuutähte

Hakkuutähteellä tarkoitetaan puunkorjuussa metsään jääviä oksia, latvuksia sekä aines- ja raivauspuuta. Hakkuutähteestä käytetään yleisesti myös uudempaa latvusmassa nimitystä. Työssä käytetään ainoastaan nimitystä hakkuutähte.

Kuiva-ainetappio

Kuiva-ainetappio eli energiasisällön hävikki tarkoittaa varastoinnin aikana syntyvän neulasten varisemisen, oksien tippumisen sekä biologisten prosessien aiheuttamaa energiansisällöllistä hävikkiä.

Pääomakustannus

Kantohinta ja korjuukustannukset muodostavat varastoon sitoutuneen pääoman. Tässä tutkimuksessa pääomakustannus on varastoon sitoutuneen pääoman korko varastointiaikana.

Lyhenteet

ha	Hehtaari
m ³	Kiintokuutiometri
i-m ³	Irtokuutiometri
Wh	Wattitunti, energian yksikkö
J	Joule, energian yksikkö
MJ/kg	Lämpöarvon yksikkö

Etuliitteet

k	Kilo, 10 ³
M	Mega, 10 ⁶
G	Giga, 10 ⁹
T	Tera, 10 ¹²

Muuntokertoimet

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	8
1.1 Puupohjaisen energian käyttö ja käyttökohteet	8
1.2 Hakkuutähdehakkeen nykyisen hankinnan työvaiheet ja logistiikka.....	10
1.2.1 Hakkuutähdehakkeen hankintamuodot.....	10
1.2.2 Hakkuutähdehakkeen tienvarsihaketusketju	12
1.2.4 Hakkuutähdehakkeen hankintakustannusten tarkastelutapa	16
1.3 Fast tack -hankinta	18
1.4 Hakkuutähdehakkeen laatutekijät	21
1.5 Tutkimuksen tavoitteet	23
2 Aineisto ja menetelmät.....	24
2.1 Leimikkoaineisto.....	24
2.2 Hankintakustannusten laskenta.....	26
2.2.1 Hankinnan kustannusrakenne	26
2.2.2 Kantohinta, yleis-, hakkuu- ja lähikuljetuskustannukset	28
2.2.3 Varastointikustannus	29
2.2.4 Haketuskustannus.....	30
2.2.5 Kaukokuljetuskustannus	31
2.3 Hakkuutähdehakkeen kosteus.....	32
2.4 Analyysi.....	33
2.5 Tutkimuksen virhelähteet	34
3 Tulokset.....	35
3.1 Hankintamenetelmien tunnusluvut.....	35
3.2 Operatiiviset kustannukset.....	35
3.3 Hankintakustannukset	36
3.4 Kuiva-ainetappio	38
3.5 Pääomakustannus	40
3.6 Herkkyysanalyysi haketuksen tehokkuuden vaikutuksesta.....	41
4 Tulosten tarkastelu	43
4.1 Aineiston ja menetelmien tarkastelu	43
4.1.1 Koe-erä- ja korjuuaineisto.....	43
4.1.2 Kustannuslaskennan tarkastelu	44
4.2 Fast track -hankinnan tulosten tarkastelu	44
4.3 Fast track -hankintaketjun soveltuvuus nykyisessä biotaloudessa.....	46
4.4 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys	49
5 Johtopäätökset ja yhteenveto.....	49
5.1 Tulevaisuuden tutkimustarpeet	50
6. Kirjallisuus	52
Internet-lähteet	55
LIITEET	57

1 Johdanto

1.1 Puupohjaisen energian käyttö ja käyttökohteet

Suomen kokonaisenergiankulutus oli vuonna 2014 1340 petajoulea (PJ) eli 372,2 terawattituntia (TWh) ja on pysynyt suhteellisesti samalla tasolla edellisiin vuosiin verrattuna. Tästä osuudesta puupolttoaineilla katettiin kokonaiskulutus 333 PJ (92,5 TWh), joka vastaa noin neljännessä kyseisen vuoden kokonaisenergian kulutuksesta. Vuoteen 2013 verrattuna puupolttoaineiden osuus pieneni 2 %, mutta säilytti kuitenkin paikkansa tärkeimpänä energianlähteenä ennen öljyä. Kiinteiden puupolttoaineiden vuotuinen käyttö oli vuosina 2013 ja 2014 yhteensä 18,7 miljoonaa kiinto-kuutiometriä (m³). (Metsätilastollinen vuosikirja 2014 & SVT 2015a)

Suomessa metsähakkeen käyttö puupolttoaineena on lisääntynyt merkittävästi 2000-luvulla. Kansallisen metsäohjelman tavoitteena oli kasvattaa metsähakkeen vuotuista käyttöä 10–12 miljoonaan kuutiometriin vuoteen 2015 mennessä (Metsätilastollinen vuosikirja 2014). Nousujohteisesta suhdanteesta huolimatta käyttömäärät jäivät kuitenkin alle tavoitteen ja ovat jopa laskeneet parina edellisenä vuotena (Luke 2015a). Metsähakkeen kokonaiskäyttömäärä laski 8,2 miljoonaan kuutiometriin eli noin 5 %. Lämpö- ja voimalaitokset kuluttivat metsähaketta 7,5 miljoonaa kuutiometriä ja pientalokiinteistöt arviolta 0,7 miljoonaa kuutiometriä (Luke 2015). Tavoitteisiin pääsynä ovat rajoitteet muun muassa leudot talvet. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on nostaa metsähakkeen käyttöä sähkön- ja lämmöntuotannossa 25 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä; se tarkoittaa noin 13 miljoonaa kuutiometriä metsähaketta (TEM 2013).

Hakkuutähteestä valmistettu hakkuutähdehake on ollut tärkein metsähakkeen raaka-aine vuoteen 2009 asti, jonka jälkeen pienpuuhakkeen osuus kasvoi suuremmaksi. Hakkuutähteellä eli latvusmassalla tarkoitetaan ainespuuhakkuun yhteydessä karsittuja oksia, latvuksia sekä runkohukkapuuta. Hakkuutähteiden määrä laski 6 % vuonna 2014 (2,55 milj. m³), kun taas pienpuun käyttö nousi 4 % (3,6 milj. m³). (Luke, 2015a)

Hakkuutähteestä syntyvä metsähake eli hakkuutähdehake menee pääosin suuriin teollisuuden ja yhdyskuntien monipuolisesti biomassaa käyttäviin voimaloihin kuten

esimerkiksi CHP-voimalaitoksiin (Combined heat and power). Suurimmissa voimalaitoksissa pystytään polttamaan tavallista kosteampaa polttoainetta. Pienimmissä polttolaitoksissa hakkuutähteen käyttö on vähäisempää ja jopa melkein kannattamatonta, koska polttotekniikkaan vaikuttavat korkea kosteus ja suuri pienjakeen määrä aiheuttavat haasteita polttovaiheessa. (Hakkila 2004)

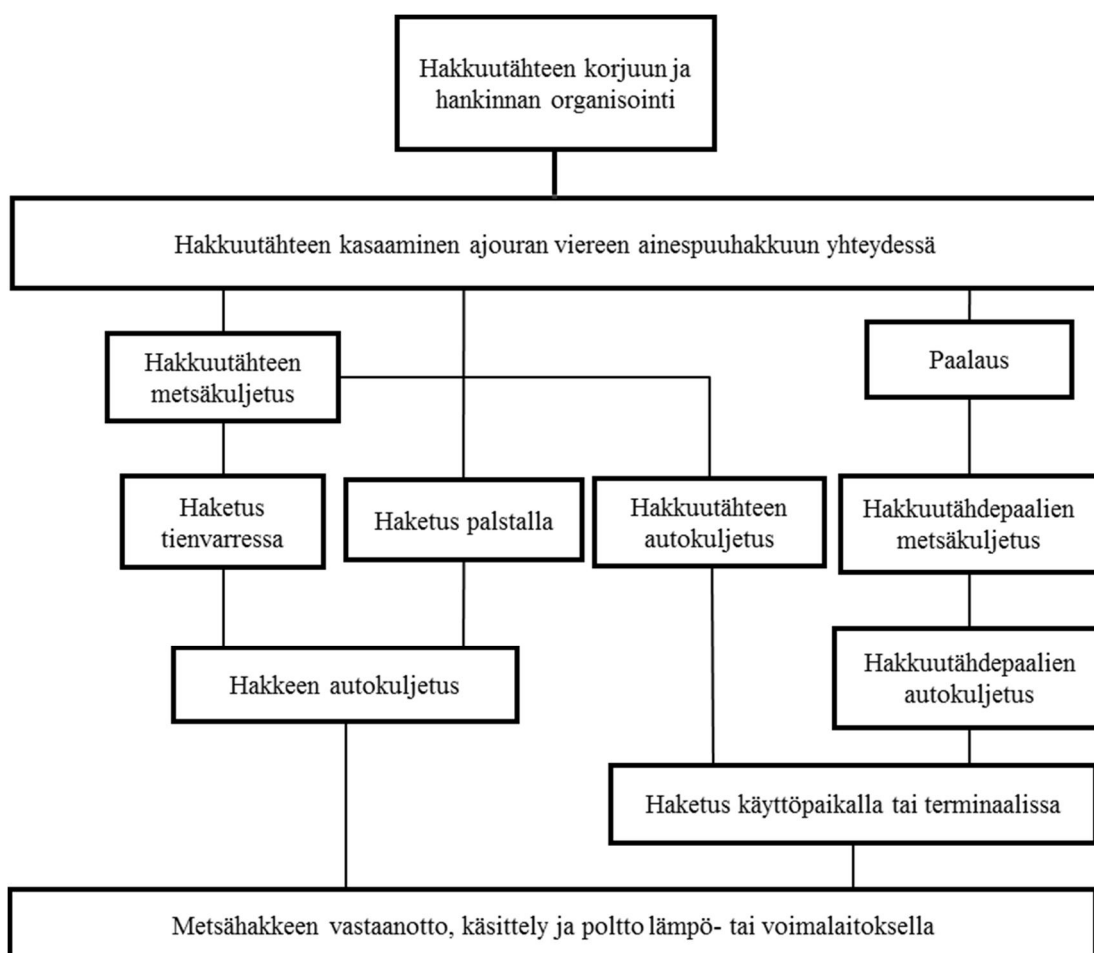
Suomessa puuraaka-aineen kysyntä on pysynyt tasaisena 2000 -luvun puolesta välistä (Luke 2015a). Kuitenkin metsäteollisuuden odotetaan kasvattavan energiapuunkäyttöä. Low Carbon Finland 2015 -platform (LTFinPlat) -hankkeen mukaan hakkuutähteen määrä tulee kaksinkertaistumaan vuoden 2012 tasosta (6,2 TWh) vuoteen 2030 mennessä (11–12 TWh). Suomella on tarpeeksi raaka-ainepotentiaalia täyttämään tulevaisuuden energiapuukysynnän. Energiapuunkorjuu on tällä hetkellä kestävällä tasolla, koska metsän kokonaiskasvu pysyy poistumaa suurempana. (Koponen ym. 2015)

Hakkuutähteen kokonaismäärälle lähtökohtana on sen teoreettinen enimmäispotentiaali, joka on suoraan verrannollinen metsäteollisuuden puun kysyntään ja sen myötä ainespuuhakkuisiin. Hakkuutähteen enimmäispotentiaali nousee, kun ainespuun kertymä ja päätehakkuupinta-alan määrä lisääntyy. Potentiaalinsaavuttaminen on kuitenkin vaikeaa tai lähes mahdotonta, koska hankintaan liittyy korjuuteknisiä ja korjuusuositukseen liittyviä rajoitteita. Hakkuutähdehakkeen potentiaalia rajoittavat mm. varastointihävikki, hankintayrityksen asettama korjuualan tai hakkuutähdekertymän vähimmäiskoko, metsänhoito-ohjeet, korjuusuositukset sekä tulevaisuudessa mahdollisesti myös ilmastopoliittiset rajoitteet. (Hakkila 2004, Asikainen & Anttila 2013, Koponen ym. 2015) Anttilan ym. (2014) mukaan ainespuun kertymän ja päätehakkuupinta-alan säilyessä vuosien 2008–2012 keskimääräisellä tasolla, on hakkuutähteen korjuupotentiaali 6,6 milj. m³ ja näin ollen hakkuutähdepotentiaali on vuosien 2008–2012 hakkuiden keskimääräisellä tasolla. Uudistushakkuiden ollessa suurimmalla kestävällä tasolla, nousee potentiaali jopa 11,6 miljoonaan m³. Potentiaalia tarkasteltaessa on huomioitava käyttöpaikkojen sijainnit suhteutettuna raaka-aineen sijaintiin, jotta sen hankinta olisi käytännössä järkevää. (Anttila ym. 2014)

1.2 Hakkuutähdehakkeen nykyisen hankinnan työvaiheet ja logistiikka

1.2.1 Hakkuutähdehakkeen hankintamuodot

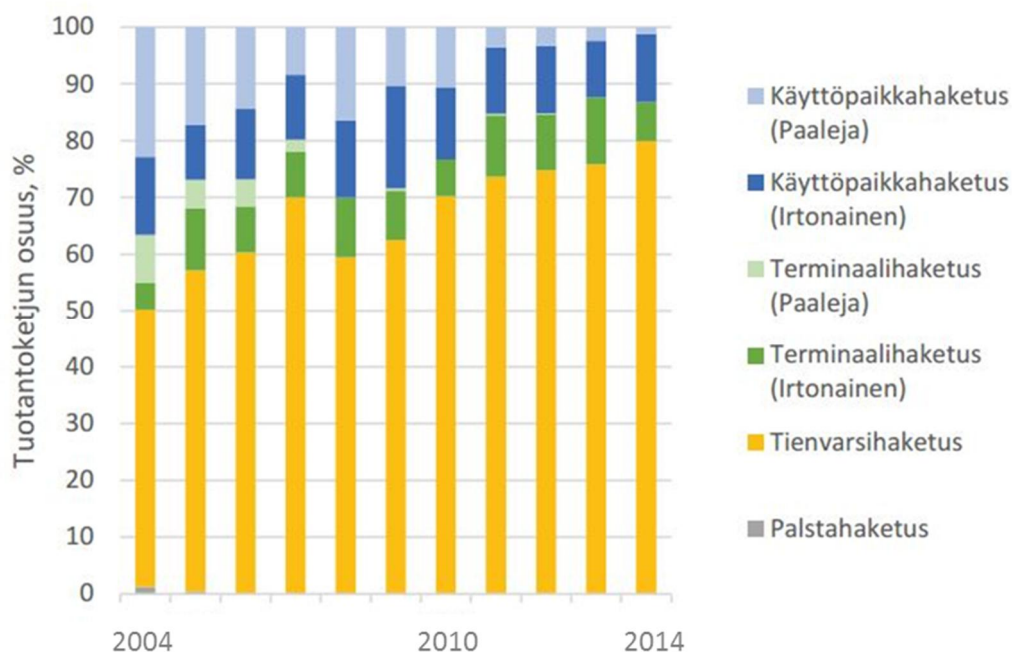
Hakkuutähdehakkeen hankintaketju määrittyy haketuspaikan ja käyttöpaikalle kuljetettavan raaka-aineen kuljetusmuodon mukaan. Hakkuutähteen korjuumenetelmät jaetaan haketuspaikan mukaisesti keskitettyihin ja hajautettuihin korjuumenetelmiin. Keskitettyjä menetelmiä ovat terminaali- ja käyttöpaikka-haketukset. Hajautettuja menetelmiä ovat tienvarsi- ja palstahaketukset. Hakkuutähteen hankinnassa käytetään molempiin luokituksiin kuuluvia menetelmiä riippuen käyttöpaikan tarpeista, sijainnista ja haketuskalustosta. (Laitila, ym. 2010)



Kuva 1. Hakkuutähdehakkeen nykyisten toimitusketjujen työvaiheet (Laitila ym. 2010).

Kannolta käyttöpaikalle ulottuvaan hakkuutähteen hankintaketjuun sisältyy 5–7 työvaihetta (Kuva 1). Tienvarsihaketusketju on Suomen yleisin ja perinteisin metsähakkeen tuotannossa (Strandström 2014). Tienvarsihaketuksen osuus hakkuutähdehakkeen tuotannosta vuonna 2014 oli ennätysellinen 80 %.

Tienvarsihaketusketjun osuus hakkuutähteen haketuksessa vuonna 2004 oli noin 50 %. Terminaalihaketuksen osuus vuosien 2004–2014 välillä oli parhaimmillaan 10 % ja käyttöpaikkahaketuksen 35 % (Kuva 2). Etenkin käyttöpaikkahaketuksen käyttö on pienentynyt suhteutettuna muihin tuotantoketjuihin. Pienentyneet vuotuiset osuudet osoittavat myös, että terminaali- ja käyttöpaikkahaketukset ovat jäämässä kokonaan pois hakkuutähtehakkeen tuotannosta. Hakkuutähtehakkeen tienvarsihaketuksen suosio selittyy sillä, että sen tuotantokustannukset ovat pienimmät. Suomessa yrittäjät ovat investoineet tienvarsihaketuskalustoon kaluston monipuolisuuden ja muuntautumiskyvyn vuoksi. Suomalaisissa olosuhteissa tienvarsihaketusketju toimii hyvin ketjun käyttämän kaluston yleisyyden ja olosuhteiden vaihtelun vuoksi. Se soveltuu hyvin vaihtelevan kokoisille käyttöpaikoille ja on kustannustehokas pidemmillekin kaukokuljetusmatkoille (Laitila, ym. 2010).



Kuva 2. Hakkuutähtehakkeen tuotantoketjujen osuudet vuosien 2004 ja 2014 välillä (Muokattu Strandström (2015b) alkuperäiskuvasta).

Päätihakkuilta kerätty hakkuutähte muodostaa toiseksi suurimman osan energiakäyttöön kerättävästä metsähakkeesta pienpuun jälkeen. Hakkuutähteen saatavuudessa ja määrässä on puulajikohtaisia ja alueellisia vaihteluita. Hakkuutähteen korjuu on keskittynyt kuusivaltaisiin päätihakkuuleimikoihin, joissa talteenottoaanto on kaksinkertainen männyn ja lehtipuiden hakkuutähtekertymään verrattuna. Esimerkiksi päätihakkuukuusikon hakkuutähteen suhteellinen osuus runkomassasta

on 54 % ja männyllä 21 %. Kuusivaltaisten leimikoiden parempi hehtaarikohtainen hakkuutähdekertymä alentaa tuotantokustannuksia. Lisäksi ravinnetasapaino kuusikoissa on parempi, eikä ravinnetaantumaa tapahdu hälyttävää määrää. (Hakkila 2004 & Asikainen ym. 2001) Hakkuutähdehakkeen korjuussa hyvänä puolena nähdään sen edullinen korjuukustannus verrattuna harvennushakkuilta korjattavaan metsähakkeeseen, jossa harvennuspuun prosessointi nostaa merkittävästi tuotantokustannuksia (Laitila ym. 2010). Lisäksi käytettävä kalusto integroituu joustavasti ainespuun korjuujärjestelmään (Hakkila 2001).

1.2.2 Hakkuutähteen tienvarsihaketusketju

1.2.2.1 Hakkuutähteen osto, korjuun ja hankinnan organisointi

Hakkuutähdehakkeen hankinnan ensimmäinen vaihe on ostovaihe, jossa hankintayrityksen toimihenkilö arvioi ja tekee tarvittavat johtopäätökset energiapuun ostosta ainespuukaupan rinnalla. Hakkuutähteestä on tullut osa puutavaraluokittelua, mikä on helpottanut sen ottamista myös puukauppoihin mukaan. Myyjä ja ostaja neuvottelevat puukaupan yhteydessä hinnan lisäksi hakkuutähteiden korjuusta, varastoinnista ja kuljetuksesta. Metsänomistajalle hakkuutähteestä maksettava korvaus vaihtelee alueittain ja yrityksittäin. Metsähakkeesta voidaan maksaa joko hehtaarikohtainen korvaus, kiintotilavuusperusteinen korvaus, energian saannosta saatava korvaus tai ei korvausta ollenkaan (Ihalainen & Niskanen 2010). Hankintayritys vastaa yleensä hakkuutähteen korjuusta tienvarsivarastoon. Puutavaran ostosta, korjuusta ja hankinnan organisoinnista syntyvää kustannusta nimitetään yleis- tai organisointikustannukseksi. Organisointikustannukset ovat materiaalin hankinnassa ja ohjauksessa syntyviä kustannuksia. Niihin sisältyvät muun muassa puunhankinnan palkkakustannukset ja niiden sivukustannukset sekä toimitila- ja matkakustannukset. (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2010 & Strandström 2015a)

1.2.2.2 Hakkuu ja lähikuljetus

Energiaksi kerättävä hakkuutähde syntyy päätehakuilla puun karsinta- ja katkontavaiheessa, jolloin hakkuutähteet kasataan joko yhdelle puolelle tai molemmin puolin hakkuukoneen ajouraa. Kasoille hakkuu parantaa metsätraktorin hakkuutähteen keruun tuottavuutta ja vähentää kuormauksen aikana hiekan ja kivennäismaan kertymistä kuormaan. Lisäksi nykyään on suositeltavaa jättää hakkuutähteet niin sanottuun palstavarastoon ennen lähikuljetusta. Palstavarastointi edistää materiaalin laatua kuivattamalla hakkuutähdettä ja varisuttamalla neulaset palstalle. Tämä vähentää ravinteiden hävikkiä palstalta, mutta lisää energiahävikkiä hankintaketjussa. (Nurmi 1999, Hillebrand & Nurmi 2001) Hakkuutähde kerätään pääasiallisesti kuusivaltaisilta hakkuualoilta, joissa maan ravinnetasapaino on tarpeeksi hyvä. (Laitila ym. 2010) Vaikka kasoille karsinta parantaakin lähikuljetuksen keruun tuottavuutta, voi sillä olla myös sitä heikentäviä ominaisuuksia. Heikon kantavuuden omaavilla maaperillä ajouran viereen kasoille karsinta voi heikentää ajokoneen nopeutta ja kuormakokoa. Tämän perusteella hakkuutähteen korjuukohteet on valittava tietyillä kriteereillä, esimerkiksi maalajin perusteella, ylimääräisten ajanmenekkien välttämiseksi (Oijala ym. 1999).



Kuva 3. Hakkuutähteen metsäkuljetusvaihe, jossa metsätraktori on varustettu hakkuutähteen kuljetukseen tarkoitetulla suuremmalla kuormatilalla. (Kuva: Luke/L.Sikanen).

Lähikuljetus eli metsäkuljetus tehdään metsätraktorilla joko samalla tai erillisellä työmaakäynnillä (Asikainen ym. 2001, Hakkila 2004 & Laitila ym. 2010). Hakkuutähde kuljetetaan joko tuoreena tai hieman kuivahtaneena tienvarsivarastoon, jossa se kasataan 4–5 metriä korkeisiin kasoihin ja mahdollisesti kuivatusolosuhteiden parantamiseksi peitetään. Metsäkuljetuksessa käytetään joko ainespuukuljetuksessa käytettävää metsätraktoria tai erillistä hakkuutähteen kuljetukseen varusteltua metsätraktoria, johon on mahdollista vaihtaa puutavarakouran paikalle hakkuutähdekoura. (Hakkila 2004) Nykyisiin metsätraktoreihin on mahdollista saada mekaanisesti tai hydraulisesti muuttuva kuormatila. Hydraulisesti muuntautuvaa kuormatilaa on mahdollista ohjata ohjaamosta käsin niin, ettei muodon vaihtamisesta synny merkittävää ajanmenekkiä. (Komatsu 2016 & Ponsse 2016) Lähikuljetuksen yhteydessä tienvarsivarastokasojen kuivumisprosessia voidaan parantaa peittämällä ne siihen tarkoitetulla peitemateriaalilla, joka edesauttaa hakkuutähteen kuivumista jopa 10–15 % kuivemmaksi tuoreeseen verrattuna. (Hillebrand & Nurmi, 2001) Päätehakuilla varastointitilan löytäminen hakkuutähteelle voi olla haasteellista, koska sen vaatima varastotila keskimääräisellä päätehakuulla on 15–20 tienvarsimetriä hakkuuhehtaaria kohden (Hakkila 2004).

1.2.2.3 Varastointi ja kaukokuljetus

Metsäkuljetusvaiheessa hakkuutähteet varastoidaan tienvarteen välivarastoon (Kuva 4). Varastoinnin pääasiallinen tarkoitus on parantaa polttoaineen laatua vähentämällä sen kosteuspitoisuutta. Kuitenkin varastoinnin aikana tapahtuu luontaista kompostoitumista ja mikrobiologista aktivoitumista, jotka taas aiheuttavat kuiva-ainetappiota ja näin ollen lämpöarvon alenemista (Kuva 8). Varastoinnin aikana tapahtuva laadun heikentyminen riippuu sääolosuhteista ja varaston ominaisuuksista. (Jirjis 1995, Nurmi 1999, Filbakk ym. 2011) Varastointiaika vaihtelee materiaalin tarpeen ja sijainnin mukaan yleensä kuudesta kahteentoista kuu-kautta (Laitila ym. 2010). Laitilan ym. (2010) mukaan varastoinnista syntyvien kuiva-ainetappioiden ja neulaspitoisuuden vuoksi varastointiajan tulisi olla korkeintaan vuosi. Varastoinnin aikana syntyvä kuiva-ainetappio on hakkuutähteellä suurempi kuin pienpulla.



Kuva 4. Hakkuutähteen tienvarsivarasto. Vasemmassa kuvassa tienvarsivarastoon kasattu tuore hakkuutähde ja oikeassa kuvassa varastossa kuivunut hakkuutähde. (Kuva: Luke/L. Sikanen)

Varastoinnin ja kuivumisen jälkeen hakkuutähde haketetaan tienvarressa kaukokuljetusta varten. Tienvarsihaketus tapahtuu yleensä hakkurilla varustetulla kuorma-autolla (Kuva 5). Haketusta tehdään vähäisissä määrin myös murskaimella varustetulla hakeautolla. Materiaali haketetaan suoraan korkeilla laidoilla ja täysperävaunulla varusteltuun hakeautoon, jonka jälkeen hake kuljetetaan terminaaliin tai käyttöpaikalle poltettavaksi. (Asikainen ym. 2001)



Kuva 5. Hakkuutähteen tienvarsihaketus. Vasemmalla kuvassa pieni laidallisella kuormatilalla varustettu hakeauto ja oikealla hakkurilla varustettu kuorma-auto. (Kuva: Luke/L. Sikanen)

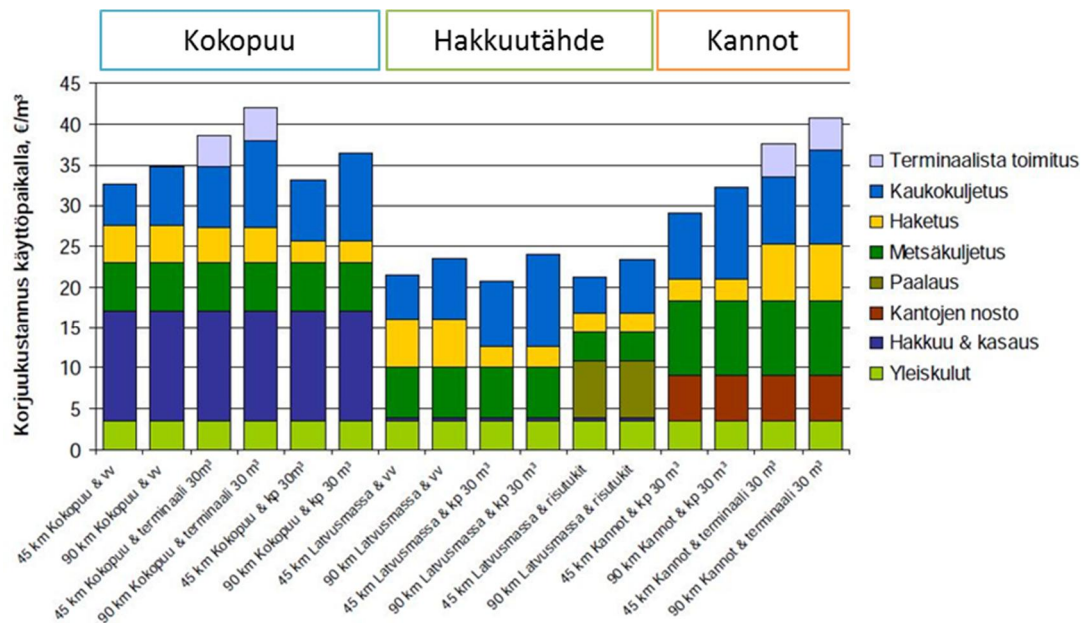
Tuoreen hakkuutähteen ja kantojen poltto ei ole laitoksissa ongelmattonta esim. kosteuden, suuren pienjakeen määrän sekä kloorin aiheuttaman korroosion vuoksi (Alakangas & Impola 2014, Hakkila 2004). Silti tätä toimintamallia halutaan tutkia, sillä märän polttoaineen ja kloorin ongelmat on mahdollista hallita polttoteknisin keinoin (Aho 2013).

1.2.4 Hakkuutähdehakkeen hankintakustannusten tarkastelutapa

Hakkuutähdehakkeen kustannusrakennetta ja korjuukustannusta käyttöpaikalla ovat tarkastelleet aikaisemmin muun muassa Asikainen ym. (2001), Laitila ym. (2010) ja Hakkila (2004). Tarkasteluissa ei oteta kuitenkaan huomioon varastoinnista syntyviä pääomakustannuksia ja kuiva-ainetappiota yksityiskohtaisesti. Hakkuutähdehakkeen hankintakustannukset koostuvat yleis- eli organisointikustannuksesta sekä hakkuu-, metsäkuljetus-, haketus- ja kaukokuljetuskustannuksista (Asikainen ym. 2001, Hakkila 2004, Laitila ym. 2010). Lisäksi

kustannuksiksi lasketaan mukaan maanomistajalle maksettava kantohinta sekä varastoinnista syntyvä kustannus.

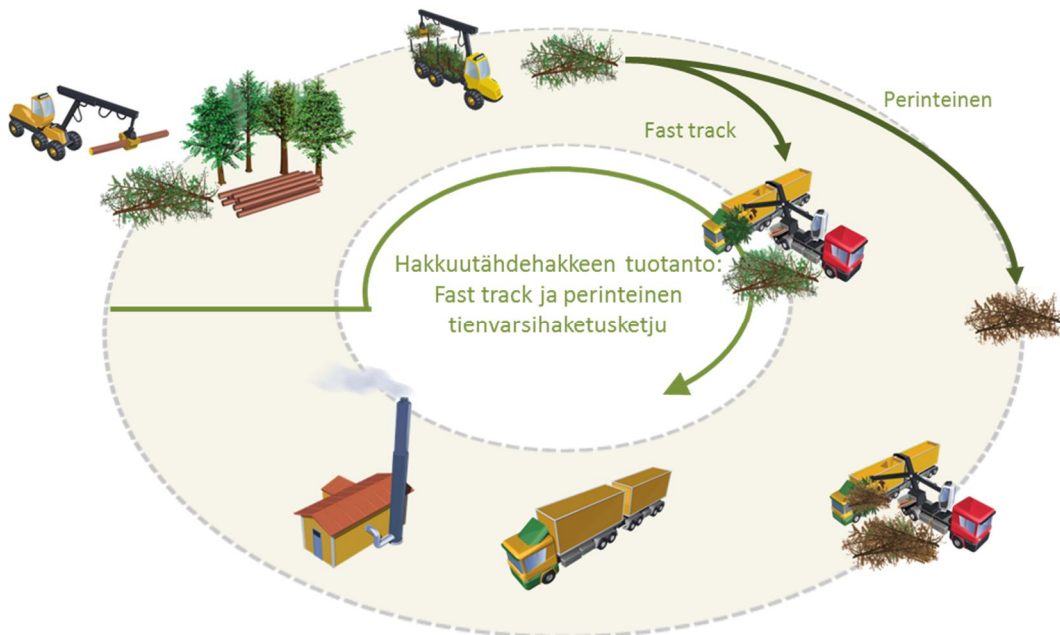
Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) ja Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen (VTT) (Laitila ym. 2010) tutkimuksessa selvitettiin eri metsähakkeen korjuuketjujen kustannusrakenteet esimerkkileimikoiden avulla. Kuva 3 havainnollistaa yhden yleisimmistä tavoista vertailla toimintaketjujen välisiä työläjikohtaisia kustannuksia. Siinä kustannukset esitetään suhteutettuna kahteen kaukokuljetusäisyyteen osoitettuna pylväskaaviona ja työläjit eritelty eri värein. Hakkuutähdehakkeen hankintakustannus käyttöpaikalla oli alhaisin muihin korjuuketjuihin verrattuna. Hankintakustannus oli 20,7–21,4 €/m³ 45 kilometrin matkalla ja 23,4–24,1 €/m³ kaukokuljetusmatkan ollessa 90 km. Hakkuutähdehakkeen tuotannossa suurin kuluerä syntyi kaukokuljetuksesta.



Kuva 6. VTT:n (Laitila ym. 2010) diagrammi metsähakkeen kustannusrakenteesta eri korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla. Kuvatekstissä vv= välivarastohaketus ja kp = käyttöpaikkahaketus. Kuvassa latvusmassalla tarkoitetaan hakkuutähdettä (Muokattu Laitilan ym. (2010) alkuperäiskuvasta).

1.3 Fast tack -hankinta

Fast track -hankinta eli nopeutettu hakkuutähdehakkeen hankinta on metsähaketta käyttävän teollisuuden tavoitteista johdettu uusi toimintamalli. Tutkimuksessa esiin tulleet varastoinnin kuiva-ainetappiot ja osa pääomakustannuksista on vältettävissä, jos osa erityisesti hakkuutähde- ja kantopotentiaalista ohjataan laitokselle lähes ilman tienvarsivarastointia. Tällöin kuiva-ainetappiota ei ehdi muodostua eikä varastoon sitoutunut pääoma ehdi tuottaa pääomakuluja niin paljon, kuin esimerkiksi melko yleisessä yli vuoden kestävässä varastoinnissa. Fast track -toimintamallissa kesällä ja alkusyksystä syntyvä hakkuutähde ohjataan suoraan polttoon, jolloin varaston pääomakustannus ja varaston lämpenemisestä johtuva kuiva-ainetappio pidetään mahdollisimman pienenä. Perinteisesti tänä aikana tehty energiajäte varastoidaan tienvarressa seuraavan kevään ja kesän yli. Varastointiaikaa kertyy näille varastoille yleensä yli vuosi, mutta fast track -toimintamallissa tämä tarkkaan harkittu osa metsätähteestä haketetaan mahdollisimman pian metsäkuljetuksen jälkeen ja toimitetaan niin sanottuna ”kuumana ketjuna” polttolaitokselle (Kuva 7). Myöhemmin talvella syntynyt tähde varastoidaan kuivumaan ja poltetaan vasta seuraavalla lämmityskaudella. Talvikaudella tarvittava kuiva ja polttoarvoltaan hyvä hake saadaan näin syntymään lyhyemmällä varastointiajalla, sillä metsähakkeen raaka-aine kuivaa yleensä tehokkaasti vain toukokuun alusta elokuun loppuun. (Nurmi & Hillebrand 2007, Filbakk ym. 2011 b)



Kuva 7. Perinteisen ja fast track -hankintaketjun työvaiheet. Kuvassa sisempi sykli on fast track ja ulompi perinteinen. (Kuva: Luonnonvarakeskus 2015)

Hakkuutähteen korjuu päätehakkuualoilta vaikuttaa metsään ja metsätalouteen monitahoisesti. Sen merkitystä ympäristöön ja metsän kiertokulkuun pitkällä aikavälillä ei tunneta. Fast track -korjuuketjun vaikutusten voidaan olettaa olevan lähes samanlaiset tai ainakin hyvin lähellä perinteisesti korjatun hakkuutähteen vaikutuksia. Fast track -hankinnassa jää vähemmän neulasia hakkuualalle. Tämä lisää ravinteiden poistumista hakkuualalta, mutta välittömän poiskuljetuksen seurauksena siitä ei aiheudu pistemäistä ravinnekuormitusta tienvarsivarastolla. Fast track -hankinnan korjuussa soveltuvat samat suositukset ja korjuuseen liittyvät rajoitteet, kuin perinteiselläkin korjuuketjulla. Näin ollen rajoittavia tekijöitä tuoreen hakkuutähteen korjuuseen ei ole. Kuitenkin on muistettava, että fast track -korjuuketju käytännössä ei lisää korjattavan hakkuutähteen määrää.

Energiapuun korjuuseen on luotu vuodesta 2010 lähtien ”Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen ja kasvatukseen”. Suositusten tavoitteena on ylläpitää metsien kestävää ja kannattavaa käyttöä. Lisäksi ohjeistus on yhteiskunnallinen työkalu, jolla pyritään ohjaamaan metsien käyttöä yhteiskunnallisten tavoitteiden ja velvoitteiden mukaisesti. Energiapuun korjuuohjeita ovat sitoutuneet käyttämään kaikki merkittävimmät alan toimijat. Nykysuositusten mukaisesti päätehakkuualoilta on jätettävä vähintään 30 % hakkuutähteestä. Suosituksissa on mukana korjuukohteiden valintakriteerit ja niihin liittyvät poikkeustapaukset. Esimerkiksi kuivahkoilta kankailta ja niitä viljavimmilta kankailta hakkuutähdettä saa kerätä, mutta sitä karuimmilta sitä ei suo-

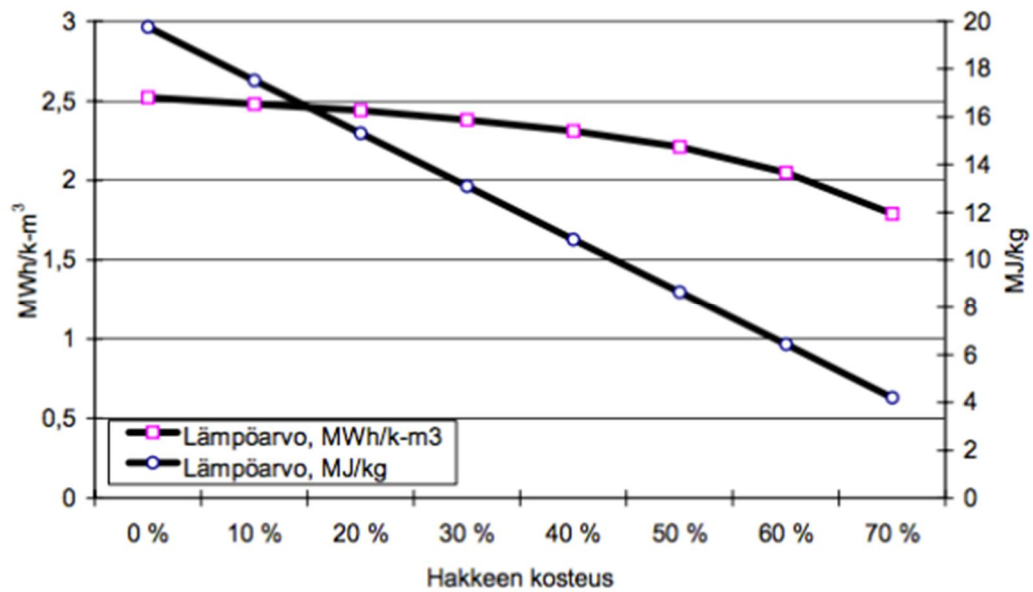
sitella. (Äijälä ym. 2010) Metsäkeskus tekee vuosittain luonnonhoidon laadunseurantaraportin, jossa se tarkastelee metsänhoitotoimenpiteitä hyvän metsänhoidon suositusten näkökulmasta. Energiapuun korjuusuosituksia noudatetaan nykyään entistäkin täsmällisemmin. Esimerkiksi metsäkeskuksen vuoden 2013 luontolaatu-arviointiraportin mukaan 93 % käytännön korjuutyöstä suoritetaan suositusten mukaisesti, kun taas vuoden 2015 raportissa lukema nousi 95 %:iin. (Metsäkeskus 2014 & 2015)

Hakkuualalle jätettävä hakkuutähte koetaan luonnon monimuotoisuuden ja metsämaan ravinnetasapainon kannalta tärkeäksi. Hakkuutähteen korjuuta ei välttämättä nähdä metsätalouden ekologisen kestävyuden kannalta kestäväenä energiakorjuumuotona. Tuoreen hakkuutähteen korjuusta aiheutuu päätehakkuualalle hetkellistä ravinnepoistumaa. Harstelan (2006) mukaan hakkuutähteen korjuulla on todettu olevan taimikon kasvuun negatiivinen vaikutus, joka vastaa noin kahden vuoden pituuskasvua. Kuitenkin hakkuutähteen poisto voi nopeuttaa metsän uudistamistyötä kahdella vuodella, mikäli hakkuutähteen korjuu, maan muokkaus ja taimien istutus toteutetaan samana vuonna (Saksa 2001). Tutkimusten mukaan hakkuutähteen poisto tehostaa ja tekee maanmuokkauksesta laadukkaampaa. On todettu muun muassa, että maanmuokkauksen tuottavuus paranee jopa 15–20 % hakkuutähteen poiston vuoksi (Saksa ym. 2002, Saarinen & Harstela 2004). Lisäksi hakkuutähteen poistaminen parantaa luontaista taimettumista. Se vähentää uudistusalan tyyppikuormittumaa, mikä taas karsii tyyppiä suosivien ja taimettumista vaikeuttavien kasvien kuten maitohorsman ja vadelman määrää (Saksa ym. 2002 & Siitonen 2012). Hakkuutähteen fast track -hankinnalla voidaan vähentää valumia vesistöihin, koska uudella puusukupolvella vapautuvien ravinteiden hyväksikäyttö kestää useita vuosia (Harstela 2006). Ravinteiden lisäksi hakkuualalta poistuu monimuotoisuutta lisäävien eliöiden säilyvyyden kannalta tärkeää lahopuuainesta. Kuitenkin energiapuuksi menevä lahopuu pystytään kompensoimaan korjuusuosituksia noudattaen hakkuualalle jätettävällä hakkuutähteellä, säästöpuilla sekä tekopötkelöillä. Lisäksi hakkuutähdettä jää hakkuualoille oletettua suurempi määrä. Metsäntutkimuslaitoksen Seppäsen ym. (2009) tutkimushankkeessa ”Kantojen noston ja hakkuutähteen keruun ekologiset ja metsänhoidolliset vaikutukset” mukaan hakkuutähtekorjuutavoitteen ollessa 70 %, on todellinen talteenottoosaanto latvusosa mukaan luettuna 45 % eli päätehakkuualoille jää luultua enemmän hakkuutähdettä.

1.4 Hakkuutähdehakkeen laatutekijät

Hakkuutähdehakkeen laatua tarkastellaan fysikaalisin ja kemiallisin parametrein. Laatu määritetään raaka-aineen energiantuotoskykyyn ulkoisesti vaikuttavilla tekijöillä, joista tärkein on kosteus. Kosteuden noustessa lämpöarvo ja energiatiheys alenevat. Lisäksi kosteus nostaa savukaasujen määrää (Ihalainen & Niskanen 2010). Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat irtokuutiometrin tiheys, tehollinen lämpöarvo laitoksella, tuhkapitoisuus ja palakokojakauma. Kosteuden lisäksi tärkeänä laatuominaisuutena polttolaitoksilla pidetään tuhkapitoisuutta, joka on hakkuutähdehakkeella merkittävän korkea. Tuhkapitoisuus on sitä suurempi, mitä hienojakoisempaa polttoaine on. (Alakangas 2000 & Kärkkäinen 2007) Tässä työssä hakkuutähdehakkeen laatu otetaan huomioon laskennassa vain kosteuden ja kuiva-ainetappion näkökulmasta, koska ne vaikuttavat suoraan metsähakkeen tuotantokustannuksiin ja lopulliseen polttoaineen lämpöarvoon.

Kosteus on tärkein metsähakkeen laatua kuvaava kriteeri (Acuna ym. 2014, Nurmi 1997). Se vaikuttaa suoraan hakkeesta saatavaan teholliseen lämpöarvoon negatiivisesti (Kuva 8). Lisäksi kosteus vaikuttaa kaukokuljetuksen hyötykuormaan. Kosteuteen vaikuttavia tekijöitä ovat hakkuun ajankohta, korjuun maantieteellinen sijainti, vuosittaiset sääolosuhteet, tienvarsivaraston toteuttaminen sekä sen olosuhteet. Kostean hakkeen veden höyrystyminen vaatii enemmän energiaa (Hakkila & Fredriksson 1996, Alakangas 2000, Hillebrand 2009). Vuodenajasta riippuen tuoreen hakkuutähteen kosteus vaihtelee 50–60 %:n välillä. Nykyään suuret lämpö- ja voimalaitokset pystyvät polttamaan suhteellisen suuren kosteuden omaavaa polttoainetta (40–50 %). Nurmen (1997) tutkimuksen mukaan 50 %:n kosteuden omaavalla polttoaineella lämpöarvo on 16,5 MJ/kg, kun taas kuivalla materiaalilla se voi nousta jopa 19 MJ/kg. Hakkuutähteen kosteuteen pystytään vaikuttamaan luontaisella varastoinnilla ja oikea-aikaisella haketuksella. Syksyllä syntynyt hakkuutähde ja sen varastointi talven yli aiheuttaa raaka-aineelle muihin vuodenaikoihin verrattuna suurimman kosteuspitoisuuden, kun taas keväällä korjattu hakkuutähde on merkittävästi kuivempaa, koska ilman suhteellinen kosteus on muita ajankohtia nähden alhaisempi. (Nurmi 1999)



Kuva 8. Hakkuutähdehakkeen tehollinen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/m³ tai MJ/kg) (Alakangas 2000).

Fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien lisäksi polttoaineen laatuun vaikuttaa merkittävästi oksien karsiutumisen, neulasten varisemisen sekä biologisen aktiivisuuden aiheuttama kuiva-ainetappio (Filbakk ym. 2011). Kuiva-ainetappion suuruus riippuu lukuisista tekijöistä, joita ovat kosteuden lisäksi varastointiajan pituus, varaston maantieteellinen sijainti, vuotuiset sääolosuhteet sekä hakkuutähdekasan tiiviys. Kuiva-ainetappion suuruuteen pystytään vaikuttamaan oikealla haketusajankohdalla. (Nurmi & Hillebrand 2007) Kosteus on myös tärkeä huomioida kuiva-ainetappiota tarkasteltaessa, koska se vaikuttaa varastossa kertyvän kuiva-ainetappion suuruuteen (Filbakk ym. 2011). Filbakk ym. (2011) tutkimuksen mukaan suurimmat kuiva-ainetappiot olivat varastoissa, jotka omasivat kuivumisen kannalta heikoimmat varastointiolosuhteet läpi kuivumiskauden.

1.5 Tutkimuksen tavoitteet

Nopeutetun hakkuutähteiden hankinnan eli fast track -hankinnan kustannuksista ei ole vielä olemassa aikaisempaa tutkimusta. Tutkimuksen tavoitteena onkin selvittää nopeutetun hakkuutähteen hankinnan kustannusvaikutuksia nykyisessä hankintaympäristössä sekä tunnistaa kustannuksiin merkittävästi vaikuttavat tekijät.

Päätutkimusongelman mukainen ennakkohypoteesi oli, että käyttöpaikkakustannukset ovat fast track -hankinnassa alhaisemmat perinteiseen verrattuna, koska tienvarsivarastoinnin aiheuttama pääomakustannus ja kuiva-ainetappio ovat suuruudeltaan pienemmät

Päätutkimusongelmasta rakentuivat seuraavat tutkimuskysymykset:

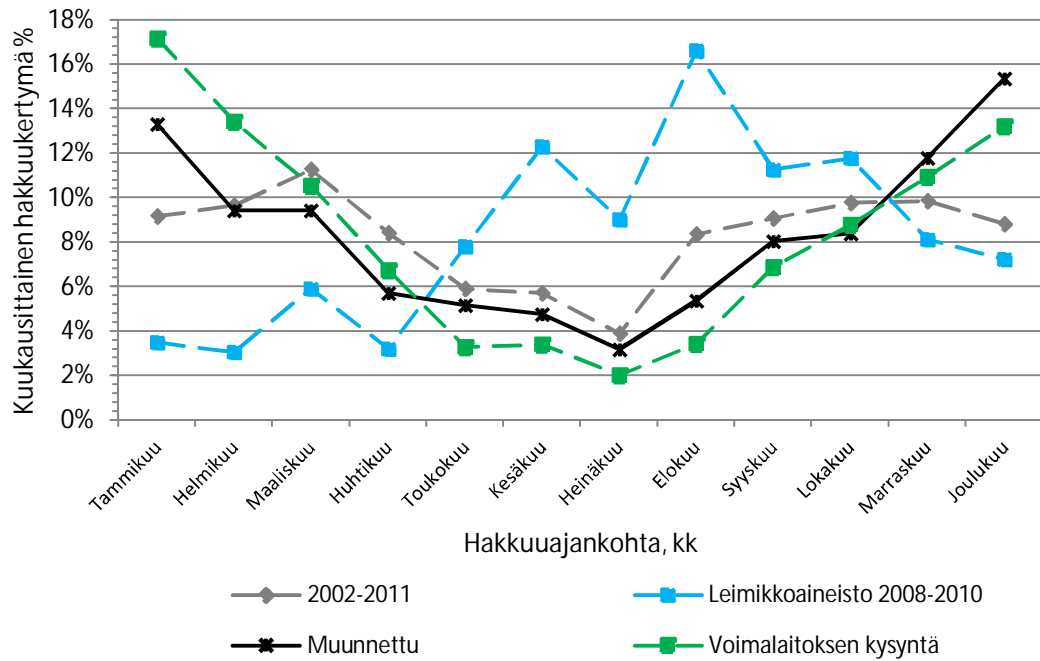
- 1) Mikä kustannusero on fast track -hankinnan ja perinteisen hankinnan välillä?
- 2) Mikä vaikutus hakkuutähteen tienvarsivarastoinnilla on hakkuutähdehakkeen hankintakustannuksiin?
- 3) Kuinka suuri osuus pääomakustannuksella ja kuiva-ainetappiolla on varastointikustannuksissa?

Kysymyksiin vastaamiseksi työssä selvitettiin ohjaamalla hakkuutähdehake työlajiperusteisesti käyttöpaikalle, että onko hankintayrityksen mahdollista pienentää hankintakustannuksia fast track -hankinnalla. Mielenkiinnon kohteena on selvittää hakkuutähteen tienvarsivarastoinnin vaikutusta hakkuutähdehakkeen yksikkökustannuksiin. Lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan varastoinnin jälkeistä hakkuutähteen prosessoinnin vaikutusta yksikkökustannuksiin. Lopputuloksiin perustuen tehtiin vertailulaskelmia perinteisen hankintaketjun ja fast track -hankintaketjun välillä.

2 Aineisto ja menetelmät

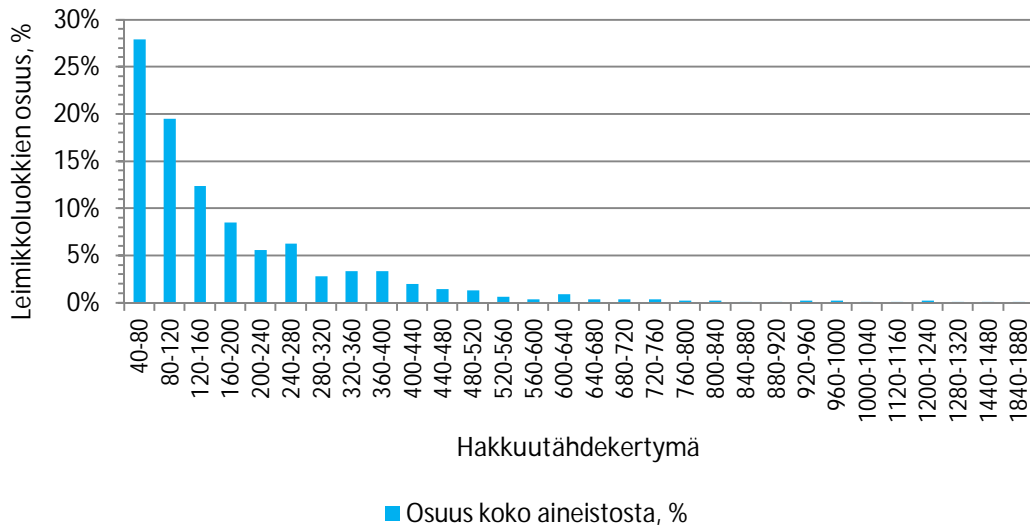
2.1 Leimikkoaineisto

Tutkimusaineiston koe-erät toimivat laskennassa lähtöaineistona. Ne perustuivat BEST-hankkeessa (Sustainable Bioenergy solutions for Tomorrow) mukana olevan suuren mittaluokan bioenergia-alan toimijan kuusivaltaisten päätehakuuleimikoiden lohkokohtaisiin hakkuutietoihin (Cleen, 2015). Aineistoa on käyttänyt Johannes Windisch ym. (2014) hakkuutähteen täsmäkuljetustutkimuksessa. Päätehakuut sijoittuivat Pohjois-Karjalan alueelle ja ne on tehty vuoden 2008 puolesta välistä 2010 puoleen väliin. Alkuperäisestä aineistosta mukaan laskentaan otettiin tiedot hakkuupäivämääristä, hakkuutähdekertymistä sekä kaukokuljetusmatkoista. Alkuperäisessä aineistossa kesäkauden hakkuukertymien osuudet olivat talvikautta suuremmat, mikä on normaalissa tilanteessa tavallisesta poikkeavaa. Syitä epäsuotuisalle kertymäjakaumalle voi olla useita. Esimerkiksi vuodenajan lämpötilojen vaihtelut ja sekin, että kyseessä on vain yhden bioenergia-alan toimijan tapauskohtainen aineisto. Laskennan kannalta suotuisaan sekä mahdollisimman todenmukaista tilannetta noudattavaan lopputulemaan pääsemiseksi aineiston kertymäjakautta muunnettiin. Sitä muunnettiin niin, että kertymäjakauma vastasi keskimäärin vuosien 2002–2011 todellista tilastoitua hakkuukertymäjakautta ja Fortumin Joensuun CHP-voimalaitoksen vuoden 2010 kysyntäjakaumaa (Kuva 9.). Kesäkauden suhteellisesti suuremmat hakkuukertymät tasoitettiin talvihakkuukaudelle.



Kuva 9. Alkuperäisen leimikkoaineiston kuukausittaiset hakkuukertymäosuudet yhdessä muunnetun ja vuosien 2002–2011 tilastoidun kuukausittaisten hakkuukertymäosuuksien kanssa. Kuvaajaan on lisätty myös Joensuun Fortumin CHP-tehtaan vuoden 2010 suhteellinen kysyntäkäyrä.

Aineiston 900 koe-erästä mukaan otettiin leimikon kokorajoitteen jälkeen yhteensä 749 koe-erää (Kuva 10). 900 koe-erän hakkuutähdekertymä oli 150287 m³, josta rajoitteen jälkeen mukaan jäi 145922 m³. Leimikoiden valintakriteerinä käytettiin eräkohtaista 40 m³ hakkuutähdekertymäminimiä, joka on metsäteollisuuden yleisesti energiapuulle käyttämä kertymärajoite. Rajoitteella pyritään vähentämään kaukokuljetuksen tyhjänä ajoa (Asikainen ym. 2001 & Muinonen ym. 2013). Kuvassa 10 nähdään leimikkoaineiston jakautuminen kertymäluokkiin. Leimikoiden suhteellinen osuus laskee, mitä suurempi hakkuutähdekertymä on. Aineiston jakauma hajooa eksponentiaalisesti. Mitä suurempi hakkuukertymä on, sitä vähemmän niitä aineistossa on.

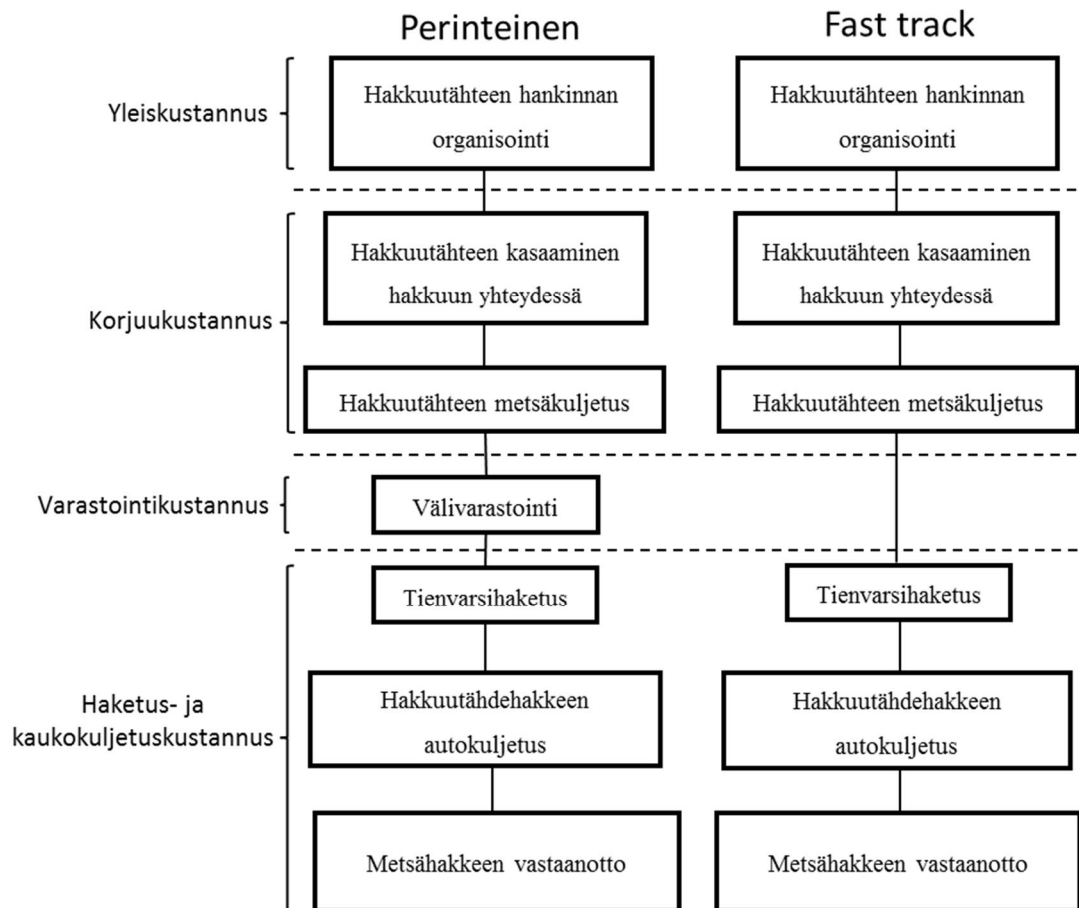


Kuva 10. Koe-eräaineiston 40 m³:n osuudet kertymäluokittain

2.2 Hankintakustannusten laskenta

2.2.1 Hankinnan kustannusrakenne

Hankintakustannukset laskettiin tienvarsihaketuksen perustavalle korjuuketjulle hankintaorganisaation näkökulmasta. Jokaiselle koe-erälle määritettiin hakkuupäivämäärään perustuva yhdenmukainen raaka-aineen ohjautuminen. Hakkuutähteen hankinta sekä perinteisesti että fast track -menetelmällä on esitetty kuvissa 7 ja 11. Tienvarsihaketusketjun hankintakustannukset muodostettiin hankinnan organisoinnista, ainespuuhakkuun yhteydessä hakkuutähteen ajouran viereen kasaamisesta, metsäkuljetuksesta, varastoinnin aikana syntyvistä pääomakustannuksista ja kuiva-ainetappiosta, haketukselta, kaukokuljetuksesta sekä käyttöpaikalla metsähakkeen vastaanotosta (Kuva 11).



Kuva 11. Hakkuutähdehakkeen hankinnan työvaiheet ja kustannusrakenne perinteisessä ja fast track tienvarsihaketusketjussa.

Kustannusten laskenta suoritettiin taulukkolaskennan mukaisesti excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Apuna käytettiin VBA (Visual Basics for Applications) -ohjelmointia, jolla määritettiin raaka-aineen loppukosteus. Hakkuutähdehakkeen korjuukustannukset laskettiin jokaiselle koe-erälle työvaiheittain sekä fast track -, että perinteiselle tienvarsihaketusketjulle. Laskennassa huomioon otettava maanomistajalle maksettava kantohinta, hankinnan yleiskustannukset (organisaatiokustannus) ja hakkuutähteen kasaamiskustannukset hakkuun yhteydessä ovat kiinteät jokaiselle koe-erälle. Keskimääräiset työläjikohtaiset kustannukset on painotettu tilavuudella. Laskennassa leimikkoaineiston ulkopuolelta tulleet tiedot on listattu liitteeseen 1.

2.2.2 Kantohinta, yleis-, hakkuu- ja lähikuljetuskustannukset

Ensimmäinen kulu-erä on kantohinta, joka oletetaan maksettavaksi maanomistajalle kuukausi hakuiden päätyttyä. Metsäyhtiöiden yleisesti käyttämää ennakkomaksua ei laskennoissa otettu huomioon. Ennakkomaksu on metsäyhtiöiden yleisesti käyttämä maksutapa puukauppojen yhteydessä, jolloin maanomistaja saa ennakkoon päätetyn osuuden lopullisesta maksusta arvioidusta puukaupparamäärästä. Sen suuruus vaihtelee puukauppa-kohtaisesti välillä 20–50 %. Laskennassa hakkuutähteen kantohintana käytettiin vuoden 2015 kolmannen vuosineljänneksen keskimääräistä kantohintaa (3,5 €/m³) (Luke, 2015b). Oletuksena oli, että kantohinta maksettiin kuukausi hakkuun jälkeen. Korjuusta ja hankinnan organisoinnista syntyvä organisaatiokustannus (yleiskustannus) oletetaan olevan 2,5 €/m³, joka vastaa vuoden 2013 keskimääräistä yleiskustannustasoa (Strandström, 2015a). Hakkuutähteen erillisestä kasaamisesta ajouran viereen oletetaan kertyvän oma kustannuseränsä, joka on muunnettu ajan tasalle metsäalan kone- ja autokustannusindeksillä (MEKKI). Siitä syntyy kustannuksia 0,33 €/m³ (SVT 2015c & Laitila ym. 2010).

Metsäkuljetuksen tuottavuus laskettiin Asikaisen ym. (2001) ajanmenekkimallilla, jossa metsäkuljetuksen tehotuntituottavuus muutetaan käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,2. Metsätraktorin kuormakokona käytetään 7,8 m³ (Ihalainen & Niskanen, 2010). Laskennassa ei huomioitu metsätraktorin siirtokustannuksia. Kuusivaltaisen päätehakkuualan vakio-pinta-alana käytetään Väätäisen ym. (2007) tutkimukseen perustuvaa päätehakkuukohtaista keskimääräistä lohkopinta-alaa 2,35 ha. Lähikuljetusmatkana käytetään 215 m, joka perustuu Asikaisen ym. (2001) tutkimuksessa saatuun Joensuun seudun keskimääräiseen lähikuljetusmatkaan hakkuutähdekohteilla, joissa korjuun minimirajoitteena käytettiin 40m³.

Taulukko 1. Lähtöarvot organisointi-, hakkuu- ja lähikuljetuskustannuksille

Muuttuja / Rajoite	Lähtöarvo	Lähde
Organisointikustannus €/m ³	2,5	Strandström, 2015a
Kasoille hakkuu €/m ³	0,33	Laitila ym. 2010 & SVT
Keskimääräinen etäisyys, m	215	Asikainen ym. (2001)
Kuormakoko, m ³	7,8	Ihalainen & Niskanen (2010)
Käyttötuntikustannus, €/h	73,07	Prinz ym. (2015)
Metsäkuljetuksen käyttötuntikerroin	1,2	Laitila ym. 2010

2.2.3 Varastointikustannus

Varastointikustannukset muodostuvat varastoon sidotusta pääomakustannuksesta sekä kuiva-ainetappiosta, jotka ovat suoraan verrannollisia aikaan. Tienvarsivarastoinnista aiheutuvaa pääomakustannusta ja kuiva-ainetappiosta syntyvää kustannusta on tutkittu vähän. Pääomakustannus ja kuiva-ainetappio lasketaan käyttäen korkoa korolle kaavaa (Kaava 1).

Varastointiaika vaikuttaa suoraan molempien suuruuteen. Varastointiajaksi perinteiselle menetelmälle oletetaan vuosi- ja fast track -menetelmällä yhdestä kahteen viikkoa (Taulukko 2). Fast track -hankintakauden oletettiin alkavan huhtikuun ensimmäisestä päivästä ja päättyvän syyskuun viimeiseen päivään perustuen Sikasen ym. (2013) kosteudenmuutos- ja algoritmihaiduntaan (ks. luku 2.3, s. 32-33). Ne ovat vakioita, eikä niiden määrittämisessä ole otettu huomioon esimerkiksi lämpöarvon optimia tietynä ajankohtana. Varastointiajat on määritelty Joensuussa toimivan CHP -voimalaitoksen vuoden 2010 kysyntäjakauman mukaiseksi.

$$K = k * \left(1 + \frac{p}{100}\right)^t \quad [1]$$

jossa k = pääoman suuruus
p = pääoman suuruus
t = aika

Pääomakustannus perustuu tienvarsivarastoon sidottuun pääomaan. Pääoman ollessa sidottuna varastoon, laskee sen arvo ajan funktiona. Pääomakustannukset lasketaan käyttäen kolmea sisäistä pääomakorkokantaa (3 %, 8 % ja 12 %), jotka kuvaavat yrityksen omalle pääomalle asettamaa vaihtoehtoiskustannusta (Vehmanen & Koskinen, 1997). 3 % pääomankorko on yleisesti metsätieteessä käytetty korkokanta. 8 % on metsäteollisuusyritysten usein käyttämä korkokanta. 12 % korko on harvemmin käytetty ja se on tutkimuksessa pääomakustannuksen herkkyyden tarkastelussa.

Kuiva-ainetappion tarkka määrittäminen on vaikeaa, koska sen vaihtelu riippuu täysin tienvarsivaraston ominaisuuksista ja varaston maantieteellisestä sijainnista. Sen suuruuden määrittämiselle ei vielä ole määritetty tarpeeksi vakuuttavaa arviointimetodia. Näin ollen tutkimuksessa lasketaan aikaisempaan tutkimustulokseen perustuvia kuukausittaisia % -kertymiä (1 %, 2 % ja 3 %) (Filbakk ym. 2011). Kuiva-

ainetappio määritettiin syntymään yli kuukauden tienvarsivarastoinnissa oleville hakkuutähdekasveille. Fyysinen materiaalihävikki ja biologiset prosessit ovat suhteellisen pienet, joten kuiva-ainetappiota ei ehdi kertymään alle kuukauden varastointijaksolla (Routa ym. 2015). Kuiva-ainetappion määrä lasketaan käyttäen apuna Hakkilan (1978) kuusihakkuutähdehakkeelle määrittämää kuiva-ainetiheyttä 425 kg/m^3 , jonka oletetaan olevan sama sekä vihreällä että ruskealla hakkuutähteellä. Biologisten prosessien aiheuttama kuiva-ainetiheyden aleneminen otetaan huomioon laskennassa kuiva-ainetappioita laskettaessa.

Taulukko 2. Varastointiajat hakkuuajankohdan mukaan

Hakkuuajankohta	Varastointiajan pituus, kk	
	Perinteinen	Fast track
Loka-maaliskuu	12	12
Huhti-toukokuu	12	0,23
Kesä-syyskuu	12	1
Keskimääräinen varastointiaika	12	7,8

2.2.4 Haketuskustannus

Haketuksen yksikkökustannus laskettiin hakkurin käyttötuntituottavuuden ja tuntituottavuuden avulla. Raaka-aineen kosteudella oli laskennallinen merkitys. Kosteuden vaikutus haketuskustannuksiin otetaan huomioon hyötykuormassa ja tuottavuudessa. Asikaisen ym. (2001) tutkimuksen mukaan tuoreen hakkuutähteen haketus on 25 % tehokkaampaa kuivuneeseen nähden. Se huomioitiin haketuksen ajanmenekkiä laskiessa vaikuttaen lopulta sen tuottavuuteen. Tehokkuuseroon vaikuttaa kuivemman materiaalin leikkauslujuuden kasvu sekä kourataakkojen mukana tulleen epäpuhtauden aiheuttama hakkurin terien vaihtotarve. Toisaalta hakkureiden teknologia on parantunut ja tehot ovat suurentuneet huomattavasti viimeisen 15 vuoden aikana ja näin ollen todellinen ero voi olla pienempi (Laitila, Juha. Suullinen tiedonanto 15.3.2016). Haketuksen tuottavuus määritettiin kuorman koon ja kuormausajan mukaan. Kuorman koko laskettiin materiaalin painon ja kuorman kehystilavuuden avulla. Haketuksen aika laskettiin haketuksen tuottavuuden ja hakeauton avulla. Laskennallinen hakemääräpaino ja yhdistelmän oma massa rajoitettiin niin, etteivät ne saaneet ylittää hakeauton hyöty-

kuormaa 41,3 t (Taulukko 4). Haketuksen käyttötuntituottavuudeksi oletettiin 166,48 €/h, jota käyttäen saatiin lopullinen haketuskustannus (Prinz ym. 2015, Taulukko 3).

Taulukko 3. Lähtöarvot haketuksen ja hakkeen ominaisuuksien laskennassa

Muuttuja	Lähtöarvo	Lähde
Haketuksen käyttötuntikustannus, €/h	166,48	Prinz ym. (2015)
Kuiva-ainetiheys, kg/m ³	425	Hakkila (1978)
Maksimi kosteus, %	57	Erber ym. (2014) & Sikanen ym. (2013)
Hakkeen lämpöarvo, Mj/kg	19,2	Alakangas ym. (2013)
Käyttöpaikkahinta, €/MWh	21,2	SVT (2015b)

2.2.5 Kaukokuljetuskustannus

Kaukokuljetuksen kuormattuna ja tyhjänä ajon ajanmenekkien laskennassa käytettiin Nurmisen ja Heinosen (2007) autokuljetuksen ajanmenekkimalleja. Kaukokuljetuksen kustannukset perustuivat työvaiheiden ajanmenekkeihin, joita ovat kuormattuna ja tyhjänä ajo sekä terminaaliaika. Terminaaliaika sisälsi kuormauksen, purun, punnituksen ja apuaikojen ajanmenekin. Hakkuutähdehakkeen kuormausaika on suoraan kytköksissä haketuksen aikaan, joka huomioitiin tässä laskelmassa kuivan ja kostean haketuksen välisiä tuottavuuksia laskettaessa (ks. luku 2.2.4, s. 30).

Hakeauton kustannustiedot perustuivat Laitila ym. (2016) kaukokuljetuskustannustutkimukseen. Hakeautona käytetään 3 + 5 akselista hake-autoyhdistelmää, jonka kuormakoko hakkuutähteelle on 50 m³ (125 i-m³) ja hyötykuorma 41300 kg (kokonaismassa 68800 kg). Kyseisen hakeauton ajotuntikustannus on 73,4 €/h ja terminaalituntikustannus 48,7 €/h (Laitila ym. 2016). Kuljetettavan hakkuutähdehakkeen massan määrittämisessä käytettiin hyötykuorman lisäksi 425 kg/m³ kuiva-ainetiheyttä ja materiaalin kosteutta haketushetkellä (Hakkila, 1978). Etäisyytenä kaukokuljetuksessa käytettiin aineiston leimikkokohtaisia 20km, 40km, 60km, 80km, 100km sekä 120km:n matkoja (Taulukko 4).

Taulukko 4. Kaukokuljetuskustannuksessa käytettävät lähtöarvot

Muuttuja / Rajoite	Lähtöarvo	Lähde
Hakeauton ominaisuudet		
- Massa, t	68,8	Korpilahti (2015)
- Hyötykuorma, t	41,3	Korpilahti (2015)
- Tilavuus, m ³	50 (125 i-m ³)	Korpilahti (2015)
Ajotuntikustannus, €/h	73,4	Laitila ym. (2016)
Terminaalituntikustannus, €/h	48,7	Laitila ym. (2016)
Leimikon ja käyttöpaikan väliset etäisyysluokat, km	20, 40, 60, 80, 100, 120	
Keskimääräinen etäisyys käyttöpaikalle, km	80	

2.3 Hakkuutähteen kosteus

Hakkuutähteen kosteuden määrittäminen oli laskennan kannalta tärkeää, koska kosteus vaikuttaa materiaalin lämpöarvon lisäksi suoraan tienvarsihaketuksen ja kaukokuljetuksen tuottavuuteen. Kuiva-ainetappiosta syntyvän materiaalihävikin aiheuttamat kustannukset ja kaukokuljetuksen kustannukset perustuivat hakkuutähdehakkeen loppukosteuteen. Kosteus määrittää materiaalin tehollisen lämpöarvon ja sen, kuinka paljon se sisältää vettä.

Jokaiselle koe-erälle määritettiin alkukosteus, joka perustui Erberin ym. (2014) kuukausiperusteiseen tuorekosteustaulukkoon (Taulukko 5). Päivittäinen kosteudenmuutos saatiin Sikasen ym. (2013) tutkimuksesta, jossa tarkastellaan kokoenergiapuun päivittäiseen kosteudenmuutokseen keskisuomalaisessa tienvarsivarastossa vuonna 2010 (Taulukko 6). Päivittäinen kosteudenmuutos on useasta kosteudenmuutosmallista kehitetty algoritmi. Materiaalin loppukosteuden määrittämisessä käytettiin Visual Basics -ohjelmointia. Laskentaan luotiin funktio, jolla laskettiin materiaalin kosteuden muutos ajan suhteen. Funktio otti huomioon materiaalin hakkuuajankohdan mukaisen alkukosteuden, johon summattiin päivittäinen kosteudenmuutos läpi varastointiajan (Kaava 2).

$$M = M_x + \sum_0^t DMC_t \quad [2]$$

jossa M_x = Hakkuutähteen alkukosteus

DMC_t = Päivittäinen kosteuden muutos
ajanhetkenä t

Taulukko 5. Tuoreen hakkuutähteen kuukausittainen kosteuspitoisuus (%) tammikuusta (1) lähtien (Erber ym. 2014).

Puulaji/ Kuukausi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kuusi	57	57	57	56	56	55	55	57	57	57	57	57

Taulukko 6. Päivittäinen kokoenergiapuun kosteudenmuutos tavanomaisessa keski-suomalaisessa tienvarsivarastossa vuonna 2010 (Sikanen ym. 2013).

Kuivumisajanjakso		Päivien lukumäärä	Kosteuden muutos aikajaksolla (%)	Päivittäinen kosteuden muutos (%)
Alku	Loppu			
01.01.2010	28.02.2010	58	0	0,000
01.03.2010	01.04.2010	31	3	0,097
02.04.2010	15.06.2010	74	12	0,162
16.06.2010	30.07.2010	44	5	0,114
31.07.2010	31.08.2010	31	1,5	0,048
01.09.2010	30.11.2010	90	-12	-0,133
01.12.2010	31.12.2010	30	0	0,000

2.4 Analyysi

Tutkimus oli luonteeltaan tapaustutkimus, jossa verrattiin keskenään kahta eri toimintamallia ja niiden eroja hakkuutähteen hankintaketjun eri vaiheiden kustannuksissa ja kokonaiskustannuksissa. Fast track -hankinnan ja perinteisen hankinnan eroavaisuudet ja niiden vaikutus eri kustannustekijöihin määriteltiin aiempaan tutkimustietoon perustuen ja vertailu tehdään ohjaamalla yhden vuoden kokonaisuus metsästä laitokselle kahdella eri tavalla ja laskemalla toimenpiteistä aiheutuvat kustannukset. Laskenta ei sisältänyt tässä vaiheessa riippuvuutta hankinnan vaiheiden välillä, jolloin taulukkolaskenta oli riittävä menetelmä, eikä esim. diskreettiä tapahtumasimulointia tarvittu.

Tilastollista analyysia tehtiin testiaineiston koostamisessa. Kuukausittainen hakkuuden jakauma oli merkittävä, jotta vertailtavilla menetelmillä korjattava biomassa on

oikeassa suhteessa todelliseen puunhankinnan volyymiin ja voimalaitosten polttoaineen kysyntään. Tarkoituksenmukainen tutkimuksen tavoitteet huomioiva tarkkuus ei edellyttänyt tilastomatemattista menetelmää, vaan silmävarainen allokointi oli riittävä.

2.5 Tutkimuksen virhelähteet

Laskennassa virhelähteitä on useita, joista tärkeimpinä voidaan mainita laskennassa mukana käytettyjä aikaisempiin tutkimuksiin ja tilastoihin perustuvia keskimääräisiä lukuarvoja. Lisäksi tutkimuksessa käytettiin valmiita laskentamalleja lähi- ja kaukokuljetuskustannuksia laskettaessa. Keskiarvoillisten lukuarvojen käyttö voi hieman vääristää eri työvaiheiden kustannuksia. Kuitenkaan niiden käyttö tämän kaltaisessa vertailulaskelmassa ei vahingoita tai vääristä tutkimuksen tuloksia tai tulosten oikeellisuutta. Haketus- ja kaukokuljetuskustannusten laskennassa virhelähteenä voidaan pitää tuoreen materiaalin tehokkaampi haketus (ks. luku 2.2.4, s 30). Se pienensi fast track -hankinnan haketus- ja kaukokuljetuskustannusten eroa perinteiseen verrattuna. Tehokkuusero perustuu 2000-luvun alun tutkimukseen, jonka jälkeen haketukseen käytettävä teknologia on ollut edistyksellisempää ja voidaan olettaa, että haketuksestakin on tullut tehokkaampaa. Toisaalta hakkuutähteen haketuksesta ei ole tehty uudempia vertailututkimuksia, mikä voi johtua muun muassa tuoreen hakkuutähteen alhaisesta kysynnästä. Toisena teknologisenä virhelähteenä voidaan pitää hakeauton kokoa, jolla on vaikutus kaukokuljetuksen tuottavuuteen. Kaukokuljetuksen kuormankokoa muuttamalla päästään hieman eri lopputulemaan. Fast track -hankinnalle olisi edullisempaa käyttää suurempia autokokoluokkia, koska tällöin kuljetettavan hakkeen sisältämän veden massa ei rajoittaisi ajoja. Lisäksi kaukokuljetuskustannuslaskennassa rajoitteena tulisi huomioida tiestön kunto eri vuodenaikoina. Se vähentäisi hieman hakkuukertymää fast track -hankinnalle.

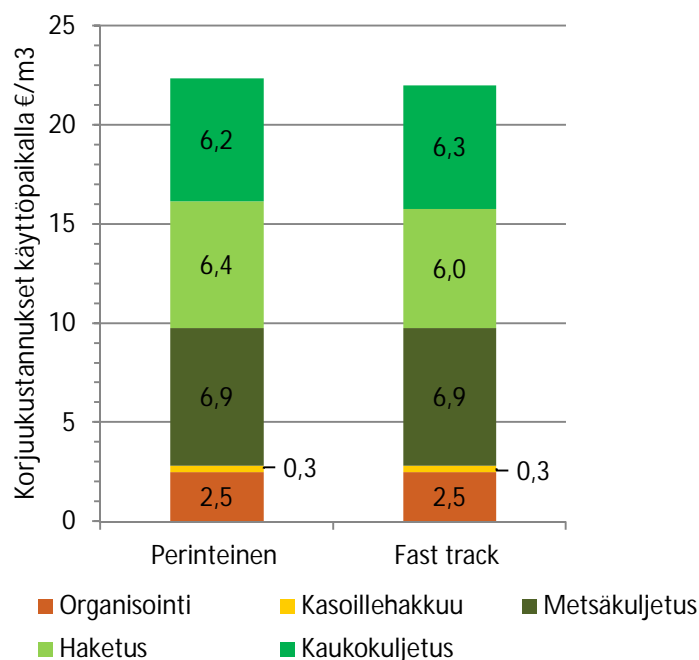
3 Tulokset

3.1 Hankintamenetelmien tunnusluvut

Hakkuutähdekertymä yhdelle vuodelle oli 145922 m³, josta 32 % korjattiin fast track -kaudella. Koe-eräkohtainen keskimääräinen hakkuutähdekertymä oli 194,8 m³/koe-erä. Keskimääräinen kuljetusmatka kannolta käyttöpaikalle oli 80 km. Nopeutetun hankinnan piiriin kuuluivat kaikki huhti- syyskuun välillä hakkuussa olleet leimikot. Muuna aikana hakkuuseen tulleet leimikot korjattiin perinteisen mallin mukaan. Hakkuutähteen kosteudet vaihtelivat perinteisen ja fast track -menetelmän välillä. Perinteisen hakkuutähteen kosteus oli keskimäärin 43,9 % ja fast track menetelmällä 48,2 %. Kokonaisenergiamäärät vaihtelivat kuukausittaisen kuiva-ainetappiokertymän suuruuden mukaan. Kuiva-ainetappion vaikutusta energiasaantoon käsitellään enemmän luvussa 3.3 s. 34–36.

3.2 Operatiiviset kustannukset

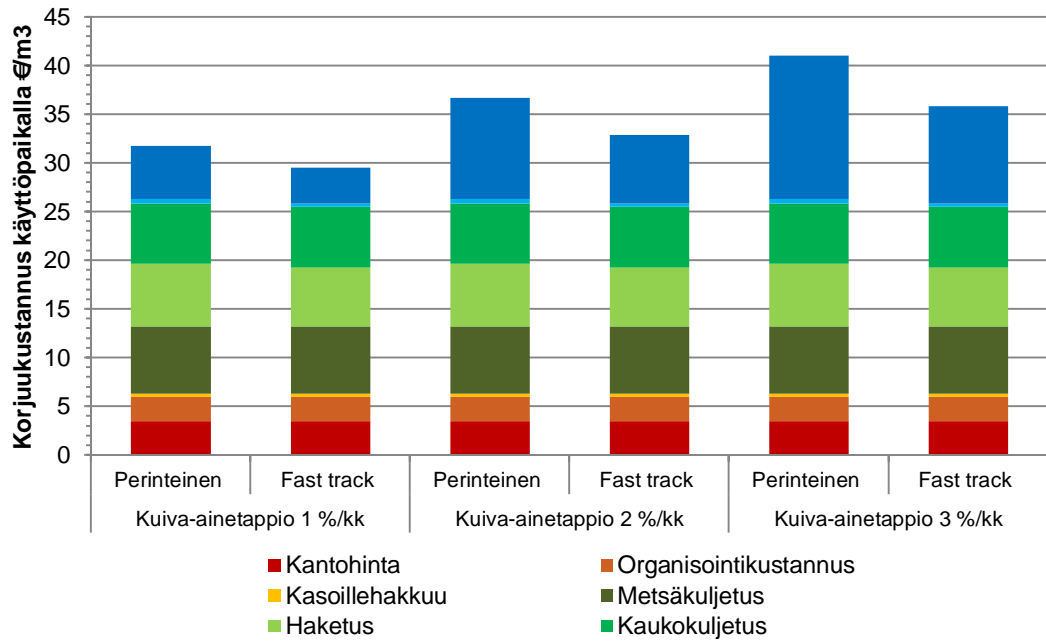
Hakkuutähdehakkeen keskimääräinen korjuukustannus organisointikulut mukaan luettuna käyttöpaikalla oli perinteisellä hankintaketjulla keskimäärin 22,4 €/m³ ja vaihteluväli 19,1–26,0 €/m³. Fast track -hankintaketjulla kustannus oli keskimäärin 22,0 €/m³ ja vaihteluväli oli 18,0–25,8 €/m³. Organisointi-, kasoille hakkuu- ja metsäkuljetuskustannukset olivat molemmille korjuuketjuille samat. Organisointikustannus oli 2,5 €/m³. Hakkuutähteen kasoihin hakkuun kustannus oli 0,3 €/m³ ja metsäkuljetuksen keskimääräinen yksikkökustannus 6,9 €/m³. Haketus- ja kaukokuljetuskustannukset vaihtelivat toisistaan hankintamuodon mukaan. Perinteisellä haketuskustannus oli keskimäärin 6,4 €/m³ ja fast track -hankinnalla 6,0 m³. Kaukokuljetuskustannus oli perinteisellä 6,2 €/m³ ja fast track -hankinnalla 6,3 €/m³. (Kuva 12, Liite 2)



Kuva 12. Operatiivisten työvaiheiden tilavuudella painotetut keskimääräiset yksikkökustannukset (€/m³).

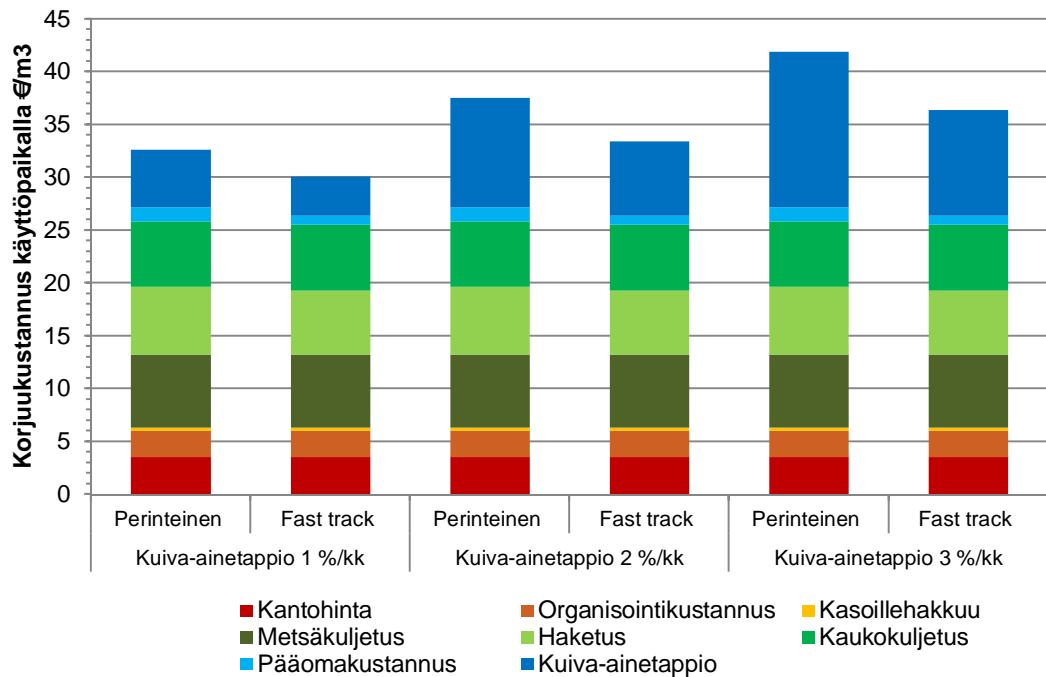
3.3 Hankintakustannukset

Hakkuutähdehakkkeen hankintakustannukset olivat perinteisellä menetelmällä keskimäärin suuremmat kuin fast track –hankinnalla (Kuvat 13, 14 & 15). Perinteisen hankinnan yksikkökustannukset olivat 3 %:n vuotuisella pääomankorolla ja 1 %:n kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla yhteensä 31,8 €/m³ ja vaihteluväli erien välillä oli 28,5–35,5 €/m³. 2 %:n kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla yksikkökustannus oli 36,9 €/m³ ja vaihteluväli 33,4–40,4 €/m³, sekä vastaavasti 3 % kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla 41,3 €/m³ vaihteluvälin ollessa 37,8–44,7 €/m³. Fast track -hankinnan vastaavat kustannukset 3 %:n pääomankustannuksella ja 1 %:n kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla 29,5 €/m³ vaihteluvälillä 21,4–35,3 €/m³. 2 %:n kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla oli 33,1 €/m³ vaihteluvälillä 21,4–40,2 €/m³, sekä hankintakustannus 3 %:n kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla oli 36,0 €/m³ ja sen vaihteluväli 21,4–44,54 €/m³. Kuukausittaisen kuiva-ainetappion vaikutus kustannuksiin oli tulosten perusteella merkittävämpi kuin varastoinnista syntyvän pääomakustannuksen. Kuukausittaisen kuiva-ainetappiokertymän kasvaessa ja pääomakoron suurentuessa myös varastoinnin kuluerä kasvoi.

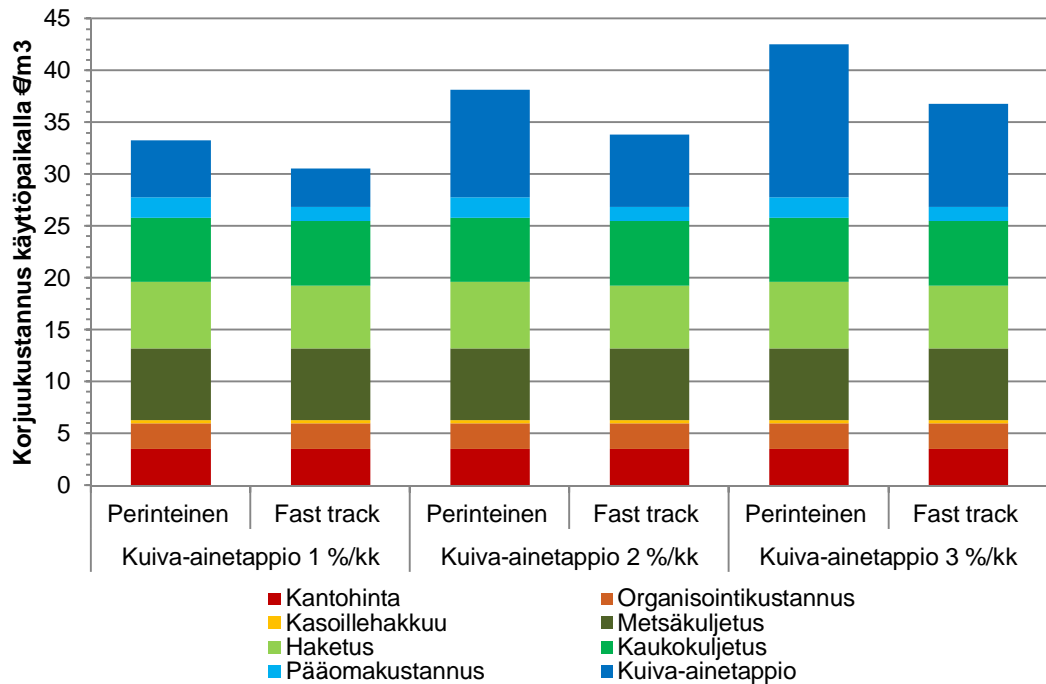


Kuva 13. Hakkuutähdehakkeen kustannusrakenne kolmella eri kuiva-ainetappiokertymällä (1 %/kk, 2 %/kk, 3 %/kk) ja 3 % pääoman korkokannalla.

Perinteisen ja fast track -hankinnan väliset erot 8 %:n ja 12 %:n pääoman koron vaihtelun vaikutuksilla on esitelty kuvissa 14 ja 15, sekä lukuarvoittain liitteen 2 taulukoissa 9, 10 ja 11.



Kuva 14. Hakkuutähdehakkeen kustannusrakenne kolmella eri kuiva-ainetappiokertymällä (1 %/kk, 2 %/kk, 3 %/kk) ja 8 % pääoman korkokannalla.



Kuva 15. Hakkuutähdehakkeen kustannusrakenne kolmella eri kuiva-ainetappiokertymällä (1 %/kk, 2 %/kk, 3 %/kk) ja 12 % pääoman korkokannalla.

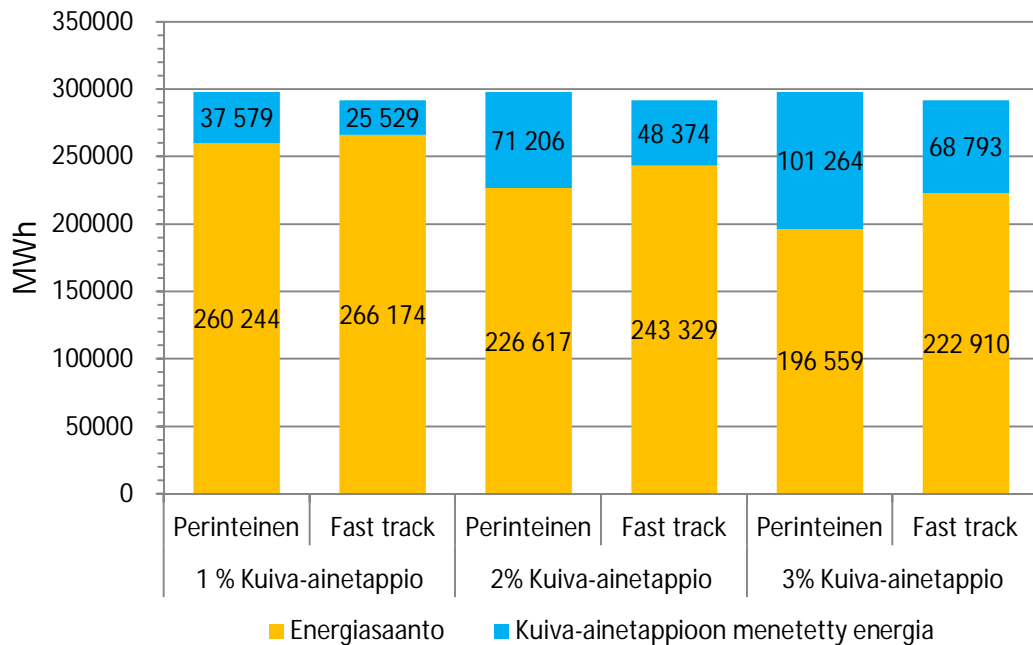
3.4 Kuiva-ainetappio

Taulukko 7:ssä on energiamäärällä painotetut keskimääräiset energiakohtaiset kustannukset (€/MWh) eri kuukausittaisilla kuiva-ainetappiokertymillä. Kuiva-ainetappion aiheuttama kustannus vaihtelee kuukausittaisen kertymän mukaisesti. 1 %:n kuiva-ainetappio synnyttää perinteisellä menetelmällä 3,1 €/MWh (5,5 €/m³) kulu-erän ja 2 %:n kuiva-ainetappiolla kustannus oli 6,7 €/MWh (10,4 €/m³) sekä 3 %:n kuiva-ainetappiolla 10,9 €/MWh (14,7 €/m³). Vastaavasti fast track -hankintaketjulla 1 %:n kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla kustannus oli 2,0 €/MWh (3,7 €/m³) ja 2 %:n kuiva-ainetappiolla kustannus oli 6,7 €/MWh (7,0 €/m³) sekä 3 %:n kuiva-ainetappiolla kustannuksen suuruus nousi 4,9 €/MWh (10,0 €/m³) (Taulukko 7. & Liitteet 2 & 3).

Taulukko 7. Kuiva-ainetappion aiheuttama energiamäärällä painotettu keskimääräinen yksikkökustannus perinteiselle ja fast track -menetelmälle eri kuukausittaisilla kuiva-ainetappiokertymillä (€/MWh)

	1 %/kk Kuiva-ainetappio	2%/kk Kuiva-ainetappio	3 %/kk Kuiva-ainetappio
Perinteinen	3,1 €/MWh	6,7 €/MWh	10,9 €/MWh
Fast track	2,0 €/MWh	4,2 €/MWh	6,6 €/MWh

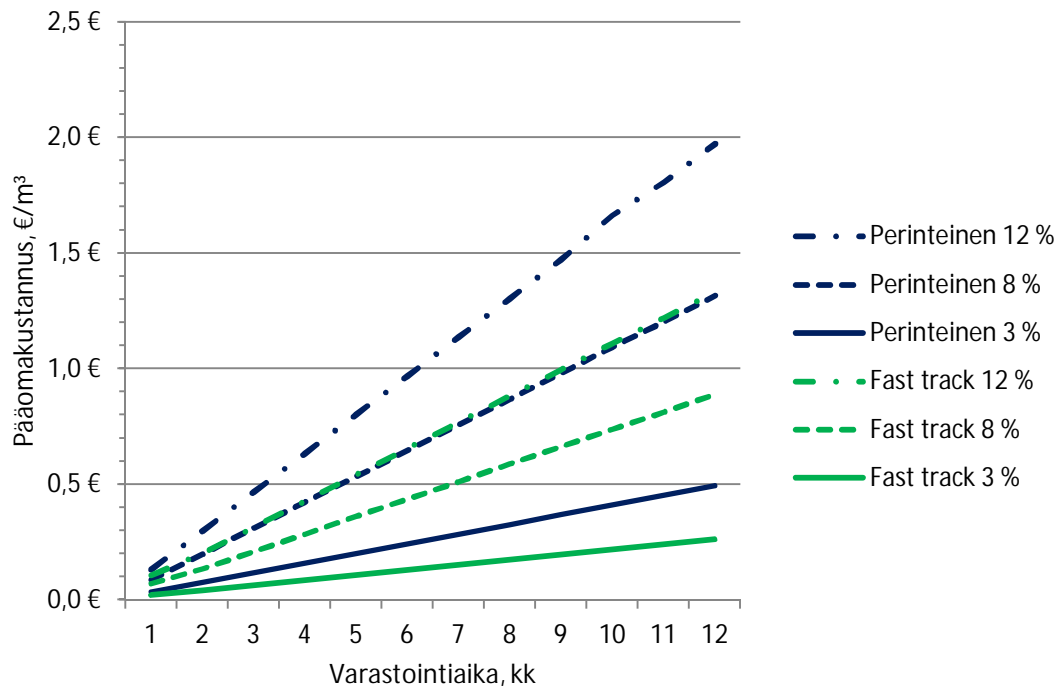
Kuvassa 16. verrataan perinteisen ja fast track -hankinnan välistä energiasaantoa ja kuiva-ainetappioon menetettyä energiamäärän suuruutta. 1 %:n kuiva-ainetappiolla perinteisestä saatava energiasaanto on 260244 MWh ja fast trackillä 266174 MWh. Kuiva-ainetappion aiheuttama energiahävikki perinteisellä on 37579 MWh eli 13 % energiapotentiaalista ja fast trackillä 25529 MWh eli 9 % energiapotentiaalista. 2 %:n kuukausittaisella kuiva-ainekertymällä osuudet eroavaisuudet kasvavat. Perinteisen energiasaanto oli 226617 MWh ja fast trackin 243329 MWh. Kuiva-ainetappiokertymän suuruus perinteisellä oli 71206 MWh (24 % energiapotentiaalista) ja fast trackin 48374 MWh (17 % energiapotentiaalista). 3 % kuukausittaisella kuiva-ainetappiolla energiasaanto oli 196559 MWh ja fast trackillä 222910 MWh. Kuiva-ainetappion suuruus oli perinteisellä 101264 MWh (34 % energiapotentiaalista) ja fast trackillä 68793 MWh (24 % energiapotentiaalista). Mikäli kuiva-ainetappiota ei olisi ollenkaan, olisi tämän tutkimuksen perinteisessä skenaariossa suurin energiasaanto 297823 MWh. Tässä luvussa energiapotentiaalilla tarkoitettiin laskennallista skenaarion suurinta energiamäärää, joka voidaan saavuttaa, mikäli kuiva-ainetappiota ei synny.



Kuva 16. Aineiston hakkuutähdekertymästä saatavan energiamäärän suuruus ja kuiva-ainetappioon menetetyn energiamäärän suuruus (MWh).

3.5 Pääomakustannus

Pääomakustannukset olivat perinteisessä hankintaketjussa suuremmat, johtuen hakkuutähteen varastoinnista. Kuvassa 10. näkyy perinteisen ja fast track -hankinnan 12 kuukaudessa kertynyt keskimääräinen pääomakustannus kolmella eri korkokannalla. Perinteisen -hankinnan osalta 3 %:n korolla keskimääräinen pääomakustannus oli 0,49 €/m³ ja fast track -hankinnalla 0,26 €/m³. 8 %:n korolla keskimääräinen pääomakustannus perinteisellä nousee 1,32 €/m³ ja fast track -hankinnalla 0,89 €/m³. 12 %:n korolla pääomakustannus nousee perinteisellä menetelmällä 1,97 €/m³ ja fast track -hankinnalla 1,34 €/m³ (Kuva 17, Liite 2).



Kuva 17. Keskimääräinen pääomakustannus 12 kuukauden aikana kolmella eri pääoman korkokannalla

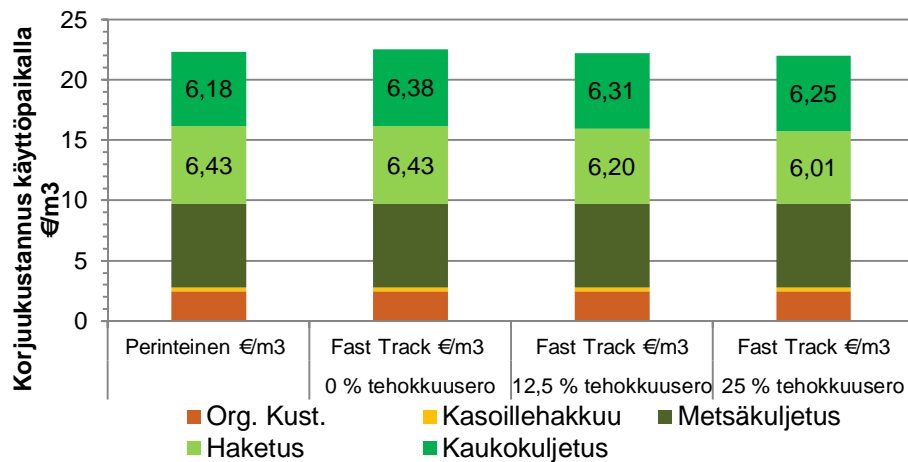
3.6 Herkkyysanalyysi haketuksen tehokkuuden vaikutuksesta

Tuloksien mukaan haketus oli tuoreelle hakkuutähteelle edullisempaa kuin varastossa säilytylle hakkuutähteelle. Näin ollen herkkyysanalyysin avulla haluttiin selvittää haketuksen tehokkuuden vaikutusta haketuksen ja kaukokuljetuksen yksikkökustannuksiin. Kuten jo edellä on mainittu, laskennassa käytetty tuoreen hakkeen haketus oletettiin 25 % tehokkaammaksi. Se on otettu laskelmissa huomioon haketuksen ajanmenekkiä vaikuttaen myös kaukokuljetuksen ajanmenekkiin (ks. luku 2.2.4 s. 30). Haketuksen teknologia on oletettavasti muuttunut tehokkaammaksi pienempi (Laitila, Juha. Suullinen tiedonanto 15.3.2016). Näin ollen herkkyysanalyysi koettiin tarpeelliseksi, jotta tehokkaamman tuottavuuden vaikutus kustannuksiin voitiin todentaa tarkemmin.

Herkkyysanalyysi perustui kolmeen eri haketusskenaarioon. Niissä fast track -hankinnan tehokkuutta muunnettiin kolmella eri % -arvolla (0 %, 12,5 % ja 25 %) (Kuva 18). Tehokkuuseromuunnoksien jälkeen haketuksen ja kaukokuljetuksen kustannuksia verrattiin perinteisen hankinnan kyseisten työvaiheiden yksikkökustannuksiin. Muihin hankintaan liittyviin työvaiheisiin ei puututtu.

Laskennassa tehokkaampi haketus lyhensi haketuksen ajanmenekin lisäksi myös hakeauton lastauksen ajanmenekkiä. Tämä nosti myös hieman kaukokuljetuksen tuottavuutta. Herkkyysanalyysin tulokset on esitetty kuvassa 18, jossa on selvyiden vuoksi mukaan kuvattu organisaatiokustannus ja operatiiviset kustannukset. Ensimmäisessä tapauksessa tehokkuuseroa ei ollut, jolloin vain kaukokuljetuskustannukseen syntyi kustannuseroa. Haketuskustannus oli molemmilla hankinnoilla kyseisessä skenaariossa 6,43 €/m³. Perinteisen hankinnan kaukokuljetuksen kustannus oli 6,18 €/m³ ja fast trackin 6,38 €/m³. Fast track oli 0,20 €/m³ (3 %) perinteistä kalliimpi. 12,5 %:n haketuksen tehokkuuden muutos toi kustannusvaihtelua fast trackin molempiin työvaiheisiin. Fast track -hankinnan haketuskustannus oli 6,20 €/m³ alentuessa edelliseen verrattuna 0,23 €/m³ (4 %). Kaukokuljetuskustannus fast trackillä oli 6,31 €/m³ ja ero kaventui perinteiseen verrattuna 0,13 €/m³ (2 %). Fast track -hankinnan kaukokuljetuskustannus alentui niin sanottuun ”0-skenaarioon” nähden 0,07 €/m³. Laskennassa käytetty 25 % tehokkuuserolla haketuksen kustannus oli 6,01 €/m³ alentuen ”0-skenaarioon” nähden 0,42 €/m³ (6 %). Kaukokuljetuskustannus oli fast track -hankinnalla 6,25 €/m³. 25 %:n tehokkaampi haketus alensi kaukokuljetuskustannusta 0,07 €/m³ (1 %). Fast track -hankinnan kaukokuljetus oli yhteensä 0,13 €/m³ edullisemmaksi verrattuna fast trackin ”0-skenaarioon”. Fast track -hankinta muuttuu 0,54 €/m³ edullisemmaksi tehokkuuseron johdosta.

Haketuksen tuottavuutta ei ole tutkittu paljoa tuoreen ja varastoidun hakkuutähteen välillä. Asikaisen ym. (2001) tutkimuksessa tehokkuusero todennetaan ja näin ollen sen mukaan ottaminen laskentoihin nähtiin rationaalisenä. Kuitenkin tuloksia tarkastellessa on hakkureiden teknologian paraneminen ja tehokkuusero otettava huomioon.



Kuva 18. Haketuksen tehokkuuden vaikutus haketuksen ja kaukokuljetuksen yksikkökustannuksiin (€/m³).

4 Tulosten tarkastelu

4.1 Aineiston ja menetelmien tarkastelu

4.1.1 Koe-erä- ja korjuuaineisto

Koe-eräaineiston tiedot, kappalemäärä ja hakkuukertymä olivat riittävän suuret tarjoamaan luotettavan lähtökohdan kustannusvertailulle perinteisen ja fast track -hankinnan välillä. Aineistoon pohjautuvat hakkuutähdekertymät olivat kahden vuoden ajalta 145922 m³. Aineistossa hakkuumäärät eivät jakautuneet kuukausittain pidemmän aikavälin tilastojen mukaisesti. Koska kuukausittaisilla hakkuukertymillä on merkitystä vuositasolla fast-track -hankinnan ja perinteisen hankinnan keskinäiselle suhteelle, aineiston kuukausittaiset hankintamäärät sovitettiin vastaamaan pitkän aikavälin keskiarvoja (Kuva 6). Vaikka hakkuupäivämääriä muunnettiin yhdelle vuodelle, on aineisto laskennan kannalta realistinen ja tieteellisesti relevantti. Esimerkiksi Pohjois-Karjalassa korjattiin vuonna 2010 hakkuutähdettä yhteensä 275 000 m³ ja vuosien 2010–2014 keskimääräinen hakkuutähdekertymä oli 176 000 m³ (Luke, 2015a). Lisäksi Anttilan ym. (2010) mukaan käyttömääriä voitaisiin lisätä huomattavasti, vaikka kestävän käytön rajoitteet otettaisiinkin huomioon.

4.1.2 Kustannuslaskennan tarkastelu

Hankintakustannusten määrittäminen perustuu alan kattavimpaan tutkimustietoon ja on toteutettu yleisesti tämän tyyppisiin tutkimuksiin laskennoissa käytetyillä malleilla. Korjuukustannusten määrittäminen on riittävän eksakti tutkimuksen tavoitteiden mukaiseen kustannusvertailuun. Kustannuslaskennassa otetaan mukaan muiden tavanomaisten kustannuserien lisäksi kantohinta ja varastointikustannus. Tällä tarkastelutavalla pyritään luomaan mahdollisimman oikeanlainen skenaario.

Varastointikustannukset pois luettuna, työlajikohtaiset yksikkökustannukset ovat arvoiltaan samalla tasolla aikaisempien tutkimusten kanssa. Aikaisemmissa yksikkökustannuslaskelmissa ei ole varastointikustannusta otettu huomioon, vaikkakin niihin on yleisesti viitattu. Tutkimustuloksia voidaan verrata Laitilan ym. (2010) hankintakustannuksiin. Ne olivat 20,7–24,1 €/m³ riippuen kaukokuljetusmatkoista 45 ja 90 km (Kuva 6). Vastaavanlainen hankintakustannus tässä tutkimuksessa oli 22,4 €/m³ ja fast track -hankinnalle 20,1 €/m³, kun keskimääräinen kaukokuljetusmatka oli 80 km. Verrattaessa kustannuksia toisiinsa, ovat ne samansuuntaisia. Se osoittaa sen, että tutkimuksessa käytettävät laskentametodit ja lähtöarvot ovat relevantteja tutkimustulosten saamiseksi.

4.2 Fast track -hankinnan tulosten tarkastelu

Fast track -hankinnan kustannukset olivat keskimääräisesti pienemmät kuin perinteisen hankinnan. Kustannuseroja syntyi varastointikustannusten lisäksi haketuksessa ja kaukokuljetuksessa. Varastointikustannuksella oli merkittävin osuus käyttöpaikkakustannuksen muodostamiselle. Varastoinnin aiheuttaman kuluerän osalta fast track -hankinnalla pääomakustannukset ja kuiva-ainetappio olivat pienemmät, koska varastointiaika oli keskimääräistä lyhyempi perinteiseen verrattuna. Laskennassa mukana ollut haketuksen tehokkuusero pienensi fast track -hankinnan haketus-kustannuksia ja sen myötä kaukokuljetuskustannuksia. Tehokkuuseron

puuttuessa, kaukokuljetuskustannukset muuttuvat fast track -hankinnalla suuremmiksi kuin perinteisellä.

Perinteisesti hankitulla hakkuutähteellä hankintakustannukset olivat noin 7,1–13,3 % suuremmat kuin fast track -hankinnan. Kustannuseron suuruuteen vaikuttivat suurimmaksi osaksi pääomankorko ja kuiva-ainetappiokertymä. Suurin yksittäinen työlajikohtainen kustannusero syntyi kuiva-ainetappiosta, joka saattoi olla perinteisessä hankinnassa jopa 5,5–11,5 % suurempi kuin fast track -hankinnassa. Perinteisessä ainoastaan kaukokuljetuksen kustannus oli pienempi. Tämä johtui siitä, että fast track -hankinnalla materiaalin kosteuspitoisuus oli suurempi, mikä kasvatti suoraan kaukokuljetuskustannuksia. Pääomakustannuksen vaikutus varastointikustannukseen oli suhteellisesti pienempi kuin kuiva-ainetappion. Tutkimuksessa varastointiajalla oli vaikutusta pääomakustannuksien suuruuteen. Myös korkokannan suuruus vaikutti suoraan pääomakustannusten suuruuteen. Saari (2014) tutki pro gradu-tutkielmassaan muun muassa varastointiajan riippuvuutta pääomakustannuksiin, ja pääsi myös saman tyyppiseen tulokseen pääomakustannusten synnyssä. Muihin kustannuksiin ja niiden eroavaisuuksiin perinteisen ja fast track -hankinnan välillä vaikuttivat hakkuutähteen kosteuden vaihtelu, varastointiajan pituudet ja vuotuinen pääoman korkokanta sekä kuukausittainen kuiva-ainetappiokertymä.

Haketuksen tehokkuuserolla oli vaikutusta haketuksen ja kaukokuljetuksen yksikkökustannuksiin (ks. luku 3.6 s. 41–43). Herkkyysanalyysi osoitti, että tuoreen materiaalin haketuksen tehokkuuden paraneminen tasoitti hankintojen kustannuseroja toisiinsa nähden. Fast track -hankinnan haketuksesta tulee edullisempää ja kustannusero kaukokuljetuskustannuksessa pienenee miltei olemattomaksi. Haketuksen tehokkuudesta huolimatta kuljetuskustannuksessa syntyy eroa. Se syntyy hakkuutähdehakkeen korkeammasta kosteuspitoisuudesta, joka pienentää kuljetuksen kustannustehokkuutta perinteiseen verrattuna, missä kosteus on keskimääräistä alhaisempi. Tehokkaampi haketus paransi haketuksen lisäksi myös kaukokuljetuksen tuottavuutta alentamalla hakeauton odotusaikaa lastausvaiheessa. Mitä vähemmän haketukseen sekä hakeauton lastausaikaan kuluu aikaa sitä kustannustehokkaammaksi haketus ja kaukokuljetus muuntuvat. Tehokkuusero rakentui Asikaisen ym. (2001) julkaisuun, jonka jälkeen asiaan liittyviä julkaisuja tuoreen ja varastoidun materiaalin

haketuksen eroja ei ole käsitelty. Tutkimustyön vähäisyys voi johtua yksiselitteisesti tuoreen hakkuutähteen alhaisesta kysynnästä.

4.3 Fast track -hankintaketjun soveltuvuus nykyisessä biotaloudessa

Fast track -hankinnassa haasteena vastaan tulevat polttolaitosten metsähakkeen laatuvaatimukset, joihin suurimpana vaikuttaa kosteus. Toisena tärkeänä laatutekijänä on tuhkapitoisuus. Polttolaitteiden kannalta haastavana ominaisuutena nähdään hakkuutähteen sisältämät kemikaalit. Kuitenkin tuoreen hakkuutähtehakkeen klooripitoisuus on vain neljänneksen suurempi kuin varastossa pitkään olleen hakkuutähteen (Hillebrand 2009). Nykyään polttolaitoksilla pystytään uusin polttoteknisin keinoin vastaanottamaan entistäkin kosteampaa ja tuorempaa hakkuutähdettä. Suuren luokan yhdistetyille sähkö- ja polttolaitoksille toimitetaan tavallista kosteampaa materiaalia polttoon (Alakangas ym. 2004). Kosteamman materiaalin polttamiseen mahdollistavat savukaasupesurit ja lämpöpumput, jotka parantavat polton hyötysuhdetta ja laatua (Ohlström ym. 2005). Myös hakkuutähteen sisältämän kloorin aiheuttama polttolaitteita kuluttava kuumakorrosio on mahdollista neutralisoida kemiallisilla liuoksilla ja valikoiduilla lisäpolttoaineilla kuten turpeella (Aho 2013).

Hakkuutähteen varastointi on avainasemassa fast track -hankinnassa. Etukäteen spesifioidulla fast track -hankintakaudella materiaali menee suoraan metsäkuljetuksen ja haketuksen jälkeen polttoon. Muuna aikana, fast track -kauden ulkopuolelle jäävä hakkuutähte korjataan tavanomaisesti ja kuivatetaan tienvarsivarastossa. Materiaalin varastointi luo pääomakustannuksia ja aiheuttaa kuiva-ainetappiota. Viimeaikaisissa laajoissa tutkimuksissa on todettu kuiva-ainetappioiden olevan mittavia (Filbakk ym. 2011 & Routa 2015). Vuotuista keskimääräistä kuiva-ainetappiomäärää pystyttäisiin vähentämään huomattavasti fast track -hankinnalla. Kuiva-ainetappion lisäksi varastoinnista syntyviä paikallisia hyönteistuhoja pystyttäisiin vähentämään. Myös visuaalinen maiseman ilme kohenisi. Laskennassa ei kuitenkaan otettu huomioon palstavarastointia, joka alentaisi perinteisesti korjatun hakkuutähteen kosteuspitoisuutta. Se pienentäisi kokonaiskustannuksia ja kustannuseroa fast track -hankintaan nähden, koska siinä kyseistä varastointitapaa ei käytettäisi.

Laskennassa ei myöskään otettu huomioon metsäkoneiden siirtokustannuksia, koska siitä ei oletettu syntyvän hankintayritykselle kuluerää, vaan ne ovat koneyritysten vastuulla. Siirrosta syntyvä kustannuksen osuus puunkorjuukustannuksista vaihtelee tapauskohtaisesti 6–10 %. (Väätäinen ym. 2006) Fast track -hankinnassa siirtokustannuksista todennäköisesti syntyisi säästöjä, koska menetelmässä käytetään samaa metsäkuljetuskonetta kuin ainespuulle. Perinteisessä hankintaketjussa materiaali jätettäisiin varastoon kahdesta kolmeen viikkoa, mikä edellyttäisi kuljetuskoneen tuonnin erikseen tähteen kuljetukseen. Haasteena voidaan pitää korjuuketjun ruuhkautumista, joka voi syntyä hakkuukoneen ja metsätraktorin tuottavuuserosta. Hakkuukoneen tuottavuus uudistushakkuuleimikoilla on korkeampi kuin metsäkuljetuskoneen, jonka vuoksi metsäkuljetuskone jää leimikkoketjutuksessa jälkeen. (Väätäinen ym. 2007) Ruuhkautumista ei välttämättä kuitenkaan tapahdu, koska kesällä tapahtuu vähemmän hakkuuta. Mahdollista ruuhkautumista voitaisiin kuitenkin ennaltaehkäistä tehokkaalla työvuorojärjestelyllä. Siirtokustannuksista syntyvän säästön lisäksi, fast track -hankinnassa syntyy vääjäämättä organisatorisia säästöjä, koska työvaiheet yksinkertaistuvat ja esimerkiksi tienvarsikasan peittäminen jää muun muassa pois.

Kaukokuljetuksen osalta tutkimuksessa käytettiin aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna suurempaa auton kokoluokkaa, jotta ylimääräiseltä ajolta välttyttäisiin (Taulukko 1). Aikaisemmissa tutkimuksissa (Ihalainen & Niskanen 2010 ja Laitila ym. 2010) yleisesti käytetty 44 m³ on todennäköisesti perustunut vanhaan kuljetuksen painorajoitteeseen. Vuonna 2013 voimaan tulleet uudet puutavara-autojen painorajat sallivat auton massan nousta jopa 74 tonniin asti (Venäläinen & Korpilahti 2015). Vaikka tilavuudeltaan haketta mahtuisikin suurempi määrä, tulee fast track -hankintaa rajoittamaan tiestön kunto, paikalliset painorajoitteet ja tilanpuute esimerkiksi hakeauton kääntämiseen. Fast track -hankintakautena kuljetettava hakkeen määrä on pienempi, koska se sisältää varastoituun materiaaliin verrattuna keskimääräistä enemmän vettä. Fast track -hankinnan kannattavuus kasvaa, kun autokuorman kokoa nostetaan. Sille olisikin edullisempaa käyttää mahdollisimman suurta hakeautoa, jotta välttyttäisiin tyhjänä ajon lisäksi myös paikallaan seisomiselta. Näin ollen kookkaamman auton käyttö mahdollistaisi kuljettaa suuremman määrän hakkuutähdehaketta ja sen myötä alentaisi haketus- ja kuljetuskustannuksia. Haasteena kaukokuljetuksessa fast track -hankinnassa tulee olemaan jo edellä mainittu kelirikon mahdollisuus ja sen tuomat riskit. Kosteana ja sateisena kautena tiestö kärsii

kaukokuljetuksesta ja se tulisikin ottaa huomioon vastaisuudessa fast track- hankinnan kohteita valittaessa.

Hakkuutähteen hankinnassa haasteellisena koetaan sen korjuuseen liittyvä maaperän kantavuus ja varastoinnissa varastointitilan riittävyys (Hakkila 2004). Hakkilan (2004) mukaan päätehakkuukohteessa hakkuutähdekasat vaativat varastotilaa 15–20 tienvarsimetriä hakkuualueen hehtaaria kohti. Tutkimuksessa varastointitilan tarvetta ei otettu huomioon, koska koe-eräkohtaista hehtaarialaa ei ollut saatavilla. Joka tapauksessa tilan puute lyhyt aikaiselle varastolle tienvarressa saattaa olla rajoittava tekijä fast track -hankinnalle. Myös maan kantavuudessa voi tulla haasteita etenkin, jos kesän sadanta on suuri. Esimerkiksi savinen maaperä on kosteana kautena vaikeakulkuinen suuremmille koneille. Kuitenkaan maan urautumisesta ei tule ongelmaa, koska korjuukohteet ovat uudistushakkuualoja.

Fast track -hankinnan avulla pystyttäisiin luomaan laajempi ja joustavampi hankintaympäristö, jossa valinnanvaraa olisi enemmän. Maanomistajatkin hyötyisivät hakkuutähteen nopeutetusta korjuusta, koska se mahdollistaisi helpommin uudistettavan metsän kiertoajan lyhenemisen. Materiaalina hakkuutähteet ovat yksi tärkeä osa vuodelle 2020 asetettua metsähakkeen käyttömäärätavoitetta. Tavoitteeseen pääseminen vaatii muiden energiapuuhakkuiden lisäksi myös uudistushakkuiden määrän kasvua. Hakkuutähdemäärä on suoraan verrannollinen päätehakkuiden määrään (ks. luku 1.1, s. 8–9). Fast track -hankinta kasvattaisi kesäkauden hakkuutähteen hankinnan osuutta. Tämä tasapainottaisi työkoneiden ympärivuotuista käyttöä ja lisäisi niiden käyttöastetta.

Optimoimalla varastointiaikoja lämpöarvon kannalta sekä ajoittamalla ne vastaamaan käyttöpaikan kysyntään, pystytään kustannuseroa tasoittamaan perinteiselle hankinnalle suosiollisemmaksi. Kuitenkin varastointiaikojen oikeanlainen ajoittaminen kilpailevassa markkinatilanteessa käyttöpaikan kysynnän mukaiseksi voi olla haasteellista. Fast track -hankintaa voitaisiin kehittää niin, että alkukesän haihdunta huomioitaisiin energiamäärän optimoinnissa. Hakkuutähde pystyy kuivumaan hyvissä sääoloissa kahden kuukauden aikana tuona ajankohtana jopa 15–20 % -yksikköä. (Hillebrand & Nurmi 2001 ja Hillebrand 2009)

4.4 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys

Tämä tutkimus tarkastelee hankintakustannuksia ainoastaan hankintaorganisaation näkökulmasta. Eri kosteudessa saapuvalla hakkuutähdehakkeella voi olla vastaanottavalle voimalaitokselle erilainen arvo ja täten myös erilainen hinta. Myös hakkuutähteen korjuumäärä vaikuttaa hakkuutähteestä maksettavaan hintaan (Asikainen ym. 2001). Kokonaiskannattavuus määräytyy hinnan ja hankintakustannusten erotuksena. Tässä tutkimuksessa esitetty hankintakustannusten riippuvuus varastointiajasta ja sen aiheuttamasta lämpöarvon pienenemisestä ja pääomakustannuksista on tarpeellista tietoa hintaneuvotteluissa hankintaorganisaation ja voimalaitoksen välillä.

Tutkimuksessa käytettyjä työmetodeja ja saatuja tuloksia voidaan hyödyntää uusille tutkimuksille koskien fast track -hankintaa. Tutkimusta voidaan esimerkiksi käyttää apuna varastoinnissa syntyvien pääomakustannusten ja kuiva-ainetappioiden suuruuksien arvioinnissa. Lisäksi tulokset ovat hyödynnettävissä vastaisuudessa fast track -hankintamenetelmän kehittämisessä ja jatkotutkimuksissa.

5 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää tienvarsihaketusketjuun perustuvan nopeutetun eli fast track -hankintaketjun yksikkökustannuksia verraten niitä perinteisesti tienvarsihaketusketjulla hankittuun hakkuutähteeseen. Pääpainona oli keskittyä haketuksen ja kaukokuljetuksen sekä tienvarsivarastoinnin vaikutuksiin hankintakustannuksissa. Hakkuutähdehakkeen hankintakustannukset käyttöpaikalla määritettiin erikseen perinteiselle ja fast track -hankintaketjuille työlajeittain, jonka avulla kustannusvertailu oli mahdollista tehdä. Tämän tutkimuksen tulokset ovat lupaavia ja antavat hyvän lähtökohdan lisätutkimuksien tarpeellisuuden kannalta. Vertailulaskelmissa tarkastellaan kustannuksia eri kuiva-ainetappioprosenteilla ja varastoon sitoutuneen pääoman laskentakoroilla jäljittelemällä tilannetta, jossa metsätähteen tarjonta ja laitoksen kysyntä sopeutetaan toisiinsa.

Fast track -hankinnassa osa tarjonnasta toimitetaan laitokselle ilman tienvarsivarastointia.

Fast track -hankinta muodosti perinteiseen verrattuna pienemmän käyttöpaikkakustannuksen. Varastointikustannuksilla oli merkittävin vaikutus käyttöpaikkakustannuksen muodostumiseen. Varastointikustannuksen muodostaneet pääomakustannus ja kuiva-ainetappion aiheuttama kuluerät olivat fast track -hankinnalla pienemmät johtuen lyhemmästä varastointiajasta.. Suurimman kustannuksen loi kuiva-ainetappio, jonka suuruus riippui kuukausittaisesta kuiva-ainetappiokertymästä ja varastointiajasta. Pääomakustannusten kasvu oli pienempi kuin kuiva-ainetappioista aiheutuneiden kustannusten. Muiden vaiheiden yksikkökustannukset pysyivät suhteellisesti samalla tasolla toisiinsa nähden. Haketuksessa ja kaukokuljetuksessa syntynyt pieni ero muodostui haketuksen tuottavuuden vaihtelusta haketuksesta varastoidun ja varastoimattoman materiaalin välillä sekä materiaalin kosteudesta. Kostean materiaalin kuljettaminen alensi kaukokuljetuksen kannattavuutta.

Tutkimuksen tärkeimpänä tuloksena oli fast track -hankintakustannusten eroavaisuus perinteiseen verrattuna. Alustavasti hankintamenetelmällä pystytään teoriassa pienentämään hakkuutähteen hankintakustannuksia, mutta simulointia ja käytännön testaamista vaaditaan. Jotta fast track -hankinnasta saataisiin todellinen hyöty, volyyymi täytyisi suhteuttaa voimalaitosten kysyntään niin sanotulla fast track -kaudella. Suomessa hankintayritys voi hyötyä uudesta hankintamuodosta säästämällä pääomakustannuksissa ja kasvattamalla energiasaantoa kuiva-ainetappiota pienentämällä. Fast track -hankintaketjua käyttämällä voitaisiin hankinnassa säästää vuositasolla miljoonasta kolmeen miljoonaan euroa, mikäli hakkuutähteen korjuumäärä olisi vuoden 2014 tasolla (2,55 milj. m³).

5.1 Tulevaisuuden tutkimustarpeet

Tämä tutkimus on ensimmäinen, jossa fast track -hankintaa on kartoitettu. Menetelmä tarvitsee lisätutkimuksia eri näkökulmista ja lähtökohdista. Uudenlaisena hankintamenetelmänä sillä olisi mahdollista säästää yrityksen hankintakustannuksissa. Tarkempien organisaatiokohtaisten säästöjen löytämiseksi olisi hankinnan eri osa-

alueita tutkittava täsmällisemmin. Fast track -hankinta on mahdollista toteuttaa ilman leimikkoketjituksen ruuhkautumista, koska se ei ajoitu kiireellisimpään aikaan. Kuitenkin sitä olisi hyvä tutkia esimerkiksi jatkuvan simuloinnin metodilla. Olisi myös tärkeä ottaa selvää käyttöpaikan todelliset hakkuutähteen käyttömahdollisuudet ja tulisi selvittää käyttöpaikan maksuvalmius tuoreesta ja hieman heikompilaatuisemmasta hakkuutähteestä. Kuiva-ainetappiota ja sen muodostumista on tutkittu (Filbakk ym. 2011, Barontini ym. 2013 ja Routa ym. 2015). Kuitenkin sen määrittäminen on haasteellista varaston sijainnin ja ominaisuuksien vaihtelevuuden vuoksi. Sen helppo ja tarkka määrittäminen toisi uusia mahdollisuuksia muun muassa raaka-aineen toimitusten suunnitteluun. Tulevaisuudessa polttotekniikka tulee kehittymään ja voimalaitokset pystyvät vastaamaan entistäkin heikompilaatuisen materiaalin polttamisesta. Näin ollen varastoinnin vaikutusta ja siitä saatavaa oletettua hyötyä suurikokoiselle lämpölaitokselle olisi hyvä tutkia laajemmin. Fast track -hankinnan laajempikohtaiseen tutkimiseen voitaisiin soveltaa diskreettiä simulointia. Uudesta hankintamuodosta olisi hyvä tutkia myös logistiset haasteet ja pullonkaulat. Esimerkiksi kelirikko tulee olemaan todellinen haaste hakkuutähteen kevään sekä alkukesän korjuille. Kelirikko rajoittaisi kohteiden valitsemista sekä hakkuutähdekertymän suuruutta merkittävästi.

6. Kirjallisuus

Aho, M. 2013. Energiapuun polton vaatimukset polttolaitokselle. Jyväskylä, VTT:n seminaarikalvosarja, Kohti kotimaista energiaa –seminaari. VTT: 20 s.

Alakangas, E. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. 2000, Espoo. VTT Tiedotteita – Research Notes 2045: 172 s.

Alakangas, E., Halonen, P., Kuusisto, K., Jäkälä, M. & Hirvikoski, T. Quality assurance system manual for wood fuel entrepreneurs in Finland – Model quality manual. 2004. VTT Processes & The Trade Association of Finnish Forestry and Earth Moving Contractors. 64 s.

Alakangas, E. & Impola, R. 2014. Puupolttoaineiden laatuohje. Helsinki, VTT-M-07608.13 – päivitys 2014. ISBN 978-952-93-3223-6. 62 s.

Anttila, P., Nivala M., Laitila J., Flyktman M., Salminen O. & Nivala J. 2014. Metsähakkeen alueellinen korjuupotentiaali ja käyttö vuonna 2020. Metlan työraportteja 313: 55 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp313.pdf>

Barontini, M., Scarfone, A., Spinelli, R., Galluci, F., Santangelo, E., Acampora, A., Jirjis, R., Civitarese, V. & Pari, L. 2013. Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass and bioenergy* 62 (2014): s. 17–25.

Erber, G., Routa J., Wilhelmsson L., Raitila J., Toivainen M., Riekkinen J. & Sikanen L. 2014. A prediction model prototype for estimating optimal storage duration and sorting. Metlan työraportteja 297: 76 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp297.pdf>

Filbakk, T., Hoibo, O. A., Dibdiakova, J. & Nurmi, J. 2011, Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011; 26: s 267–277.

Hakkila, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Metla. *Folia Forestalia* 342: s. 9.

Hakkila, P. 2001. Puuenergian teknologiaohjelman katsaus 1999–2001. Alakangas E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. VTT Symposium 216: s 11–34.

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Loppuraportti. *Teknologiaohjelmaraportti 5/2004*: 135 s.

Harstela, P. 2006. Kustannustehokas metsänhoito. Gravita: 128 s.

Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi – yhteenveto aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista. 2009. Jyväskylä. VTT Tutkimusraportti

Hillebrand, K. & Nurmi, J. Hakkuutähteiden laadunhallinta. VTT energian raportteja 2 /2001. Jyväskylä. Puuenergian teknologia projekti puut09: s. 285–295

Ihalainen, T. & Niskanen A. 2010, Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. Vantaa. Metlan työraportteja 166: 56 s.

- Routa, J., Kolström M., Ruotsalainen, J. & Sikanen, L. 2015, Precision measurement of forest harvesting residue moisture change and dry matter losses by constant weight monitoring. *International Journal of Forest Engineering* 26:1. s. 71–83.
- Röser, D., Erkkilä, A., Mola-Yudego, B., Sikanen, L., Prinz, R., Heikkinen, A., Kaipainen, H., Oravainen, H., Hillebrand, K., Emer, B., Väätäinen, K. 2010. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energy wood stems. *Metsätutkimuslaitos. Metlan työraportteja* 186: 60 s.
- Saari, A. 2014. Latvusmassan toimituskosteuden ennustaminen ja varastoinnin pääomakulu energiapuun hankintaketjussa. *Itä-Suomen yliopisto*. 48 s.
- Saarinen, V.-M. & Harstela, P. 2004. Hakkuutähteiden ja kantojen korjuun vaikutus maanmuokkaukseen ja metsänviljelyyn. Julkaisussa: Alakangas, E. & Holviala, N. (toim.). *Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003*. VTT Symposium 231: s. 275–288.
- Saksa, T. 2001. Hakkuutähteen vaikutus metsänuudistamiseen. S.53-58 julkaisussa: Nurmi, J. ja Kokko A. (toim.). 2001. *Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä*. Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja 816: 80 s.
- Saksa, T., Tervo, L. & Kautto, K. 2002. Hakkuutähde ja metsänuudistaminen. *Metsätutkimuslaitoksen tiedonantoja* 851: 41 s.
- Seppänen, R., Murto, T., Pasanen, J. & Kubin, E. 2009. Latvusmassan korjuu päteihakkuualoilta työraportti. 19 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/hanke/3475/pdf/Rap%202009%20Latvusmassan%20korjuu%20p%C3%A4teihakkuualoilta.pdf>
- Siitonen, J. 2012. 2.6 Monimuotoisuus. Julkaisussa: Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.). 2012. *Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät*. Metlan työraportteja 240: s. 154–163. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>.
- Sikanen, J., Röser, D., Anttila, P & Prinz, R., 2013. Forecasting Algorithm for Natural Drying of Energy Wood in Forest Storages. *Forest Energy Observer* 12/2013; 27: 7 s.
- Strandström M. 2014. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2014. *Metsätehon tulosalvosarja* 5/2014: 24 s. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/Tulosalvosarja_2014_05_Metsahakkeen_tuotantoketjut_Suomessa_vuonna_2013_ms.pdf
- Strandström, M. 2015a. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2014. *Metsätehon tulosalvosarja* 7a/2015: 33 s. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2015_07a_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2014_ms.pdf
- Strandström, M. 2015b. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2014. *Metsätehon tulosalvosarja* 8/2015: 20 s. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2015_08_Metsahakkeen_tuotantoketjut_2014_ms.pdf
- Vehmanen P. & Koskinen K. 1999. Tehokas kustannushallinta, *Ekonomia -sarja*. WSOY, Porvoo. 399 s.

Virkkunen, M., Miska K., Hankalin V. & Nummelin J. 2015, Espoo. Solid biomass fuel terminal concepts and a cost analysis of a satellite terminal concept. VTT. 69 s.

Väätäinen, K., Asikainen, A. & Sikanen, L. 2006. Metsäkoneiden siirtokustannusten laskenta ja merkitys puunkorjuun kustannuksissa. Metsätieteen aikakauskirja 3/2006: s 391-397.

Väätäinen, K., Liiri, H., Asikainen, A., Sikanen, L., Jylhä, P., Rieppo, K., Nuutinen, Y. & Ala-Fossi, A. 2007. Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa. Metlan työraportteja 48: 63 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp048.pdf>

Windisch, J., Väätäinen, K., Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J., Asikainen, A. & Sikanen, L. 2014. Discrete-event simulation of an information-based raw material allocation process for increasing the efficiency of an energy wood supply chain. Applied Energy 149 (2015): s. 315-325 Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915004249>

Äijälä, O., Kuusinen M. & Koistinen A. (toim.) 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen ja kasvatukseen. Metsätaloudellinen kehittämiskeskus Tapion julkaisu. 32 s. Saatavissa: http://tapio.fi/wp-content/uploads/2015/06/Energiapuusuositukset_verkkoon1.pdf

Internet-lähteet

Cleen, 2015, Cluster for Energy and Environment. Saatavissa: http://www.cleen.fi/en/Comms/CLEEN_FIBIC_Factsheet_BEST_final_HR.pdf [Viitattu 19.8.2015.]

Komatsu, 2016, Komatsu 845 -kuormatraktori. Saatavissa: <http://www.komatsuforest.fi/default.aspx?id=106082>. [Viitattu 13.4.2016].

Luonnonvarakeskus (Luke), 2015a: Lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käyttöalueittain (1000m³). Tilastotietokanta http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__10%20Puun%20energiakaytto/01_Laitos_ekaytto.px/table/tableViewLayout1/?rxid=83bfe52a-8549-45b4-92f6-973e41c3500e. [Viitattu 28.8.2015].

Luonnonvarakeskus (Luke), 2015b: Energiapuun kauppa. 2. Vuosineljännes 2015. Helsinki.] Saatavissa: http://stat.luke.fi/energiapuun-kauppa-2-vuosinelj%C3%A4nnes-2015_fi. [Viitattu 21.10.2015].

Ponsse. 2016. Ponsse Bioenergy, muuttuvat kuormatilat. Saatavissa: <http://www.ponsse.com/fi/tuotteet/bioenergy/muuttuvat-kuormatilat>. [Viitattu 13.4.2016].

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM). 2013. Kansallinen energia- ja ilmastostrategia – Taustaraportti. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 21.3.2013. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_taustaraportti.pdf. [Viitattu: 20.1.2016].

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2015a: Energian hankinta ja kulutus [verkkajulkaisu]. ISSN=1779-795X. 4. Vuosineljännes 2014. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2014/04/ehk_2014_04_2015-03-23_tie_001_fi.html. [Viitattu: 21.10.2015].

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2015b: Energian hinnat [verkkajulkaisu]. ISSN=1799-7984. 2. Vuosineljännes 2015. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehi/2015/02/ehi_2015_02_2015-09-17_tie_001_fi.html [Viitattu 21.10.2015].

Suomen virallinen tilasto (SVT), 2015c: Metsäalan kone- ja autokustannusindeksi. ISSN=2342-3587. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/mekki/Helsinki> [viitattu: 7.2.2016].

Venäläinen, P. & Korpilahti, A. 2015. HCT -ajoneuvoyhdistelmien vaikutus puutavarakuljetusten tehostamisessa – Esiselvitys [verkkajulkaisu]. ISSN=1797-3562. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. 72 s. Saatavissa: https://www.tem.fi/files/42823/TEMjul_30_2015_web_23042015.pdf. [Viitattu 28.4.2016].

LIITEET

Liite 1. Laskennan parametrit

Taulukko 8. Kustannuslaskennassa käytetyt parametrit

Muuttuja / Rajoite	Laskennassa mukana ollut arvo	Lähde
Organisointi ja korjuu		
Leimikon kokorajoite, m ³ /koe-erä	40	Asikainen ym. (2001) & Muinonen ym. (2013)
Organisointikustannus €/m ³	2,5	Strandström (2015a)
Kasoille hakkuu €/m ³	0,33	Laitila ym. (2010) & SVT 2015c
Keskimääräinen etäisyys, m	215	Asikainen ym. (2001)
Kuormakoko, m ³	7,8	Ihalainen & Niskanen (2010)
Käyttötuntikustannus, €/h	73,07	Prinz ym. (2015)
Metsäkuljetuksen käyttötuntikerroin	1,2	Laitila ym. 2010
Haketus		
Haketuksen käyttötuntikustannus, €/h	166,48	Prinz ym. (2015)
Kuiva-ainetiheys, kg/m ³	425	Hakkila (1978)
Maksimi kosteus (rajoite)	57	Erber ym. (2014) & Sikanen ym. (2013)
Hakkeen lämpöarvo, Mj/kg	19,2	Alakangas ym. (2013)
Käyttöpaikkahinta, €/MWh	21,2	SVT (2015b)
Kaukokuljetus		
Hakeauton ominaisuudet		
- Massa, t	68,8	Korpilahti (2015)
- Hyötykuorma, t	41,3	Korpilahti (2015)
- Tilavuus, m ³	50 (125 i-m ³)	Korpilahti (2015)
Ajotuntikustannus, €/h	74,3	Laitila ym. (2016)
Terminaalituntikustannus, €/h	48,7	Laitila ym. (2016)
Leimikon ja käyttöpaikan väliset etäisyysluokat, km	20, 40, 60, 80, 100, 120	
Keskimääräinen etäisyys käyttöpaikalle, km	80	

Liite 2: Tutkimustulokset

Taulukko 9. Vertailutaulukko perinteisen ja fast track -hankintaketjujen työajikohtaiset yksikkökustannukset (€/m³) 3 %:n pääomakorolla, sekä 1 %, 2 % ja 3 % kuukausittaisella kuiva-ainetappiokertymillä.

	3 % korko	Kantohinta	Org. Kust.	Kasoillehakkuu	Metsäkuljetus	Haketus	Kaukokuljetus	Pääomakustannus	Kuiva-ainetappio	Yhteensä
KUIVA-AINETAPPIO 1 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	6,9	6,4	6,2	0,5	5,5	31,8
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	6,9	6,0	6,3	0,3	3,7	29,5
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,2	1,8	2,2
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %	-0,28 %	0,5 %	5,5 %	7,1 %
KUIVA-AINETAPPIO 2 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	0,5	10,3	36,9
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	0,3	7,0	33,1
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,2	3,3	3,8
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,1 %	-0,24 %	0,4 %	9,0 %	10,4 %
KUIVA-AINETAPPIO 3%	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	0,5	14,7	41,3
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	0,3	10,0	36,0
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,2	4,7	5,2
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,0 %	-0,22 %	0,4 %	11,5 %	12,7 %

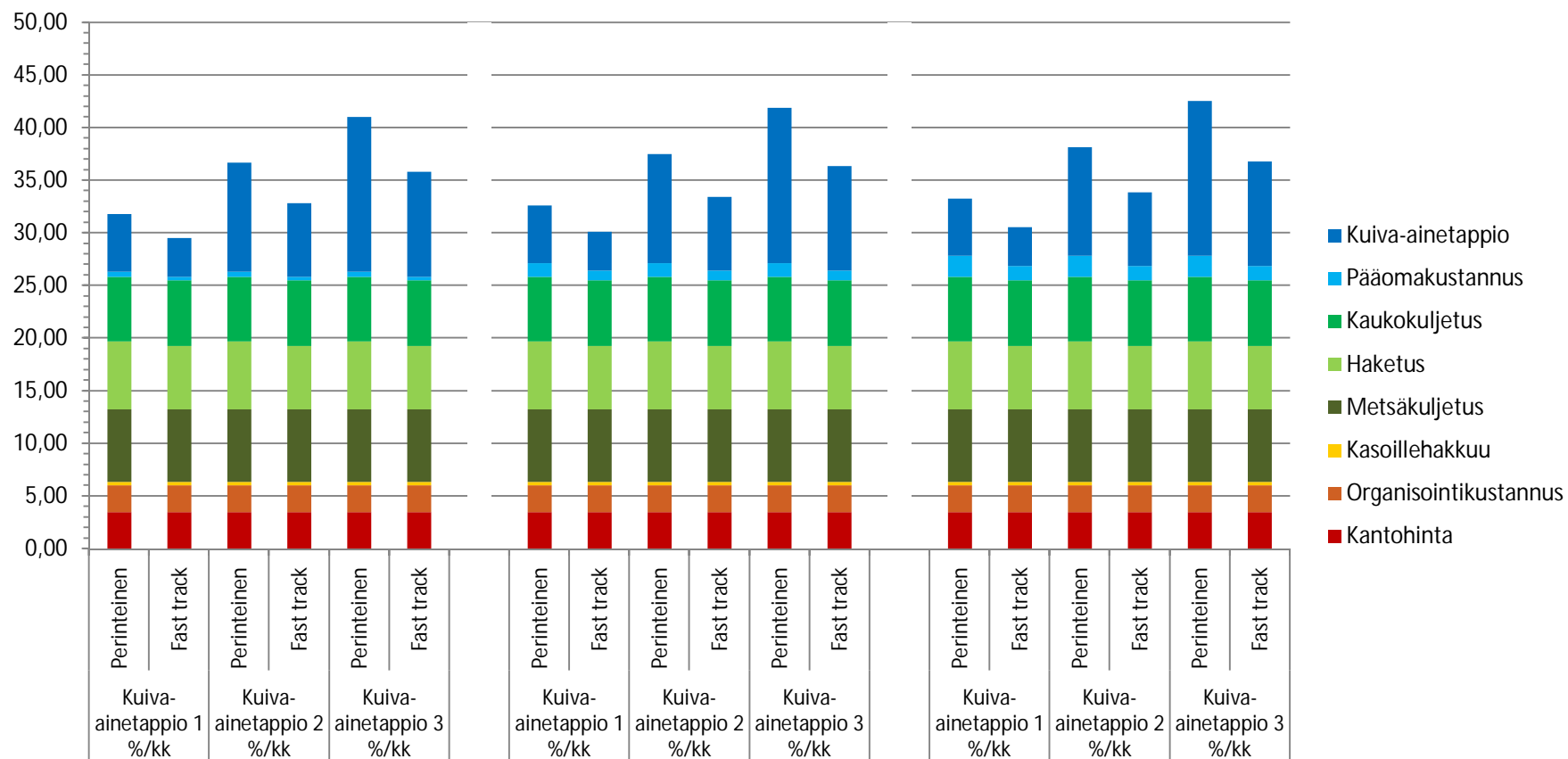
Taulukko 10. Vertailutaulukko perinteisen ja fast track -hankintaketjujen työajikohtaiset yksikkökustannukset (€/m³) 8 %:n pääomakorolla, sekä 1 %, 2 % ja 3 % kuukausittaisella kuiva-ainetappiokertymillä.

	8 % korko	Kantohinta	Org. Kust.	Kasoillehakkuu	Metsäkuljetus	Haketus	Kaukokuljetus	Pääomakustannus	Kuiva-ainetappio	Yhteensä
KUIVA-AINETAPPIO 1 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	1,3	5,5	32,8
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	0,9	3,7	30,3
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,4	1,8	2,5
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %	-0,3 %	1,3 %	5,4 %	7,6 %
KUIVA-AINETAPPIO 2 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	1,3	10,3	37,7
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	0,9	7,0	33,6
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,4	3,3	4,1
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,1 %	-0,2 %	1,1 %	8,8 %	10,8 %
KUIVA-AINETAPPIO 3%	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	1,3	14,7	42,1
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	0,9	10,0	36,6
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,4	4,7	5,5
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,0 %	-0,2 %	1,0 %	11,3 %	13,0 %

Taulukko 11. Vertailutaulukko perinteisen ja fast track -hankintaketjujen työajakohtaiset yksikkökustannukset (€/m³) 12 %:n pääomakorolla, sekä 1 %, 2 % ja 3 % kuukausittaisella kuiva-ainetappiokertymillä.

	12 % korko	Kantohinta	Org. Kust.	Kasoiilehakuu	Metsäkuljetus	Haketus	Kaukokuljetus	Pääomakustannus	Kuiva-ainetappio	Yhteensä
KUIVA-AINETAPPIO 1 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	2,0	5,5	33,5
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	1,3	3,7	30,8
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,6	1,8	2,7
	Prosentuaalinen ero	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	1,24 %	-0,27 %	1,88 %	5,26 %	8,1 %
KUIVA-AINETAPPIO 2 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	2,0	10,3	38,4
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	1,3	7,0	34,1
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,6	3,3	4,3
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,1 %	-0,2 %	1,6 %	8,7 %	11,2 %
KUIVA-AINETAPPIO 3 %	Perinteinen €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,4	6,2	2,0	14,7	42,8
	Fast Track €/m ³	3,5	2,5	0,3	7,2	6,0	6,3	1,3	10,0	37,1
	Erotus, €/m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	-0,1	0,6	4,7	5,7
	Prosentuaalinen ero	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,0 %	-0,2 %	1,5 %	11,1 %	13,3 %

Liite 3: Hankintakustannukset



Kuva 19. Hakuutähdehakkeen kustannusrakenne kolmella eri kuiva-ainetappiokertymillä (1%/kk, 2 %/kk, 3 %/kk) sekä kolmella eri pääoman korolla (3 %, 8 % ja 12 %).