

Teppo Paavolainen

**Biomassojen yhteiskuljetuskustannukset tienvarresta
käyttöpaikalle**

Opinnäytetyö

Syksy 2014

Elintarvike ja maatalouden yksikkö

Metsätalouden koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Elintarvike ja maatalous

Koulutusohjelma: Metsätalous

Tekijä: Paavolainen Teppo

Työn nimi: Biomassojen yhteiskuljetuskustannukset tienvarresta käyttöpaikalle

Ohjaaja: Lauhanen Risto

Vuosi: 2014

Sivumäärä: 43

Liitteiden lukumäärä:

EU-jäsenvaltiona Suomi on sitoutunut lisäämään uusiutuvien energialähteiden osuuden 38 %:in energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Merkittävä osa tästä lisäystavoitteesta tullaan kattamaan bioenergialla ja erityisesti metsähakkeella. Metsähakkeen ja muiden biomassojen käytön voimakas kasvu tarkoittaa entistä suurempaa räsitusta Suomen tiestölle kuljetusmäärien lisääntyessä. Kuljettamalla biomassoja yhteiskuormissa voidaan vähentää kuljetusmääriä ja ti verkostoon kohdistuvaa räsitusta.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää metsä- ja peltobiomassojen yhteiskuljetusten kustannukset (€/MWh) tienvarsivarastolta käyttöpaikalle. Kustannukset selvitettiin myös erikseen kuljetettuina. Tutkittavat biomassat olivat hakkuutähteet, kannot ja ruokohelppi. Kuljetuskustannukset selvitettiin laskennallisesti konekustannuslaskennan kautta.

Tutkimustulosten perusteella yhteiskuljetusten kustannukset eivät ole merkittävästi korkeammat kuin kuljetettaessa biomassat erikseen. Selvästi kalleinta on kuljettaa ruokohelpeä ja vastaavasti halvinta on hakkuutähteiden kuljetus.

Avainsanat: bioenergia, metsähake, ruokohelppi, yhteiskuljetus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Food and Agriculture

Degree programme: Forestry

Author/s: Paavolainen Teppo

Title of thesis: Co-transport costs of biomasses from roadside to power plant

Supervisor(s): Lauhanen Risto

Year: 2014

Number of pages: 43

Number of appendices:

Finland has committed to increase the share of renewable energy to 38 % in final energy consumption by 2020. A significant part of this target will be covered by bioenergy and in particular by forest chips. This means a greater strain to the Finnish road network due to the powerful increase of road transport. One way to decrease road transport volumes is to transport biomasses in combined cargos.

The purpose of this thesis was to find out transport costs (€/MWh) of forest chips and reed canary grass when transporting these biomasses in combined cargos. The biomasses that were examined in this work were reed canary grass, logging residue and stump wood. The transport costs were examined computationally by machine cost accounting method.

The results show that transporting biomasses in combined cargos the transport costs are not significantly lower than in transporting the biomasses in separated. By far the most expensive is to transport reed canary grass and, correspondingly, the cheapest is the transportation of logging residues.

Keywords: bioenergy, mixture transport, reed canary grass, wood chips

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet	7
1 JOHDANTO	8
2 HAKKUUTÄHTEET.....	10
2.1 Ominaisuudet.....	11
2.2 Hakkuutähdehakkeen tuotantoketjut.....	13
2.2.1 Hakkuu ja kasaus.....	13
2.2.2 Metsäkuljetus.....	14
2.2.3 Haketus.....	14
2.2.4 Kaukokuljetus.....	16
3 KANNOT	17
3.1 Ominaisuudet.....	18
3.2 Tuotantoketju.....	19
3.2.1 Kannonnosto.....	19
3.2.2 Metsäkuljetus.....	19
3.2.3 Murskaus.....	19
3.2.4 Kaukokuljetus.....	20
4 RUOKOHELPI	21
4.1 Ominaisuudet.....	21
4.2 Tuotantoketju.....	22
4.2.1 Korjuu.....	22
4.2.2 Niitto.....	22
4.2.3 Korjuu paaleina.....	23
4.2.4 Irtokorjuu.....	23
4.2.5 Kaukokuljetus.....	24

5	KULJETUSKUSTANNUSTEKIJÄT.....	24
6	AINEISTO JA MENETELMÄ.....	26
6.1	Aineisto.....	27
6.2	Menetelmät.....	27
7	TULOKSET	31
7.1	Kuljetuskustannukset erikseen kuljetettuina.....	31
7.1.1	Hakkuutähdehake.....	31
7.1.2	Kantomurske.....	32
7.1.3	Ruokohelpisilppu.....	32
7.2	Yhteiskuljetusten kustannukset.....	33
7.2.1	Hakkuutähdehake–kantomurske.....	33
7.2.2	Hakkuutähdehake–ruokohelpisilppu.....	34
7.2.3	Kantomurske–ruokohelpisilppu.....	34
8	TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA	36
	LÄHTEET	38

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/k-m ³ ja MJ/kg). (Alakangas 2000, 53).....	11
Kuvio 2. Hakkuutähdehakkeen, ruokohelpisilpun ja kantomurskeen kuljetuskustannukset erikseen kuljetettuina	33
Kuvio 3. Yhteiskuljetusten kustannukset	35
Taulukko 1. Hakerekan käyttötuntikustannusten muodostuminen (mukaillen Laitila & Väätäinen 2011, 115)	28

Käytetyt termit ja lyhenteet

Kosteus	Kosteudella tarkoitetaan kappaleen sisältämän veden massan ja kappaleen kokonaismassan suhdetta. Puuaineksen kohdalla puukappaleen kokonaismassalla tarkoitetaan tuoreena punnitun kappaleen massaa.
Irtotiheys	Aineen massan ja irtotilavuuden suhde.
Energiatiheys	Tilavuusyksikön sisältämä lämpöarvo.
MWh	Megawattitunti, energiayksikkö.
TWh	Terawattitunti, energiayksikkö (1 TWh = 1 000 000 MWh).

1 JOHDANTO

Biomassalla tarkoitetaan energiantuotannossa eloperäisiä aineita, kuten esimerkiksi puuta, hakkuutähteitä, peltokasveja sekä viljankorjuun sivutuotteita (mm. olki). Biomassalla tuotettu energia on uusiutuvaa bioenergiaa. Biomassojen poltossa syntyvä hiilidioksidi sitoutuu takaisin uuteen kasvustoon, joten sen avulla tuotettu energia ei lisää ilman hiilidioksidipitoisuutta ja hillitsee täten ilmastonmuutosta (Biomassan tuotanto [Viitattu 19.3.2014]).

EU:n jäsenvaltiona Suomi on sitoutunut vähentämään kasvihuonepäästöjä päästökaupan sektorilla 21 % sekä päästökaupan ulkopuolisilla sektoreilla 16 % vuoteen 2020 mennessä verrattuna vuoden 2005 päästömääriin. Suomi on myös veloitettu lisäämään uusiutuvien energialähteiden käyttöä 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä (Kansallinen ilmastopolitiikka 10.5.2013). Lisäämällä biomassojen käyttöä energiantuotannossa päästään lähemmäksi näitä tavoitteita sekä saavutetaan muita yhteiskunnallisia hyötyjä, joita ovat muun muassa työllisyyden ja energiaomavaraisuuden kasvu.

Suomen energiantuotannolle on ominaista käytettävien energialähteiden monipuolisuus. Tämä lisää energiahuollon kilpailukykyä ja monipuolisuutta. Vuonna 2012 Suomen kokonaisenergiankulutus oli 380 TWh, josta teollisuuden osuus oli lähes puolet. Teollisuuden energiankulutuksesta metsäteollisuus käyttää suurimman osan. Tuontienergian osuus energiankulutuksesta on suunnilleen 70 %. Tärkeimmät energialähteet vuonna 2012 olivat öljytuotteet ja puuperäiset polttoaineet, jotka kummatkin kattoivat kokonaiskulutuksesta noin 24 %. Kotimaisten energialähteiden osuutta energiankulutuksesta pyritään kasvattamaan. Merkittävimmät niistä ovat puuperäiset polttoaineet, turve ja vesivoima. Myös bioperäiset kierrätyspolttoaineet, biokaasut, peltoenergia, ja biopoltonesteet tulevat nostamaan osuuttaan yritettäessä löytää korvaavia energialähteitä fossiilisille polttoaineille (Knuuttila 2003, 15; Energian kokonaiskulutus 22.3.2013)

Metsähakkeella on merkittävä rooli uusiutuvan energian käyttötavoitteen saavuttamisessa. Sen käyttö yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä erillisessä lämmöntuotannossa on tarkoitus nostaa nykyisestä noin kahdeksasta miljoonasta kiintokuutiometrillä 13,5 miljoonaan kiintokuutiometriin (25 TWh) vuoteen

2020 mennessä (Ylitalo 2013, 5). Tämän lisäksi metsähakkeen käyttöä liikenteen biopolttoaineen tuotannossa on tarkoitus kasvattaa merkittävästi. Liikenteen biopolttoaineiden kokonaistuotantotavoite on 7 TWh vuoteen 2020 mennessä. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi on metsähakkeen tuotantokustannuksia alennettava sekä toimitusvarmuutta ja laatua parannettava kehittämällä metsähakkeen tuotantoteknologiaa, liiketoimintamalleja ja logistisia ratkaisuja (Laitila, Leinonen, Flyktman, Virkkunen & Asikainen 2010, 9).

Biomassojen, lähinnä metsähakkeen, lisääntyvän käytön myötä tiestöön kohdistuva rasitus tulee kasvamaan kuljetusvolyymien kasvun seurauksena. Lauhasen ja Laurilan (2007, 23) mukaan Suomen tieverkoston kunnolla on tärkeä rooli teollisuuden puuhuollon sekä energiapuu- ja hakekuljetusten toimivuuden ja kilpailukykyyn kannalta. Biomassojen hankintalogistiikkaa tulisi kehittää niin, että turhalta rasitukselta tieverkostoa kohtaan vältytään. Mikäli tienvarsivarastolla olevan biomassan määrä on sen verran pieni, että siitä saatava kuorma kuljetuskalustossa jää merkittävästi vajaaksi, olisi niin taloudellisesta kuin tieverkoston rasituksenkin näkökulmasta kannattavaa kuljettaa biomassat yhteiskuormissa silloin kun siihen on edellytykset käyttöpaikan ja muiden polttoaineen hankintaan osallistuvien toimijoiden osalta.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää laskennallisesti eri biomassojen yhteiskuljetuskustannukset (€/MWh) eripituisilla kuljetusmatkoilla tienvarresta käyttöpaikalle. Tutkittavat biomassat ovat hakkuutähteet, kannot ja ruokohelpi. Hakkuutähteet kuljetetaan hakkeena, kannot murskeena ja ruokohelpi silppuna. Seosuhde yhteiskuljetuksissa on 1:1 hakerekan kuormatilavuudesta 120 i-m³.

Opinnäytetyöni tavoitteena on kehittää ammatillista osaamistani sekä tuottaa uutta tietoa biomassojen yhteiskuljetusten kustannuksista metsä- ja energia-alan toimijoille.

2 HAKKUUTÄHTEET

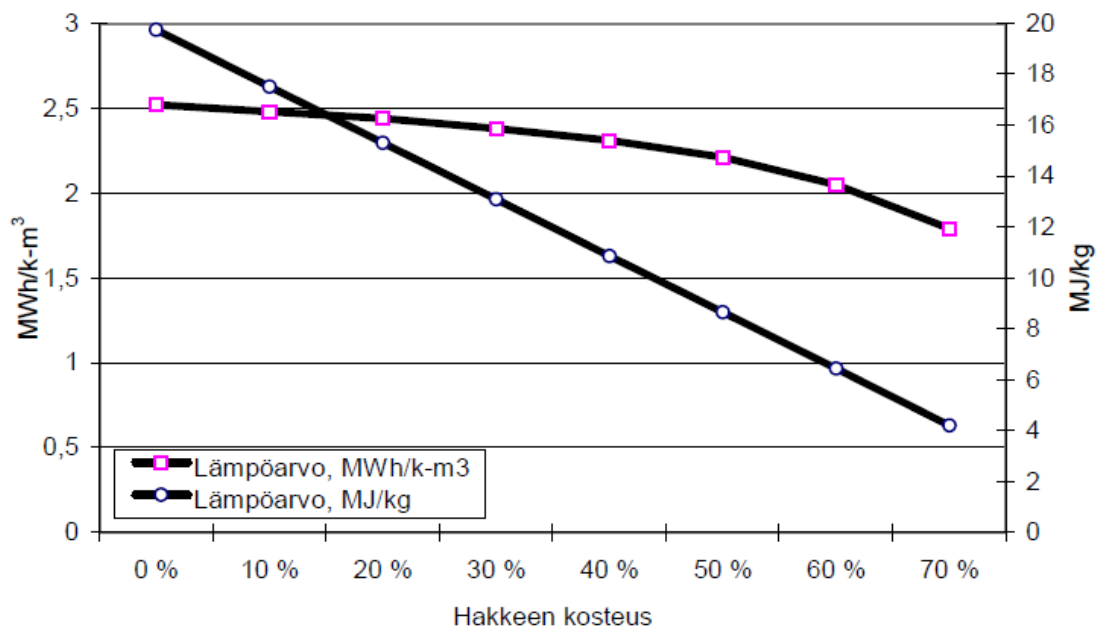
Hakkuutähteellä tarkoitetaan hakkuista kertyvää oksa- ja latvusmassaa sekä runkopuuta, joka ei täytä ainespuun mitta- ja laatuvaatimuksia eli runkohukkapuuta (Hämäläinen 2012, 4). Hakkuutähdettä kerätään lähinnä päätehakkuukohteilta, koska harvennuskohteilla toiminta on kallista vähäisen kertymän sekä korjuuta haittaavan pystyvuuston takia (Kärkkäinen 2010, 8). Hakkuualalle jäävän hakkuutähteen määrään vaikuttavat puulaji, puun määrä, oksaisuus, järeys ja lahon määrä. Parhaita hakkuutähteen korjuukohteita ovat päätehakkuukoosikot, joilta saatavan hakkuutähteen määrä on jopa kaksinkertainen saman kehitysluokan männiköihin ja koivikoihin verrattuna. Tavanomaiselle Etelä-Suomen kuusikon päätehakkuualalle jää hakkuutähdettä 40 – 50 % ainespuun määrästä (Föhr 2008, 11). Kannattavuuden, hakkuutähteen laadun ja metsämaan puuntuotoskyvyn takia kaikkea hakkuutähdettä ei kuitenkaan hakkuualalta oteta talteen vaan noin kolmannes jätetään keräämättä (Hakkila 2004, 30). Hakkuutähde voidaan korjata joko tuoreena tai vasta kesän jälkeen kuivahtaneena. Korjattaessa kuivahtanutta hakkuutähdettä suurin osa neulasista sekä pieni määrä oksia ja kuorta jää hakkuualalle. Vastaavasti hakkuutähteen talteensaanto pienenee ja korjuun kannattavuus heikkenee. Suomessa on käytäntönä kerätä hakkuutähteet tuoreena (Alakangas 2000, 50).

2.1 Ominaisuudet

Hakkuutähdehakkeen, kuten muidenkin metsähakejakeiden, merkittävimmät ominaisuudet energiakäytön kannalta ovat kosteus, palakoko, tehollinen lämpöarvo ja irtokuutiometrin ($i\text{-m}^3$) kuivamassa eli irtotiheys (Puu polttoaineena [Viitattu 9.1.2014]).

Tehollinen lämpöarvo. Teholliseksi lämpöarvoksi kutsutaan lämpöenergian määrää, joka syntyy poltettaessa yksi massayksikkö polttoainetta, kun palamisessa syntynyt vesi höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyryn muodossa (Ahtila 2010, 7). Kiinteiden ja nestemäisten polttoaineiden kohdalla lämpöarvo ilmoitetaan yleensä megajouleina polttoainekiloa kohti, MJ/kg (Biopolttoainei-

den lämpöarvoja 12.4.2013). Hakkuutähdehakkeen lämpöarvoon vaikuttavista tekijöistä merkittävimmät ovat kosteus, kemiallinen koostumus, puuaineen tiheys, tuhkapitoisuus ja neulasosuus. Näistä kosteudella on suurin vaikutus hakkeen lämpöarvoon (Eteläaho 2013, 13). Kuviosta 1 selviää kosteuden vaikutus hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvoon.



Kuvio 1. Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/k-m³ ja MJ/kg). (Alakangas 2000, 53).

Kosteus. Kosteus vaikuttaa ratkaisevasti hakkeen teholliseen lämpöarvoon ja sitä kautta poltosta saatavan energian määrään (Jahkonen, Lindblad, Sirkiä & Lauré 2012, 5). Hakkeen korkea kosteuspitoisuus nostaa kustannuksia kaukokuljetuksissa alhaisen energiatiheiden muodossa sekä lisää polttolaitosten hiilimonoksidi-, hiilivety- ja hiukkaspäästöjä. Kosteus huonontaa myös hakkeen varastointia mikrobitoiminnan aiheuttaman kuiva-ainehävikin takia (Hakonen & Laurila 2011, 7). Tuoreen hakkuutähteen kosteus on 50 – 60 %. Hakkuutähteestä valmistetun hakkeen kosteus on kuitenkin 25 – 65 % riippuen mm. vuodenajasta ja varastoinnista. Antamalla hakkuutähteen kuivahtaa palstalla kesän ajan voidaan saavuttaa jopa alle 30 %:n kosteuspitoisuus. Sen sijaan talvella kosteus voi nousta jopa yli 60 %:n hakkeen sekaan joutuvan lumen ja jään takia (Alakangas 2000, 55).

Irtotiheys. Hakkuutähteestä tuotetun hakkeen irtotiheys on 250 – 310 kg/i-m³ (Knuuttila 2003, 31). Irtotiheyteen vaikuttavat puun kuiva-tuoretiheys (kuivamassaa kg/m³) ja hakkeen tiiviys eli kiintotilavuusosuus (m³/i-m³). Neulasettoman kuu-sihakkuutähteen keskimääräinen kuiva-tuoretiheys on 465 kg/m³ ja neulaset sisältävän 425 kg/m³ (Alakangas 2000, 54). Hakkeen tiiviys vaihtelee laajasti riippuen muun muassa hakepalan muodosta, palakokojakaumasta, kuormaustekniikasta ja kaukokuljetuksen aikana tapahtuvasta painumasta. Tiiviiden tunteminen on tarpeen esimerkiksi puutavarakauppaa käytäessä. Yleisesti käytetty metsähakkeen tiiviiden muuntokerroin on 0,40, joka tarkoittaa sitä, että yhdestä kiintokuutiometristä puuainesta saadaan 2,5 irtokuutiometriä haketta ja vastaavasti yhdestä irtokuutiometristä haketta 0,40 kiintokuutiometriä puuainesta (Alakangas 2000, 54). Irtonaisen hakkuutähteen tiiviys on huomattavasti alhaisempi, vain 0,15 – 0,20 (Knuuttila 2003, 68).

Palakoko. Hakkuutähteestä valmistetun hakkeen palakokojakauma on hyvin epätasaista vaihdellen purumaisesta neulas- ja kuoriaineksesta aina puukapuloihin (Alakangas 2000, 54). Tämä vaikeuttaa sen käyttöä erityisesti pienemmissä voimalaitoksissa. Hakkeen seassa olevat tikut ja hienoaines aiheuttavat tukkeutumista ja vikaantumista polttoaineen syöttöjärjestelmissä. Hakepalan tavoitepituus on 30 – 40 mm (Aikio 2013, 11).

2.2 Hakkuutähdehakkeen tuotantoketjut

2.2.1 Hakkuu ja kasaus

Hakkuutähteen korjuussa ainespuun yhteydessä syntyvä latvusmassa kasataan ajouran viereen eikä ajouralle kuten tavanomaisessa ainespuun hakkuussa. Tämä ns. kasoille hakkuu -menetelmä nopeuttaa hakkuutähteen metsäkuljetusta, lisää hakkuutähteen korjuusaantia ja vähentää maa-aineksen joutumista hakkuutähteen sekaan (Laitila ym. 2010, 44).

2.2.2 Metsäkuljetus

Hakkuutähteen metsäkuljetus tienvarsivarastoon voidaan tehdä joko kuormatraktorilla tai maataloustraktorilla. Normaalivarusteisella kuormatraktorilla sekä maataloustraktorilla tapahtuva hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus jää alhaiseksi pienen kuormakoon vuoksi. Tuottavuutta voidaan parantaa laajentamalla kuormatila tai tiivistämällä hakkuutähdekuormaa. Kuormatila suurentamalla voidaan päästä jopa 8 – 14 m³ kokoluokan kuormiin, kun se normaalivarusteisella kuormatraktorilla jää alle 5 m³ ja maataloustraktorilla alle 3 m³.

Hakkuutähteen kuormauksessa käytetään normaalin puutavarakouran sijaan hakkuutähdekouraa, joka uppoaa paremmin hakkuutähdekasaan eikä hakkuutähteen mukana nouse niin helposti epäpuhtauksia. Myös kuormaus ja purkaminen on nopeampaa ja kuormista tulee tiiviimpiä suurempien kouraisutaakkojen takia, jolloin metsäkuljetuksen tuottavuus paranee jopa 25 % (Knuutila 2003, 65 - 66).

2.2.3 Haketus

Hakkuutähde voidaan hakettaa joko palstalla, tienvarressa, terminaalissa tai vasta käyttöpaikalla. Haketusmenetelmän valintaan vaikuttavat mm. korjuuolot, tienvarsivarastotilat, kuljetusmatka, voimalaitoksen kokoluokka, saatavilla oleva konekanta ja tuotantoketjun kustannukset. Ylivoimaisesti yleisin hakkuutähdehakkeen tuotantomenetelmä Suomessa on tienvarsihaketusmenetelmä. Vuonna 2010 70 % kaikesta hakkuutähdehakkeesta tuotettiin tienvarsihaketukseen perustuvalla tuotantoketjulla. Palstahaketusmenetelmä ei ole nykyään enää käytössä suurimittaisessa metsähakkeen tuotannossa (Pajuoja 2011, 9 - 14).

Tienvarsihaketusmenetelmä. Tienvarsihaketukseen perustuvassa hakkuutähdehakkeen tuotannossa hakkuutähde ajetaan joko metsä- tai maataloustraktorilla tienvarteen kasaan, josta se myöhemmin haketetaan yleensä kuorma-autoalustaisella hakkurilla hakeautoon. (Kärhä 2008). Tienvarsihaketusmenetel-

mässä hakerekan kantavuus ja kuormakoko saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti, ja menetelmä on kuljetustehokas myös pidemmällä kuljetusmatkoilla. Tienvarsihaketusmenetelmä on metsähakkeen tuotannon perusratkaisu, joka soveltuu kaikenkokoisille käyttöpaikoille (Laitila ym. 2010, 37-38). Tienvarsihaketusmenetelmän ongelmana on hakevarastojen ja haketuksen vaatima tila sekä maapohjan kantavuus; alueelle kun pitäisi mahtua samaan aikaan sekä 30 tonnia painava hakkuri että 60 tonnia painava hakeautokin hakevarastojen lisäksi (Kärkkäinen 2013, 8). Hakkurin ja hakeauton riippuvuus toistensa toiminnoista on myös suuri ongelma tienvarsihaketuksessa. Aikaa kuluu monesti turhaan odottamiseen, jolloin kustannukset nousevat (Laitila ym. 2010, 37).

Käyttöpaikkahaketusmenetelmä. Käyttöpaikkahaketusjärjestelmässä hakkuutähteet kuljetetaan irtorisuina tai hakkuutähdepaaleina käyttöpaikalle, jossa ne haketetaan tai murskataan tehokkailla suurhakkureilla. Suurten investointikustannusten takia käyttöpaikkahaketusta käytetään lähinnä suurilla voimalaitoksilla (Muje 2012, 10). Menetelmän merkittävin etu on se, että siinä vältytään hakkurin ja kaukokuljetuksen väliseltä riippuvuudelta toisistaan. Käyttöpaikkahaketuksella saavutetaan suurtuotannon edut; käsiteltäessä suuria hakkuutähdemääriä yksikkökustannukset pysyvät alhaisina (Suopajärvi 2013, 13). Käyttöpaikkahaketukseen perustuvan metsähakkeen tuotantomenetelmän suurimpana ongelmana voidaan pitää käsittelemättömän hakkuutähteen kaukokuljetuksen kuorman alhaista tiivyyttä, mikä kasvattaa kaukokuljetuksen kustannuksia. Kuorman alhaisen tiivyyden takia irtonaisten hakkuutähteen kaukokuljetus ei ole kannattavaa pitkillä kuljetusmatkoilla. Myös hakkuutähteen varastoinnin ja haketuksen vaatima tila käyttöpaikalla on ongelma eritoten pienillä voimalaitoksilla (Kärkkäinen 2010, 15 - 16).

Terminaalihaketusmenetelmä. Terminaalihaketusmenetelmässä hakkuutähteet kuljetetaan varastoitavaksi terminaaliin, jossa ne kuivatetaan kesän yli. Kuivuneet hakkuutähteet voidaan haketta milloin tahansa ja tämän jälkeen toimittaa käyttöpaikalle käyttötarpeen mukaan. Tämän takia kyseinen menetelmä sopii erinomaisesti usean pienen voimalaitoksen yhteiseksi hakkeentuotantopaikaksi (Kärkkäinen 2013, 9). Terminaalit sijaitsevatkin tavallisesti haketta käyttävien voimalaitosten läheisyydessä. Terminaalihaketuksen merkittävimmät edut ovat samat kuin käyttöpaikkahaketuksessakin; menetelmässä päästään eroon ”kuuman ketjun”

muodostamista ongelmista ja haketuskustannukset pysyvät alhaisina (Laitila ym. 2010, 34 - 37). Terminaalit toimivat puskurivarastoina ja mahdollistavat näin ollen hakkeen toimituksen esimerkiksi silloin kun sääolot rajoittavat raaka-aineen toimituksen tietyiltä leimikoilta. Terminaaleissa valmiin hakkeen laadun hallinta on helppoa, koska siellä voidaan kuivattaa haketta ja tarpeen tullen sekoittaa keskenään kuivaa ja kosteaa haketta laadun parantamiseksi. Hakkeen laatua parantaa myös varastointi asvalttipohjaisella varastoalueella, jolloin epäpuhtauksien pääsy hakkeen sekaan on vähäistä. Suurimmat haitat terminaalihaketuksessa ovat korkeat perustamiskustannukset, varastotilan suuri tilantarve ja kuljetuskustannukset (Hakonen 2013, 31 - 32).

Käyttöpaikka- terminaalihaketusmenetelmien kuljetuskustannuksia pyritään alentamaan tiivistämällä hakkuutähteet ns. risutukeiksi (Laitila ym. 2010, 34). Yksi risutukki on tavallisesti noin kolme metriä pitkä, halkaisijaltaan noin 70 cm ja painaa noin 500 kg. Sen energiasisältö em. koossa on 1 MWh (Ruokolainen 2012, 4). Hakkuutähteiden tiivistämisessä risutukeiksi saavutetaan muitakin hyötyjä kuorman tiiviyden kasvattamisen lisäksi; kuljetuksessa voidaan käyttää ainespuun kuljetukseen suunniteltua kalustoa, varastopaikkojen tilantarve pienenee ja varastopaikkojen roskaantumiselta vältytään (Kärkkäinen 2010, 16).

2.2.4 Kaukokuljetus

Metsäenergian kaukokuljetuksella tarkoitetaan metsäenergian raaka-aineen kuljetusta hakkuualueen läheisen tienvarren lastauspaikalta käyttöpaikalle tai terminaaliin (Kärkkäinen 2013, 24). Suomessa käytetyin kaukokuljetusmuoto metsäpolttoaineille on autokuljetus. Vuonna 2010 kaikista energiapuun kaukokuljetuksista 73 % tehtiin maanteitse. Käytännössä autokuljetuksen osuus on vieläkin suurempi, koska rautatie- ja vesikuljetuksien alku- ja loppupään kuljetukset tapahtuvat käytännössä aina autoilla (Erkkilä 2013, 20).

Hakkuutähteestä valmistetun hakkeen autokuljetukseen käytetään pääasiassa kiinteällä kuormatilalla varustettuja täysperävaunuyhdistelmiä, joiden kuormatila-

vuus on 110 – 120 m³ ja kantavuus 34 – 37 tonnia. Irtotähteen ja risutukkien kuljetukseen voidaan käyttää tavallisia puutavara-autoja. Irtotähdettä kuljetettaessa pohja- ja laitavarustusta on vahvistettava roskaantumisen estämiseksi. Yhteen puutavara-autoon mahtuu 65 – 70 risutukkaa, jolloin kuorman paino on 35 – 38 tonnia (Knuutila 2003, 73 - 74).

3 KANNOT

Kantojen ja juurakoiden käyttö metsähakkeen raaka-aineena on lisääntynyt merkittävästi 2000-luvulla (Ruokolainen 2012, 29). Vuonna 2008 kantohaketta käytettiin lämpö- ja voimalaitoksissa vajaa 0,6 milj. m³. Vuonna 2012 käyttö määrä oli lähes kaksinkertaistunut 1,1 milj. m³:iin (Ylitalo 2013, 5). Kantoja korjataan pääasiassa kuusen päätehakkuualoilta, mutta myös männyn kantoja korjataan jonkin verran. Ravinnehävikin vuoksi kantoja ei korjata liian karuilta kohteilta. Sopivia kannonnostokohteita ovat kuivahkot ja sitä viljavammat kangasmetsät (Laurila 2013, 15). Kannattavuuden takia kannonnostokohteen pinta-alan tulisi olla vähintään hehtaari ja nostettavien kantojen läpimitta yli 15 cm. Kannonnostokohteelle täytyy jättää eri puulajien kantoja 20 – 25 kappaletta hehtaaria kohti (Laine 2012, 14).

Kanto- ja juuripuun osuus runkopuun tilavuudesta on noin 25 %. Yhden hehtaarin suuruiselta kannonnostokohteelta saadaan noin 120 – 200 MWh kantoenergiaa eli kannot ovat erittäin hyvä energianlähde. Tämän lisäksi kannonnostolla saavutetaan myös monia metsänhoidollisia hyötyjä. Kannonnoston yhteydessä tapahtuva maanmuokkaus alentaa uudistamiskustannuksia. Kantojennosto vähentää juurikäävän leviämistä ja tukkimiehentäin hyökkäyksiä seuraavaan puusukupolveen. Kannonnostolla on kuitenkin myös haittapuolensa. Laaja-alainen maanpinnan rikoutuminen saattaa lisätä vesakoitumisriskiä, jolloin taimikonhoitokustannukset nousevat (Laurila 2013, 15).

3.1 Ominaisuudet

Kanto- ja juuripuusta tuotetun hakkeen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 19,3 MJ/kg. Tuoreen kannon kosteus on suunnilleen 50 %. Oikeanlaisella varastoinnilla kosteus alenee hyvinkin nopeasti. Jo kuukauden kuluttua nostosta kosteus saattaa olla vain 30 % (Laurila 2013, 18). Kantohakkeen irtotiheys on 200 – 300 kg/i-m³ (Puu polttoaineena [Viitattu 16.1.2014]).

3.2 Tuotantoketju

3.2.1 Kannonnosto

Kannot nostetaan tela-alustaisella kaivinkoneella, johon on kauhan sijasta asennettu nostohara tai nosto-paloittelulaite kannon paloittelemista varten (Sternberger 2013, 6). Noston yhteydessä läpimitaltaan alle 30 cm:n kannot halkaistaan ja sitä suuremmat paloitellaan 3 – 4 osaan riippuen kannon koosta. Kantojen paloittelulla nopeutetaan kantojen kuivumista, nostetaan kuorman kokoa ja tiiviyttä kuljetusvaiheessa sekä tehostetaan murskausta. Kantopalat varastoidaan kasoihin palstalle, jossa ne saavat kuivua ja puhdistua maa-aineksesta muutaman viikon ajan (Ruokolainen 2012, 29 - 30).

3.2.2 Metsäkuljetus

Palstalla kuivuneet kantopalat kuljetetaan kuormatraktorilla tienvarsivarastoon, jossa niitä riittävän kuivuuden saavuttamiseksi varastoidaan yleensä vielä vähintään vuoden verran ennen kuljetusta käyttöpaikalle. Metsäkuljetuksessa käytetään samanlaista kuormatraktoria kuin hakkuutähteidenkin (Ruokolainen 2012, 30). Traktorin kuormatilaa voidaan suurentaa metsäkuljetuksen kannattavuuden parantamiseksi (Sternberger 2013, 7).

3.2.3 Murskaus

Kannot murskataan joko tienvarsivarastolla tai käyttöpaikalla. Murskauspaikan valintaan vaikuttavat kantoerän koko ja kaukokuljetusmatkan pituus. Pienet kantoerät kuljetetaan yleensä käyttöpaikalle murskattavaksi ja suuremmat erät murskataan tienvarressa. Pitkillä kuljetusmatkoilla kantomurskeen kuljettaminen on kannattavampaa ja lyhyillä matkoilla kantopalojen kuljettaminen (Laurila 2013, 19). Kantoja ei voida hakettaa vaan ne täytyy murskata kantojen mukana tulevien maa-aineksen ja muiden epäpuhtauksien takia, jotka aiheuttavat hakkureissa ongelmia (Ruokolainen 2012, 29 - 31).

3.2.4 Kaukokuljetus

Kantojen kaukokuljetuksessa käytetään pääasiassa täysperävaunullisia kuorma-autoyhdistelmiä, joiden kuormatila on suunniteltu erityisesti kantojen kuljetukseen. Kuormatila on päältä avoin, sivut ovat umpinaiset ja takalaitana on verkko, joka estää teiden roskaantumisen kuljetusvaiheessa (Sternberger 2013, 7).

4 RUOKOHELPI

Ruokohelpi on monivuotinen pitkäkasvuinen ruohokasvi, joka leviää tehokkaasti juurakoiden avulla (Lauhanen & Laurila 2007, 38). Ruokohelpi suosii kosteita kasvupaikkoja, kuten meren, järvien ja jokien rantoja sekä oja ja tienpientareita. Se esiintyy luontaisesti koko maassamme aina Lappia myöten (Ruokohelpi 2011). Maalajin suhteen ruokohelpi ei ole kovin vaativa, mutta parhaimmat sadot saadaan multa- ja hietamailla sekä turvemaidilla (Lauhanen & Laurila, 38).

Ruokohelpi tuottaa runsaasti satoa jopa kymmenen vuoden ajan yhdellä kylvöllä (Ruokohelpi 2011). Ensimmäinen sato ruokohelpiviljelmillä saadaan kahden vuoden kuluttua kylvöstä (Lauhanen & Laurila 2007, 38). Yksi ruokohelpiviljelmiä tuottaa satoa keskimäärin 4 – 5 tonnia kuiva-ainetta hehtaarilta. Uudet lajikkeet saattavat tuottaa jopa yli 10 tonnin satoja. Tonnista keväällä korjatusta ruokohelvestä saadaan noin 4,5 MWh energiaa. Vuonna 2008 energiatuotantoon käytettävän ruokohelven viljelyala Suomessa oli vain noin 17 500 hehtaaria, mutta Suomen Bioenergiayhdistyksen tavoitteena on lisätä viljelyala yli 100 000 hehtaariin vuoteen 2015 mennessä (Ruokohelpi 2011).

4.1 Ominaisuudet

Ruokohelven poltto-ominaisuuksiin vaikuttavat esimerkiksi kasvilajike, kasvupaikka ja -alusta, lannoitus ja korjuuajankohta. Ruokohelven lämpöarvo on noin 4,9 MWh/t_{ka} ja energiatiheys 0,3 MWh/i-m³. Alhaisesta kosteudesta johtuen, vain 10 – 15 %, kevätkorjatun ruokohelven tehollinen lämpöarvo massayksikköä kohti saattaa olla korkeampi kuin seospoltossa käytettävien pääpolttoaineiden jrsinturpeen tai hakkeen (Sironen 2008, 8). Ruokohelven irtotiheys on hyvin alhainen, vain 70 – 80 kg/i-m³. Esimerkiksi jrsinturpeen tiheys on 340 kg/i-m³ ja hakkeen 250 – 400 kg/i-m³ (Suomalainen 2006, 13).

Edellä mainituista ominaisuuksista johtuen ruokohelven käyttö nykyisillä turpeen ja puun polttamiseen tarkoitetuilla voimalaitoksilla on melko ongelmallista. Kevyenä polttoaineena se aiheuttaa holvaantumisia ja tukkeutumisia polttoaineen käsittelyjärjestelmissä (Paappanen, Lindh, Kärki, Impola, Rinne, Lötjönen, Kirkkari, Taipale

& Leino 2008, 3 - 5). Ruokohelven alhainen kosteus taas nostaa polttokattiloiden palamislämpötilaa, mikä vaikeuttaa palamisprosessin hallintaa (Suomalainen 2006, 14). Ruokohelven sisältämien aineiden on arveltu aiheuttavan korroosiota ja likaantumista kattiloissa. Ruokohelpeä käytetäänkin tätä nykyä seospolttoaineena puun ja turpeen seassa (Paappanen ym. 2008, 3 - 5).

4.2 Tuotantoketju

4.2.1 Korjuu

Ruokohelpisato korjataan aikaisin keväällä, jolloin sen kosteus on alhainen ja lämpöarvo korkea. Korjuu aloitetaan heti kun kasvualusta kantaa korjuukoneita. Urien ja tiivistymisvaurioiden muodostumista tulee välttää korjuussa, jotta tulevien vuosien sadonkorjuu ei vaarannu. Tästä syystä korjuuta ei tulisi aloittaa vielä maan ollessa liian märkää. Ruokohelpisatoa ei suositella korjattavan uuden kasvuston versojen pituuden ollessa yli 25 cm, koska tällöin polttoaineen laatu on liian huonoa korkean kosteuden takia. Tämän lisäksi uuden kasvuston katkaiseminen hidastaa alkavan uuden sadon kasvuunlähtöä (Yrjölä 2009, 16).

4.2.2 Niitto

Ruokohelpisato voidaan niittää joko niittomurskaimella tai niittokoneella. Niittomurskainta käytettäessä tulisi murskaustehon olla mahdollisimman pieni korjuutappioiden minimoimiseksi. Ruokohelpikasvusto täytyy niittää mahdollisimman lyhyeen sänkeen. Leikkuukorkeuden nostaminen 5 cm:stä 10 cm:iin voi vähentää talteensaantoa jopa 25 %. Ruokohelven tyvi on kasvin painavin osa ja korsiosa 50 cm:iin asti sisältää melkein puolet koko kasvin kuiva-ainepainosta. Tästä syystä niittokorkeuteen on syytä kiinnittää erityistä huomiota (Yrjölä 2009, 16).

4.2.3 Korjuu paaleina

Niitetty ruokohelpikasvusto voidaan paalata joko pyöröpaalaimella tai kanttipaalaimella. Yleisin Suomessa käytetty paalainmenetelmä on pyöröpaalaus. Pyöröpaalaimet ovat halvempia ja kevyempiä kuin suurkanttipaalaimet. Suurkanttipaalauksen etuja ovat paalien tiiviys ja muoto. Suurkanttipaalien tiheys saattaa olla jopa 200 kg/m^3 , kun vastaavasti pyöröpaalien tiheys jää alle 140 kg/m^3 (Yrjölä 2009, 17). Suorakaiteen muotoisilla paaleilla saadaan jopa 30 - 50 % painavampia kuormia kuljetuksessa kuin pyöröpaaleilla. Myös varastoinnissa varastotila saadaan käytettyä paremmin hyödyksi kanttipaaleilla. Kanttipaalainten käyttö ruokohelven korjuussa onkin yleistymässä edellä mainituista syistä johtuen. Suurkanttipaalien suositusmitat ovat: 120 cm (leveys) x 70 cm (korkeus) x 240 cm (pituus). Pyöröpaalien suosituskoko on halkaisijaltaan alle 130 cm ja leveydeltään 120 cm. Paalauksen jälkeen ruokohelpipaalit kuljetetaan pellolta välivarastoitavaksi joko kaukokuljetuskalustoa kantavan tien varteen tai helven ostajan terminaaliin. Myös paalien suora kuljetus voimalaitokselle onnistuu mikäli pellon ja voimalaitoksen välimatka on lyhyt (Lötjönen & Knuuttila 2009, 11 - 14).

4.2.4 Irtokorjuu

Ruokohelven korjuu voidaan toteuttaa myös irtokorjuuna. Irtokorjuumenetelmän käyttö on kuitenkin huomattavasti harvinaisempaa kuin paalausmenetelmän. Tämä johtuu ruokohelpisilpun alhaisesta tiheydestä, joka on vain suunnilleen 80 kg/m^3 . Ruokohelpisilpun alhaisen tiheyden vuoksi sen kuljettaminen pitkillä matkoilla on kallista (Yrjölä 2009, 18). Kyseistä menetelmää käytetäänkin vain kuljetusmatkan ollessa alle 15 km. Irtokorjuumenetelmässä ruokohelpi korjataan ajettavalla tai traktorikäyttöisellä tarkkuussilppurilla, tarkkuussilppurivaunulla tai silppuavalla noukinvaunulla. Tämän jälkeen silputtu ruokohelpi ajetaan varastoamaan, jossa se tiivistetään ja peitetään muovilla. Irtokorjuumenetelmän etuna on se, että siinä saadaan valmista polttoainetta voimalaitoksille. Silpun täytyy olla tasalaatuista ja pituudeltaan alle 50 mm. Näin ollen se sekoittuu hyvin pääpolttoaineeseen eikä aiheuta ongelmia voimalaitosten kuljettimissa (Lötjönen & Knuuttila 2009, 13).

4.2.5 Kaukokuljetus

Ruokohelpi voidaan kuljettaa käyttöpaikalle silppuna, paaleina tai seoksena turpeen tai metsähakkeen kanssa. Kuljetettaessa ruokohelpi silppuna tai paaleina ei voida nykyisin saavuttaa rekka-auton täyttä kantavuutta, joka on 38,5 tonnia. Esimerkiksi helpisilpun kuorman paino 120 m³:n rekka-autolla on vain yhdeksän tonnia. Näin vajaiden kuormien kuljettaminen onkin taloudellisesti kannattamatonta.

Ruokohelpipaalien suora kuljetus viljelyksiltä käyttöpaikalle on yleisesti kannattavampaa kuin helven kuljettaminen seoksena. Tämä edellyttää kuitenkin käyttöpaikkojen valmiutta ottaa paalit vastaan, niiden murskausta ja sekoittamista pääpolttoaineen joukkoon.

Pyöröpaalikuljetuksissa paalien optimaalinen koko on 120 cm x 120 cm, jolloin rekka-autoon mahtuu kaksi paalia vierekkäin ja kaksi päällekkäin. Näin ollen kuorman painoksi saadaan 13 – 15 tonnia. Suurkantipaaleilla kuorman painoksi saadaan jopa 20 – 21 tonnia.

Ruokohelpikuljetusten ongelmina ovat pitkät kuljetusmatkat, kuljetettavan polttoaineen keveys sekä logistisen toimitusketjun kehittymättömyys verrattuna esimerkiksi puuhun ja turpeeseen. Myös huonosti sijoitetut varastopaikat aiheuttavat ongelmia kuljetuksen näkökulmasta. Varastopaikka tulisi sijoittaa niin, että sinne pääsee helposti rekka-autolla ja jossa lastaaminen on nopeaa ja vaivatonta (Lähdevaara, Paananen, Savolainen & Vanhala 2010 106 - 109).

5 KULJETUSKUSTANNUSTEKIJÄT

Metsähakkeen tuotantoketjun kokonaiskustannuksiin vaikuttaa hakkeen raaka-aine. Valtaosa kustannuksista syntyy samoista työvaiheista riippumatta siitä valmistetaanko hake hakkuutähteistä, kannoista, vai runkopuusta. Metsähakkeen tuotantokustannukset muodostuvat pääsääntöisesti runkopuun kaatokustannuksista tai hakkuutähteiden kasauskustannuksista, metsäkuljetuskustannuksista, haketuskustannuksista, kaukokuljetuskustannuksista ja raaka-aineen hankinnasta vastaavan organisaation kustannuksista. Kunkin erillisen työvaiheen kustannukset muodostuvat erilaisista kustannustekijöistä, joita ovat koneisiin, työolosuhteisiin, työntekijöihin, organisaatioon ja tuotteeseen liittyviä muuttujia. Näistä merkittävimpiä ovat kuljetusmatkan pituus, hakkuupalstan koko ja maaston ominaisuudet, työkonoiden ominaisuudet, koneiden työllistyminen, työskentelyolosuhteet ja raaka-aineen laatu (Kärkkäinen, M. 2013, 19).

Vastaavasti ruokohelven tuotannon kokonaiskustannukset muodostuvat yleensä viljelyn perustamisesta ja lopettamisesta, lannoituksesta, korjuusta, kaukokuljetuksesta ja murskauksesta mikäli ruokohelpi kuljetetaan käyttöpaikalle paaleina (Paappanen ym. 2008, 134 - 135).

Kaukokuljetuskustannukset muodostuvat kuljetuksesta sekä kuorman tekoon ja purkuun käytettävästä ajasta. Tärkeitä kustannustekijöitä kaukokuljetuksessa ovat kuljetusmatkan pituus ja kuorman energiamäärä (Kärkkäinen, M. 2013, 24). Kuorman energiamäärään vaikuttavat kuljetuskaluston kuormatilan tilavuus ja kuljetettavan polttoaineen energiatiheys. Energiatiheydellä tarkoitetaan polttoaineen energiasisältöä tilavuusyksikköä kohti ja se ilmoitetaan kiinteiden biopolttoaineiden yhteydessä yleensä irtokuutiometriä ($i\text{-m}^3$) kohti. Hakkeen energiatihyteen vaikuttavat tehollinen lämpöarvo, kosteus, kuiva-tuoretiheys ja tiiviys. Yleisesti metsäpolttoaineiden energiatiheys on alhainen (Tapaninen 2011, 16). Puubiomassan kiintokuutiometrin energiatihytenä pidetään yleisesti 2 MWh/m^3 ja hakkeen tiiviys katsotaan olevan 0,40. Näin ollen hakkeen energiatihydeksi saadaan $0,8 \text{ MWh/i-m}^3$. Hakettamattoman hakkuutähteen tiiviys on välillä 0,15 – 0,20, jolloin sen energiatiheys on niinkin alhainen kuin $0,3 - 0,4 \text{ MWh/i-m}^3$ (Knuuttila 2003, 30,

74). Ruokohelpisilpun energiatiheys on vieläkin alhaisempi, vain 0,15 – 0,33 MWh/i-m³ riippuen silpun pituudesta (Heikkilä 2010, 6).

Kuljetuskaluston kustannuksilla on suuri merkitys kuljetuskustannusten muodostumisessa. Kalliit rekka-autot vaativat täystyöllisyyttä, jotta kiinteiden kustannusten osuus yksikkökustannuksista ei nousisi liian suureksi. Kiinteät kustannukset eivät ole riippuvaisia toiminta-asteesta vaan ajan kulusta. Kiinteisiin kustannuksiin luetaan muun muassa pääoman poistot ja korot, vakuutukset sekä valtaosa työkustannuksista. Muuttuvat kustannukset muuttuvat toiminta-asteen mukaan ja niitä ovat polttoaine-, voiteluaine-, huolto- ja korjauskustannukset sekä kulkemiskorvaukset (Knuutila 2003, 80)

6 AINEISTO JA MENETELMÄT

6.1 Aineisto

Aineistoa keräsin laajasti lähinnä internetistä. Pääasiallisina lähdeaineistoina käytin metsäntutkimuslaitoksen ja VTT:n aihetta käsitteleviä julkaisuja. Erityisesti Metlan tutkijat Antti Asikainen ja Juha Laitila ovat perehtyneet metsäpolttoaineiden tuotannon kustannusten ja kannattavuuden selvittämiseen.

6.2 Menetelmät

Tutkimuksen kohteena olevien biomassojen kuljetuskustannukset selvitin laskennallisesti hakerekan käyttötuntikustannusten, kuorman energiasisällön, kuljetusmatkan sekä kuormaus- ja purkuajojen perusteella. Herkkyysanalyysin avulla selvitin kuormakoon vaikutusta suhteellisiin (%) ja absoluuttisiin (€/MWh) kuljetuskustannuksiin. Herkkyysanalyysissä hakerekan kuormatilan tilavuus oli 140 i-m³ eli 16,7 % suurempi kuin perustapauksessa.

Hakerekan käyttötuntikustannuksella tarkoitetaan kustannuksia mitä hakerekan toiminnan ylläpitäminen maksaa käyttötunnilta. Käyttötuntikustannukseen vaikuttavat vuotuiset kiinteät ja muuttuvat kustannukset sekä hakerekan käyttötunnit vuodessa.

Laitila ja Väätäinen (2011) ovat tutkimuksessaan ”Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus” selvittäneet hakerekan käyttötuntikustannukset erikseen sekä ajoajan että kuormaus- ja purkuajan osalta. Koska tutkimus on varsin tuore, voidaan siinä esiintyvien muuttujien muiden kuin polttoaineen hinnan ja kuljettajan tuntipalkan osalta pitävän paikkansa myös alkuvuodesta 2014. Hakerekan käyttötilaskelmassa hakerekan hankintahinnaksi oletettiin 301 641 €, jäännösarvoksi 40 % uushankintahinnasta ja pitoajaksi 4,6 vuotta. Kustannukset jaettiin kiinteisiin kustannuksiin, työvoimakustannuksiin ja käyttökustannuksiin.

Kiinteät kustannukset pitivät sisällään vuotuiset pääoman poistot ja korot, vakuutukset ja hallinnolliset kustannukset. Työvoimakustannukset käsittivät hakerekan

kuljettajan tuntipalkan sekä välilliset palkkakustannukset. Välillisten palkkakustannusten oletettiin olevan 68 % kuljettajan tuntipalkasta.

Omassa työssäni hakerekan käyttötuntikustannuksen selvittämiseksi käytin Laitilan ja Väätäisen (2011, 115) hakerekan käyttötuntikustannusten laskennassa käytettyjä lukuarvoja muuttamalla vain polttoaineen hinnan ja kuljettajan tuntipalkan vastaamaan paremmin tämänhetkistä tilannetta. Dieselpolttoaineen arvonlisäveroton keskihinta Suomessa oli 24.1.2014 1,23 €/l (Polttoaine.net 2014). Täysperävaunukuljettajan tuntipalkka 1.10.2013 tai lähinnä sitä olevan palkanmaksukauden alusta lukien on palvelusvuosista riippuen joko 13,58 €, 13,74 €, 14,19 € tai 14,52 € (Autoliikenteen Työnantajaliitto ry:n ja Auto- ja Kuljetusalan Työntekijäliitto AKT ry:n välinen kuorma-autoalan työehtosopimus 1.2.2012 – 31.1.2014, 8). Laskelmissani käytin kuljettajan tuntipalkkana edellä mainittujen tuntipalkkojen keskiarvoa 14 €/h. Hakerekan käyttötuntikustannukseksi muodostui näin ollen ajossa 92 €/h ja kuormauksen ja purun osalta 60,3 €/h. Kuormauksen ja purun käyttötuntikustannusten laskennassa ei ole huomioitu vuotuisia polttoaine-, huolto- ja kunnossapitokustannuksia, koska kuormauksen ja purun aikana hakerekka on paikallaan ja näin ollen polttoaineen kulutus on käytännössä olematonta. Samasta syystä myös huolto- ja kunnossapitotoimenpiteistä aiheutuvat kustannukset alenevat merkittävästi. Käyttötuntikustannuksen laskennassa käytetyt muuttujat ja lukuarvot on esitetty tarkemmin taulukossa 1.

Taulukko 2. Hakerekan käyttötuntikustannusten muodostuminen (mukaihen Laitila & Väätäinen 2011, 115)

	Hakereikka
Hankintahinta, € (alv 0 %)	301 641
Jäännösarvo, € (alv 0 %)	120 656
Pitoaika vuosina	4,6
KIINTEÄT KUSTANNUKSET	
Poistot, €/vuosi	39 345
Korko, €/vuosi	15 771
Vakuutukset, €/vuosi	6 357
Hallinto, €/vuosi	7 237
TYÖVOIMAKUSTANNUKSET	
Vuotuiset käyttötunnit, h	2 600
Vuotuinen työaika, h	3 050
Toiminnallinen käyttöaste, %	85
Työntekijän tuntipalkka, €/h	14
Välilliset palkkakustannukset, %	68
Vuotuiset työvoimakustannukset yhteensä, €/vuosi	71 736
KÄYTTÖKUSTANNUKSET	
Polttoaineen hinta, €/litra (Alv 0 %)	1,23
Vuotuiset polttoainekustannukset, €/vuosi (Alv 0 %)	63173
Vuotuiset voiteluainekustannukset, € /vuosi (Alv 0 %)	2 354
Vuotuiset huolto- ja kunnossapitokustannukset, €/vuosi (Alv 0 %)	19 193
Siirrot & korvaukseton ajo, €/vuosi	2 500
Laskentamarginaali (5 %), € vuodessa	11 465
VUOTUISET KUSTANNUKSET YHTEENSÄ, € (Alv 0 %)	239 131
Käyttötuntikustannus ajossa, €/h (Alv 0 %)	92,0
Käyttötuntikustannus kuormauksessa ja purussa, €/h (Alv 0 %)	60,3

Hakerekan ajonopeuden kuormattuna laskin kaavalla (Asikainen & Nuuja 1999, 483):

$$\text{ajonopeus} = -0,44591 + 31,69 \times \log(\text{matka}),$$

jossa ajonopeus on kilometriä tunnissa ja matka kilometreinä.

Hakosen (2013, 35 - 36) mukaan hakkurin käyttötuntituottavuus tienvarressa on 100 i-m³/h, hakkeen purkunopeus käyttöpaikalla 260 i-m³/h ja hakeauton kuormausnopeus pyöräkuormaajalla terminaalissa 420 i-m³/h. Ruokohelpisilpun kuormauksen pyöräkuormaajalla voidaan olettaa tapahtuvan yhtä nopeasti kuin hakkeenkin. Koska tässä tutkimuksessa silppu kuormataan tienvarsivarastolla eikä

terminaalissa on kuormausnopeus ahtaamman tilan vuoksi jonkin verran hitaampaa. Sen vuoksi silpun kuormausnopeutena käytin työssäni lukuarvoa 300 i-m³/h.

Kalle Kärhä, Antti Hautala ja Arto Mutikainen ovat tutkineet kantojen esimurskausta tienvarressa Crambo 5000 -murskaimella. Harvalla seulalla murskattaessa tunti-tuottavuus oli 171 i-m³/h ja murskeen energiatiheys 0,59 MWh/i-m³ (Kärhä, Hautala & Mutikainen 2011, 19, 29). Omassa työssäni käytin edellä mainittuja arvoja.

Muita autokuljetuskustannusten laskennassa käytettyjä oletuksia työssäni:

- Hakkuutähdehakkeen energiatiheys 0,9 MWh/i-m³
- Ruokohelpisilpun energiatiheys 0,3 MWh/i-m³
- Myös kantomurskeen, ruokohelpisilpun ja seoskuormien purkunopeudeksi käyttöpaikalla oletettiin 260 i-m³/h
- Yhteiskuljetuksissa hakkuutähteiden haketus, kantojen murskaus ja ruokohelpisilpun kuormaus tapahtuivat samalla tienvarsivarastolla. Ensimmäisen kuormausvaiheen jälkeen hakerekka siirtyi seuraavalle työpisteelle samalla tienvarsivarastolla, jossa kuormaan haketettiin, murskattiin tai kuormattiin yhteiskuorman toinen biomassa. Laskelmissa ei ole otettu huomioon työpisteiden välisten siirtymisten ajamenekkiä.

7 TULOKSET

Laskemalla yhteen hakerekan kuormaus- ja purkuajan sekä varsinaisen ajo-osuuden kustannukset saatiin kuljetuksen kokonaiskustannukset eri kuljetusmatkoilla. Vastaavasti kuljetuskustannus energiayksikköä kohti saatiin jakamalla kuljetuksen kokonaiskustannukset kuorman energiamäärällä. 20 km:n kuljetusmatkalla hakerekan keskinopeus oli 40,8 km/h, jolloin kuljetukseen kului aikaa 0,49 h. Varsinaisen ajo-osuuden kustannus oli 45,1 €. 50 km:n kuljetusmatkaan kului aikaa 0,94 h kun hakerekan keskinopeus tällä matkalla oli 53,4 km/h. 50 km:n kuljetusmatkan ajo-osuuden kustannukseksi muodostui 86,2 €. Vastaavasti 100 km:n kuljetusmatkalla varsinaisen ajo-osuuden kustannukseksi saatiin 146,2 € kun ajanmenekki tällä matkalla oli 1,59 h keskinopeuden ollessa 62,9 km/h. Biomassojen purkunopeus käyttöpaikalla oli 260 i-m³/h. Näin ollen 120 i-m³:n suuruisen kuorman purkuun kului aikaa 0,46 h, jolloin purkukustannukseksi saatiin 27,8 €. Vastaavasti 140 i-m³:n suuruisen kuorman purun ajanmenekki oli 0,54 h ja purkukustannus 32,5 €.

7.1 Kuljetuskustannukset erikseen kuljetettuina

7.1.1 Hakkuutähdehake

Hakkuutähdehakkeen haketuksen tuntituottavuus tienvarsivarastolla oletettiin olevan 100 i-m³/h. Perustapauksessa hakerekan kuormatilan tilavuus oli 120 i-m³. Näin ollen haketuksen ajanmenekiksi muodostui 1,2 h ja hakerekan kuormausajan kustannukseksi 72,4 €. Kuljetuksen kokonaiskustannukseksi saatiin 20 km:n kuljetusmatkalla 145,3 €, 50 km:llä 186,3 € ja 100 km:llä 246,4 €. Kun hakkuutähdehakkeen energiatiheydeksi oletettiin 0,9 MWh/i-m³ saatiin perustapauksen hakekuorman energiamääräksi 108 MWh. Kuljetuskustannukseksi megawattituntia kohti muodostui 20 km:n kuljetusmatkalla 1,35 €, 50 km:llä 1,73 € ja 100 km:llä 2,28 €.

Kuljetettaessa hakkuutähdehaketta hakerekalla, jonka kuormatilan tilavuus oli 140 m³, haketuksen ajanmenekiksi tienvarsivarastolla muodostui 1,4 h ja kuormaus-

ajan kustannukseksi 84,4 €. Kuljetuksen kokonaiskustannukset olivat seuraavat: 20 km:llä 162,0 €, 50 km:llä 203,0 € ja 100 km:llä 263,1 €. 140 i-m³:n hakekuorman energiamäärä oli 126 MWh. Näin ollen kuljetuskustannukset megawattituntia kohti olivat 1,29 € (20 km), 1,61 € (50 km) ja 2,09 € (100 km).

7.1.2 Kantomurske

Laskelmissani käytetty kantojen tienvarsimurskauksen tuntituottavuus oli 171 i-m³/h. Murskeet kuljetettiin perustapauksessa hakerekalla, jonka kuormatilan tilavuus oli 120 m³. Murskauksen ajanmenekiksi saatiin näillä lähtöarvoilla 0,70 h ja kuormausajan kustannukseksi 42,3 €. Kantomurskeen kuljetuksen kokonaiskustannuksiksi saatiin 20 km:n kuljetusmatkalla 115,3 €, 50 km:llä 156,3 € ja 100 km:llä 216,3 €. Kun kantomurskeen energiatiheudeksi oletettiin 0,59 MWh/i-m³ saatiin hakerekan murskekuorman energiamääräksi perustapauksen kohdalla 70,8 MWh. Näin ollen kuljetuskustannukseksi energiayksikköä kohti muodostui 20 km:n kuljetusmatkalla 1,63 €/MWh, 50 km:llä 2,21 €/MWh ja 100 km:llä 3,06 €/MWh.

Kantojen murskauksen ajanmenekki oli 0,82 h ja kuormausajan kustannus 49,4 € kun murske kuljetettiin hakerekalla, johon mahtui 140 i-m³ mursketta. Kuljetuksen kokonaiskustannuksiksi saatiin tässä vaihtoehdossa 20 km:n kuljetusmatkan kohdalla 127,0 €, 50 km:n kohdalla 168,0 ja 100 km:n kohdalla 228,0 €. 140 i-m³:n murskekuorman energiamääräksi muodostui 82,6 MWh, jolloin kuljetuskustannus megawattituntia kohti oli 20 km:n kuljetusmatkalla 1,54 €, 50 km:llä 2,03 € ja 100 km:llä 2,76 €.

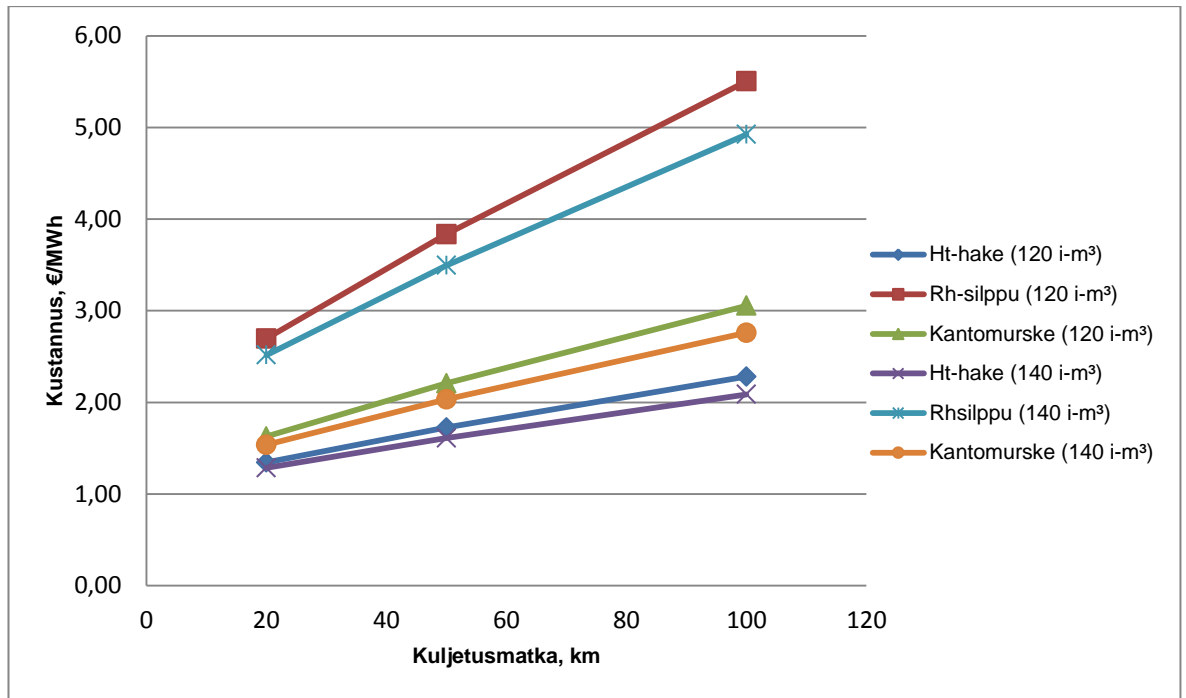
7.1.3 Ruokohelpisilppu

Kuljetusvaihtoehdossa, jossa ruokohelpisilppua kuljetettiin 120 i-m³, hakerekan kuormaamiseen tienvarsivarastolla kului aikaa 0,4 h, jolloin kuormauskustannus oli 24,1 €. Kuljetuksen kokonaiskustannukseksi muodostui 20 km:n kuljetusmatkalla

97,1 €, 50 km:llä 138,1 € ja 100 km:llä 198,1 €. Perustapauksessa ruokohelpisilpun kuorman energiamäärä oli 36 MWh, jolloin kuljetuskustannukset megawattituntia kohti olivat 2,70 € (20 km), 3,84 € (50 km) ja 5,50 € (100 km).

Vastaavasti kuljetettavan silppumäärän ollessa 140 i-m³ kuormauksen ajamenekki tienvarsivarastolla oli 0,47 h ja kuormauskustannus 28,1 €. Kuljetuksen kokonaiskustannusten ollessa 20 km:n kuljetusmatkalla 105,7 €, 50 km:llä 146,8 € ja 100 km:llä 206,8 € saatiin kuljetuskustannuksiksi megawattituntia kohti 2,52 € (20 km), 3,49 € (50 km) ja 4,92 € (100 km).

Kuviossa 2 on esitetty biomassojen kuljetuskustannukset erikseen kuljetusmatkan funktiona.



Kuvio 2. Hakkuutähdehакkeen, ruokohelpisilpun ja kantomurskeen kuljetuskustannukset erikseen kuljetettuina.

7.2 Yhteiskuljetusten kustannukset

7.2.1 Hakkuutähdehake–kantomurske

Perustapauksessa hakkuutähdehакkeen ja kantomurskeen yhteiskuljetuksessa hakkuutähteen haketukseen tienvarsivarastolla kului aikaa 0,6 h ja kantojen murskaukseen 0,35 h. Hakerekan kuormauksen ajanmenekiksi muodostui näin ollen 0,95 h, jolloin kuormauskustannus oli 57,3 €. Hakkuutähdehake-kantomurske – yhteiskuljetuksen kokonaiskustannukseksi muodostui 20 km:n kuljetusmatkalla 130,3 €, 50 km:llä 171,3 € ja 100 km:llä 231,6 €. Seoskuorman energiamääräksi saatiin 89,4 MWh, jolloin kuljetuskustannus energiayksikköä kohti oli 1,46 €/MWh (20 km), 1,92 €/MWh (50 km) ja 2,59 €/MWh (100 km).

Vastaavasti kuljetettaessa hakkuutähdehake-kantomurske –seoskuormaa hakerekalla, jonka kuormatilan tilavuus oli 140 i-m³, kuormauksen ajanmenekiksi muodostui 1,11 h ja kuormausajan kustannukseksi 66,9 €. Kuljetuksen kokonaiskustannukseksi saatiin 20 km:llä 144,5 €, 50 km:llä 185,5 € ja 100 km:llä 245,6 €. 140

i-m³:n suuruisen seoskuorman energiamäärä oli 104,3 MWh. Näin ollen kuljetuskustannukseksi megawattituntia kohti saatiin 20 km:n kuljetusmatkalla 1,39 €, 50 km:llä 1,78 € ja 100 km:llä 2,35 €.

7.2.2 Hakkuutähdehake–ruokohelpisilppu

Hakkuutähdehakkeen ja ruokohelpisilpun yhteiskuorman kuormauksen ajanmenekki perustapauksessa oli 0,8 h, josta haketukseen kului aikaa 0,6 h ja silpun kuormaukseen pyöräkuormaajalla 0,2 h. Kuormausajan kustannukseksi muodostui 48,2 €. Kuljetuksen kokonaiskustannukseksi saatiin 20 km:n kuljetusmatkalla 121,2 €, 50 km:n matkalla 162,2 € ja 100 km:n matkalla 222,3 €. Energiayksikköä kohti kuljetuskustannukset perustapauksessa olivat 1,68 €/MWh (20 km), 2,25 €/MWh (50 km) ja 3,09 €/MWh (100 km) kun kuorman energiamäärä oli 72 MWh.

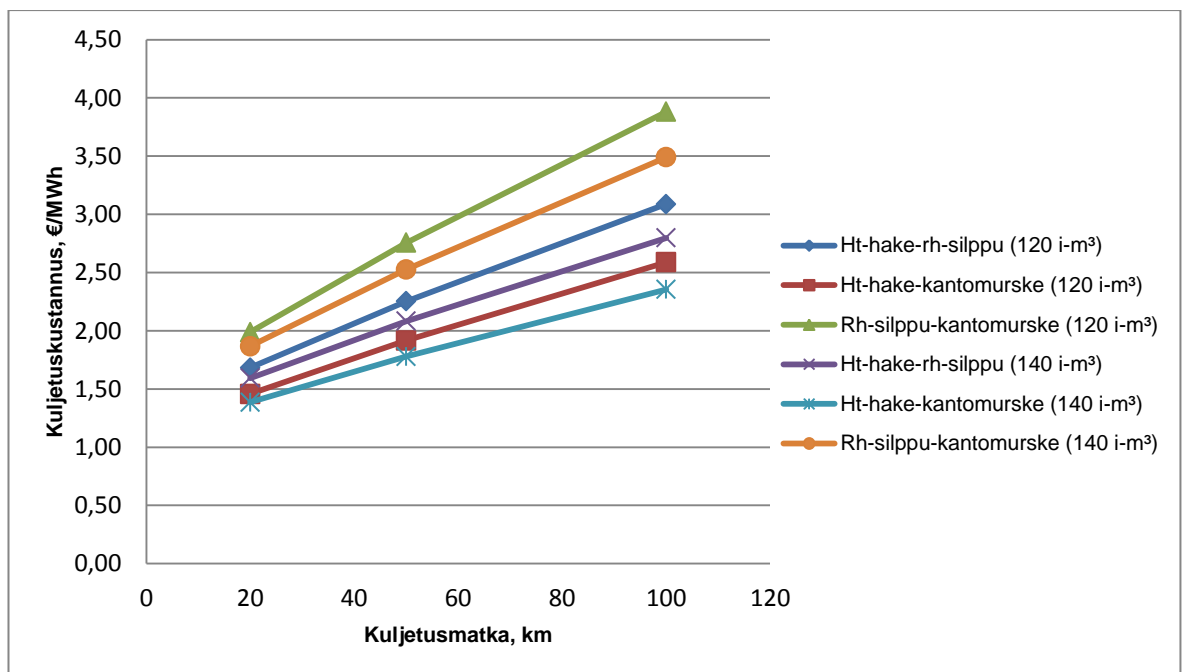
Kun taas yhteiskuorma kuljetuksessa oli 140 i-m³, saatiin kuormauksen ajanmenekiksi 0,93 h. Tästä haketuksen ajanmenekin osuus oli 0,7 h ja silpun kuormauksen 0,23 h. Kuormauskustannukseksi muodostui 56,3 €. Kuljetuksen kokonaiskustannus tässä tapauksessa oli 20 km:llä 133,9 €, 50 km:llä 174,9 € ja 100 km:llä 234,9 €. Kuorman energiamäärän ollessa 84 MWh olivat kuljetuskustannukset megawattituntia kohti 20 km:n kuljetusmatkalla 1,59 €, 50 km:llä 2,08 € ja 100 km:llä 2,80 €.

7.2.3 Kantomurske–ruokohelpisilppu

Perustapauksessa kantojen murskaukseen kului aikaa 0,35 h ja silpun kuormaukseen 0,2 h eli yhteensä murske-silppu –yhteiskuorman ajanmenekki oli 0,55 h, jolloin kuormausvaiheen kustannukseksi muodostui 33,2 €. Kuljetuksen kokonaiskustannukseksi saatiin 20 km:llä 106,2 €, 50 km:llä 147,2 € ja 100 km:llä 207,2 €. Kuorman energiamäärä perustapauksessa oli 53,4 MWh, jolloin energiayksikkökohtaiset kustannukset olivat 20 km:n matkalla 1,99 €/MWh, 50 km:n matkalla 2,76 €/MWh ja vastaavasti 100 km:n matkalla 3,88 €/MWh.

Kuljetettaessa murske-silppu –yhteiskuormaa hakerekalla, jonka kuormatilan tilavuus oli 140 i-m³ oli kuormausvaiheen ajanmenekki 0,64 h, josta kantojen murskaukseen kului aikaa 0,41 h ja silpun kuormaamiseen 0,23 h. Näin ollen kuormauskustannukseksi saatiin 38,8 €. Kokonaiskustannukset olivat tässä tapauksessa 20 km:llä 116,3 €, 50 km:llä 157,4 € ja 100 km:llä 217,4 €. Kuorman energiamäärä oli 62,3 MWh, jolloin kuljetuskustannukset megawattituntia kohti olivat 20 km:n kuljetusmatkalla 1,87 €, 50 km:llä 2,53 € ja 100 km:llä 3,49 €.

Kuviossa 3 on esitetty yhteiskuormien kuljetuskustannukset kuljetusmatkan mukaan.



Kuvio 3. Yhteiskuljetusten kustannukset.

8 TULOSTEN TARKASTELU JA POHDINTA

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää laskennallisesti hakkuutähdehakkeen, kantomurskeen ja ruokohelpisilpun kuljetuskustannukset yhteiskuormassa ja erikseen tienvarresta käyttöpaikalle kuljetusmatkoilla 20 km, 50 km ja 100 km. Tutkimuksen perusteella edullisinta oli kuljettaa hakkuutähdehake erikseen. Vastaavasti kalleinta oli kuljettaa ruokohelpisilppua, jonka kuljetuskustannukset megawattituntia kohti olivat jopa yli kaksinkertaiset verrattuna hakkuutähdehakkeen kuljetuskustannuksiin pisimmällä kuljetusmatkalla. Vaikka ruokohelpisilpun kuljetuksen kokonaiskustannukset olivat alhaisimmat, niin silppukuorman pieni energiamäärä teki sen kuljettamisesta kaikkein kalleinta megawattituntia kohti. Tutkimuksessa silppukuorman energiamäärä oli vain kolmanneksen hakekuorman ja noin puolet kantomurskekuorman energiamäärästä.

Luonnollisesti myös yhteiskuormien, joissa toisena kuljetettavana biomassana oli ruokohelpisilppu, kuljetuskustannukset megawattituntia kohti olivat korkeimmat. Hakkuutähdehake-kantomurske –yhteiskuorman kuljetuskustannukset (€/MWh) olivat toiseksi edullisimmat kaikki biomassakuormat huomioiden.

Herkkyysanalyysissä muuttuvana tekijänä oli hakerekan kuormatilan tilavuus. Perustapauksessa se oli 120 i-m³ ja herkkyysanalyysissä 140 i-m³. Kun hakerekan kuormatilan tilavuus kasvoi 20 i-m³ eli 16,7 % niin kuljetuskustannukset alenivat keskimäärin 0,21 € per MWh (7,6 %). Suurin vaikutus kuormakoon kasvattamisella oli kuljetettaessa ruokohelpisilppua 100 km:n kuljetusmatkalla. Tällöin kuljetuskustannukset alenivat 0,58 € kuljetettua megawattituntia kohti eli 10,5 %.

Todellisuudessa yhteiskuormien kuljetuskustannukset ovat kuitenkin korkeammat kuin tämän tutkimuksen tuloksissa. Tämä johtuu siitä, että yhteiskuljetuksissa biomassojen kuormaus tapahtuu yleensä eri tienvarsivarastoilla, jolloin joudutaan kuljettamaan vajaita kuormia.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat suuntaa antavia. Todellisuudessa esimerkiksi haketuksen, murskauksen ja silpun kuormauksen ajanmenekit saattavat vaihdella runsaastikin riippuen muun muassa käytettävästä koneesta, työntekijästä ja maasto-olosuhteista. Tutkimustulosten vastaaminen paremmin todellisuutta olisi vaati-

nut laajempaa aineiston keruuta koneiden tuntituottavuuksista ja hakerekan käyttötuntikustannuksista.

Alun perin tutkimukseeni sisältyi myös oljen kuljetuskustannusten selvittäminen. Päädyin kuitenkin rajaamaan kyseisen biomassan pois työstäni, koska se on kuljetusominaisuuksiltaan melko lailla samankaltainen kuin ruokohelpi. Suurin ongelma työprosessissa oli löytää käyttökelpoisin menetelmä selvittää kuljetuskustannukset eri biomassoille. Lopulta parhaimmaksi menetelmäksi osoittautui konekustannuslaskentaan perustuva menetelmä, jonka kautta saadut tulokset olivat keskenään vertailukelpoisimmat. Opinnäytetyön aikana tietoni ja osaamiseni bioenergiasta lisääntyivät huomattavasti. Myös tiedonhankintataitoni kehittyivät työn edetessä. Työni antaa hyvät pohjatiedot jatkotutkimuksille biomassojen yhteiskuljetusten kustannuksista. Olisi mielenkiintoista selvittää esimerkiksi yhteiskuorman erilaisten seossuhteiden ja tienvarsivarastojen etäisyyden vaikutusta kuljetuskustannuksiin.

LÄHTEET

- Ahtila, O. 2010. Biomassan energia-arvon nostaminen sekundäärilämmöllä kivaamalla. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Helsingin yliopisto. Maataloustieteiden laitos. Pro gradu –tutkielma. [Viitattu 9.1.2014]. Saatavana: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/26479/Ahtila.pdf?sequence=1>
- Aikio, J-M. 2013. Luston lämpökeskuksen muuttaminen kiinteälle polttoaineelle. [Verkkojulkaisu]. Rovaniemen ammattikorkeakoulu. Tekniikka ja liikenne. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 10.1.2014]. Saatavana: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54562/Aikio_Juha-Matti.pdf?sequence=1
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. [Verkkojulkaisu]. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. [Viitattu 8.1.2014]. Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
- Asikainen, A. & Nuuja, J. 1999. Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. [Verkkojulkaisu]. Metsätieteen aikakauskirja (3), 479 - 490. [Viitattu 14.11.2013]. Saatavana: <http://www.metla.eu/aikakauskirja/full/ff99/ff993479.pdf>
- Autoliikenteen Työnantajaliitto ry:n ja Auto- ja Kuljetusalan Työntekijäliitto AKT ry:n välinen kuorma-autoalan työehtosopimus 1.2.2012 – 31.1.2014. 1.2.2012. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Auto- ja Kuljetusalan Työntekijäliitto AKT ry. [Viitattu 24.1.] Saatavana: http://www.akt.fi/easydata/customers/akt/files/1_Tessit_ja_palkkatau/tes_2012/kuorma-autoalan_tes_2012-2013_id_7229.pdf
- Biomassan tuotanto ja polttoaineen käyttö ratkaisevassa roolissa bioenergian ilmastohyötyjä arvioitaessa. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. [Viitattu 19.3.2014]. Saatavana: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/c14a79cd-d384-41f4-a422-32338ecb35ca/bioenergia.html>
- Biopolttoaineiden lämpöarvoja. Päivitetty 12.4.2013. [Verkkosivu]. Helsinki: Motiva Oy. [Viitattu 9.1.2014]. Saatavana: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/biopolttoaineiden_lampoarvoja
- Energian kokonaiskulutus laski 2 prosenttia vuonna 2012. 22.3.2013. [Verkkosivu]. Helsinki: Tilastokeskus. [Viitattu 19.3.2014]. Saatavana: http://www.stat.fi/til/ehk/2012/04/ehk_2012_04_2013-03-22_tie_001_fi.html
- Erkkilä, P. 2013. Energiapuun kuljetuskustannusten ja kuljetuskaluston vertailu – case PUULOG. [Verkkojulkaisu]. Kemi: Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu.

- Kaupan ja kulttuurin toimialan opinnäytetyö. Liiketalouden koulutusohjelma. Tradenomi. [Viitattu 13.1.2013]. Saatavana: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/68194/Erkkila_Pekka.pdf?sequence=1
- Eteläaho, E. 2013. Erilaatuisten hakkeiden käyttökohdevaatimuksista ja tuotantokustannuksista. [Verkkojulkaisu]. Joensuu: Karelia-ammattikorkeakoulu. Biotalouden keskus. Hajautetut biojalostamot –hanke. Raportti. [Viitattu 12.12.2013]. Saatavana: http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.forestenergy.org%2Fopenfile%2F466%3FPHPSES-SID%3D8aab978444cdea7baf49ce1677a49248&ei=sqlxU4rrDYTI4ASv8YCoDA&usq=AFQjCNEQ_X19z9EOs42JRc2Dh0yIT5u7xw&bvm=bv.63587204,d.bGE
- Föhr, J. 2008. Metsähakkeen jalostusarvon nostaminen eri kuivausmenetelmillä. [Verkkojulkaisu]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan osasto. Diplomityö. [Viitattu 20.10.2013]. Saatavana: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/37417/nbnfi-fe200804171245.pdf?sequence=3>
- Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999 – 2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia. [Verkkojulkaisu]. Helsinki: Tekes. [Viitattu 9.10.2013]. http://www.tekes.fi/julkaisut/puuenergian_teknologiaohjelma.pdf
- Hakonen, T. 2013. Bioenergiaterminaalin hankintaketjujen tuottavuus eri kuljetus- etäisyyksillä ja volyyymeilla. [Verkkojulkaisu]. Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja A. Tutkimuksia 14. [Viitattu 12.3.2014]. Saatavana: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/54955/A14_netti.pdf?sequence=2
- Hakonen, T. & Laurila, J. 2011. Metsähakkeen kosteuden vaikutus polton ja kaukokuljetuksen kannattavuuteen. [Verkkojulkaisu]. Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja. B. Raportteja ja selvityksiä 55. [Viitattu 8.1.2014]. Saatavana: <http://theseus17-kk.lib.helsinki.fi/bitstream/handle/10024/34746/B55.pdf?sequence=1>
- Heikkilä, M. 31.5.2010. Ruokohelven toimitus- ja vastaanottotapaselvitys Toppilan voimalaitokselle. [Verkkojulkaisu]. Oulu: Planora Oy. [Viitattu 15.8.2013]. Saatavana: http://www.oulunkaari.com/tiedostot/Uusiutuvaenergia/raportit/Ruokohelpiselvitys_1.7.2010.pdf
- Hämäläinen, H. 2012. Energiapuun varastointi. Energiapuun varastointiohje. [Verkkojulkaisu]. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 12.2.2014]. Saatavana:

<http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40083/Energiapuun%20varastointi.pdf?sequence=1>

Jahkonen, M., Lindblad, J., Sirkiä, S & Laurén, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. [Verkkójulkaisu]. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos. [Viitattu 8.1.2014].

Saatavana:

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp241.pdf>

Kansallinen ilmastopolitiikka. 10.5.2013. [Verkkosivu]. Helsinki: Ympäristöministeriö. [Viitattu 19.3.2014].

Saatavana:

http://www.ymparisto.fi/FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansallinen_ilmastopolitiikka

Knuutila, K. (toim.) 2003. Puuenergia. Jyväskylä: Jyväskylän Teknologikeskus Oy. BENET Bioenergiaverkosto.

Kärhä, K. 2008. [Verkkójulkaisu]. Metsähakkeen tuotantoprosessikuvaukset. Vantaa: Metsäteho Oy. [Viitattu 29.6.2013].

Saatavana:

http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2008_03_Metsahakkeen_tuotantoprosessi_kk.pdf

Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011. Crambo 5000 kantojen tienvarsimurskauksessa. [Verkkójulkaisu]. Vantaa: Metsäteho Oy. [Viitattu 12.3.2014].

Saatavana:

http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_04_Crambo_5000_kantojen_tienvarsimurskauksessa.pdf

Kärkkäinen, E-T. 9.12.2010. Hakkuutähteiden korjuun ympäristövaikutukset sekä hakkuutähteiden korjuun vaikutus metsänuudistamisen kokonaiskustannuksiin.

[Verkkójulkaisu]. Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto. Bio- ympäristötieteiden laitos. Pro gradu -työ. [Viitattu 29.6.2013].

Saatavana:

<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/25756/URN:NBN:fi:jyu-201012303223.pdf?sequence=1>

Kärkkäinen, M. 11.5.2013. Metsähakkeen markkinahinnan kehitys ja hintaan vaikuttavat tekijät. [Verkkójulkaisu]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Energiatekniikan koulutusohjelma. Kandidaatin työ. [Viitattu 8.1.2014].

Saatavana:

<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/91500/Mets%C3%A4hakkeen%20markkinahinnan%20kehitys%20ja%20hintaan%20vaikuttavat%20tekij%C3%A4t.pdf?sequence=2>

Laine, H. 2012. Kantojen esimurskauksen hyödyt ja kannattavuus. [Verkkójulkaisu]. Joensuu: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 20.11.2013].

Saatavana:

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/39012/Laine_Hanna.pdf?sequence=1

- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. [Verkkajulkaisu]. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. [Viitattu 11.1.2014]. Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/T2564.pdf>
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuotavuus. [Verkkolehtiartikkeli]. Metsätieteen aikakauskirja (2), 107 – 126. [Viitattu 10.11.2013]. Saatavana: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff11/ff112107.pdf>
- Lauhanen, R. & Laurila, J. 2007. Bioenergian tuotannon haasteet ja tutkimustarpeet. [Verkkajulkaisu]. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos. [Viitattu 10.1.2014]. Saatavana: <http://www.metsantutkimuslaitos.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp042.pdf>
- Laurila, J. 2013. Energiapuuta päätehakkuulta –opas. [Verkkajulkaisu]. Seinäjoki: Suomen metsäkeskus. [Viitattu 15.1.2014]. Saatavana: <http://www.metsakeskus.fi/documents/10156/28763/Energiapuuta-p%C3%A4%C3%A4tehakuulta-opas-web.pdf/c3e4b182-1501-446b-a630-d2f019a58a23>
- Lähdevaara, H., Paananen, M., Savolainen, V. & Vanhala, A. 2010. Mailta ja manuilta, soilta ja saloilta. Selvitys Keski-Suomen biomassakuljetusten logistiikasta. [Verkkajulkaisu]. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Teknologian yksikkö. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 107. [Viitattu 20.1.2014]. Saatavana: http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCsQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.theseus.fi%2Fbitstream%2Fhandle%2F10024%2F15785%2FJAMKJULKAISUJA1072010_web.pdf%3Fsequence%3D1&ei=KOXeUuHWfTP74QTP2ICwBw&usq=AFQjCNEIPGyfPggLhIjBInUsbXb-LBcVZA&bvm=bv.59568121,d.bGE
- Lötjönen, T. & Knuuttila, K. 2009. Pelloilta energiaa. Opas ruokohelven käyttäjälle. [Verkkajulkaisu]. Jyväskylä: Jyväskylä Innovation Oy. [Viitattu 20.8.2013]. Saatavana: http://www.bioenergiatieto.fi/default/?_E_VIA_WYSIWYG_FILE=7250&name=file
- Muje, R. 2012. Rangan ja murskeen terminaalikuivatus. [Verkkajulkaisu]. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Luonnonvara- ja ympäristöala. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 28.6.2013]. Saatavana: http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/44461/Muje_Risto.pdf?sequence=1
- Paappanen, T., Lindh, T., Kärki, J., Impola, R., Rinne, S., Lötjönen, T., Kirkkari, A-M., Taipale, R. & Leino, T. 2008. Ruokohelven polttoaineketjun kehittäminen liiketoimintamahdollisuuksien parantamiseksi. [Verkkajulkaisu]. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. [Viitattu 12.1.2014]. Saatavana: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2452.pdf>

- Pajuja, H. 14.6.2011. [Verkkajulkaisu]. Mitä metsäenergian lisäystavoitteet tarkoittavat käytännössä? Vantaa: Metsäteho Oy. [Viitattu 30.6.2013]. Saatavana: <http://www.isbeo2020.fi/dman/Document.phx?documentId=mi17811140349113&cmd=download>
- Polttoaine.net. Päivitetty 24.1.2014. [Verkkosivu]. Vantaa: Webmoon Oy. [Viitattu 24.1.2014]. Saatavana: <http://www.polttoaine.net/index.php?cmd=kaikki&sort=pvm>
- Puu polttoaineena. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. li: Bioenergiapörssi. [Viitattu 9.1.2014]. Saatavana: <http://www.bioenergiaporssi.fi/k%C3%A4sitteet-ja-laskurit/puu-polttoaineena>
- Ruokohelpi. Päivitetty 20.4.2011. [Verkkosivu]. Helsinki: Motiva Oy. [Viitattu 17.7.2013]. Saatavana: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/peltoenergia/ruokohelpi
- Ruokolainen, M. 2012. Metsä- ja peltoenergian tuotantoprosessien työterveys- ja työturvallisuusriskien arviointi. [Verkkajulkaisu]. Kuopio: Itä-Suomen yliopisto. Ympäristötieteen laitos. Pro gradu-työ. [Viitattu 17.7.2013]. Saatavana: http://epublications.uef.fi/pub/urn_nbn_fi_uef-20120904/urn_nbn_fi_uef-20120904.pdf
- Sironen, S. 2008. Ruokohelpi maatilan ja lämpöyrittäjän polttoaineena. [Verkkajulkaisu]. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Luonnonvarainstituutti. Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 22.8.2013]. Saatavana: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/19152/jamk_1207897304_1.pdf?sequence=2
- Sternberger, E. 2013. Kantojen hankinta Kymenlaakson alueella. [Verkkajulkaisu]. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 14.1.2014]. Saatavana: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/67525/Kantojen%20hankinta%20Kymenlaakson%20alueella.pdf?sequence=1>
- Suomalainen, S. 2006. Bioenergiaa pellostasta: ruokohelpin mahdollisuudet energian tuotannossa. [Verkkajulkaisu]. Helsinki: Helsingin yliopisto. Taloustieteen laitos. Pro gradu-työ. [Viitattu 19.4.2013]. Saatavana: http://www.helsinki.fi/taloustiede/tutkimus/ye/Suomalainen_gradu.pdf
- Suopajarvi, H. 2013. Biomaterian prosessointitavat: esikäsittelyt, termokemiallinen konversio ja käyttö masuunissa. [Verkkajulkaisu]. Oulu: Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto. Prosessimetallurgian laboratorio. [Viitattu 8.8.2013]. Saatavana: http://cc oulu.fi/~kamahei/z/research/2013_06_11/WP3-biomaterian%20prosessointitavat_netti.pdf

- Tapaninen, J-M. 2011. Biotermiinaali hakkeen tuotantoketjussa. [Verkkajulkaisu]. Joensuu: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 22.1.2014]. Saatavana: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29753/Tapaninen%20Juha-Matti.pdf.pdf?sequence=1>
- Ylitalo, E. 18.4.2013. Puun energiakäyttö 2012. [Verkkajulkaisu]. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos. Metsätilastotiedote. [Viitattu 14.1.2014]. Saatavana: <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/mtt/2013/puupolttoaine2012.pdf>
- Yrjölä, H. 2009. Ruokohelven varastointi energiakäyttöön. [Verkkajulkaisu]. Helsinki: Helsingin yliopisto. Agroteknologian laitos. Pro gradu –tutkielma. [Viitattu 16.1.2014]. Saatavana: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/1975/8528/Gradu%20Heikki%20Yrj%C3%B6l%C3%A4.pdf?sequence=3>

