



Kalle Karttunen, Eero Jäppinen,
Kari Väättäin & Tapio Ranta

METSÄPOLTTOAINEIDEN VESITIEKULJETUS PROOMUKALUSTOLLA



LAPPEENRANNAN
TEKNILLINEN YLIOPISTO

LAPPEENRANTA
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN OSASTO

FACULTY OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY

TUTKIMUSRAPORTTI
RESEARCH REPORT

EN B-177

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto
Tutkimusraportti ENTE B-177

Kalle Karttunen, Eero Jäppinen, Kari Väättäin & Tapio Ranta

METSÄPOLTTOAINEIDEN VESITIEKULJETUS PROOMUKALUSTOLLA



Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto
Prikaatinkatu 3E
50100 MIKKELI

ISBN 978-952-214-624-3 (paperback)

ISBN 978-952-214-625-0 (PDF)

ISSN 1459-2630

2008

TIIVISTELMÄ

Karttunen, K., Jäppinen, E., Väättäin, K. & Ranta, T. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla.

Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Bioenergiatekniikka, Mikkeli 2008

54 p.

Tutkimusraportti ENTE B-177

ISBN 978-952-214-624-3 (paperback)

ISBN 978-952-214-625-0 (PDF)

ISSN 1459-2630

Metsäpolttoaineiden käyttö kasvaa lämpö- ja voimalaitoksissa ja mahdollisissa biojalostamoissa. Metsäpolttoaineilla voidaan saavuttaa päästövähennyksiä korvaamalla päästöintenssiivisempiä polttoaineita. Metsäpolttoaineen kysynnän kasvu suurkäyttöpaikoilla luo uusia vaatimuksia metsäbiomassan hankintaan. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämiä logistiikkajärjestelmiä kehittämällä toimitusvarmuutta pystytään parantamaan ja hankintaa laajentamaan kustannustehokkaasti ja ympäristöystävällisesti.

Kuljetuskokeilut antoivat uutta tietoa vesitiekuljetuksen sisältämästä hankinnasta. Lastikapasiteetti nykyisen kaltaisessa Eurooppa Iia -suurproomussa vaihtelee 1200 tonnista jopa 1800 tonniin (kosteus 40 %) riippuen tiivistymisestä ja proomun modifiointiasteesta. Metsähakkeen energiatiheys oli suurproomukuljetuksissa keskimäärin 1 MWh/i-m^3 , joka oli 25 % parempi kuin vertailun hakerekkakuljetuksissa. Vesitiekuljetuksen kustannukset olivat kuljetuskokeiluissa lastauksineen ja purkuineen $0,02 \text{ €/MWh/km}$, ollen noin 20 % ketjun kokonaiskustannuksista. Simuloinnin edullisimpien vesitiekuljetusvaihtoehtojen vaihteluvälin kustannukset olivat vastaavasti $0,013 - 0,026 \text{ €/MWh/km}$. Lastauksen ja purun kustannus oli $0,4 - 0,6 \text{ €/MWh}$ ja vesitiekuljetus $0,9 - 2,0 \text{ €/MWh}$ (100 km). Ketjun kokonaiskustannukset hakkuutähdehakkeelle vaihtelivat simuloinnin edullisimpien vaihtoehtojen perusteella välillä $10,8 - 12,1 \text{ €/MWh}$ (30 km rekka, 100 km proomu).

Kuljetusketjujen simuloinnin kustannukset osoittivat proomukuljetusketjun olevan kilpailukykyinen vaihtoehto hakerekkakuljetusketjulle kalustosta ja vuosittaisista käyttötunneista riippuen kuljetusetäisyyden ylittäessä 100 km. Kustannustehokkain ratkaisu vesitiekuljetuksessa saavutettiin pienen aluksen ja suuren kokoluokan proomuyksikön kytkeydellä. Haketus kannattaa toteuttaa ennen proomukuljetuksen osuutta metsähakkeen paremman tiiviyden ja käsiteltävyyden perusteella. Logistiikkajärjestelmiä pitää kehittää tapauskohtaisesti käyttöpaikan tarpeet ja olosuhteet huomioon ottaen.

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämän logistiikan liiketoimintamallien vertailussa arvioitiin vaihtoehtoiset ulkoistetut toimintamallit paremmaksi kuin nykyinen urakointimalli. Tämä mahdollistaa paremman metsähakkeen saatavuuden ja logistiikan tehokkuuden lastaustermiinaaleissa. Terminaalitoiminnot ja proomukuljetukset lisäävät uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja mahdollistavat metsäpolttoaineiden suurimittakaavaisen hankinnan.

Asiasanat: Metsähake, logistiikka, vesitiekuljetus, proomu

ABSTRACT

Karttunen, K., Jäppinen, E., Väättäinen, K. & Ranta, T. Inland waterway transport of forest fuels.

Lappeenranta University of Technology, Department of Energy and Environment Technology, Bioenergy technology, Mikkeli 2008

54 p.

Research Report ENTE B-177

ISBN 978-952-214-624-3 (paperback)

ISBN 978-952-214-625-0 (PDF)

ISSN 1459-2630

The use of forest fuels is increasing in the heat and power plants and possible biorefineries. Emission reductions can be gained by substituting forest fuels for fossil fuels. The increased demand of forest fuels in the large-scale power plants creates new requirements to the supply of forest biomass. The procurement area of forest fuels can be enlarged and the supply secure can be improved cost-efficiently and environment friendly by developing the logistical system of waterway transport and terminal activities.

Demonstrations gave new information about waterway transport of forest fuels. The load capacity of Europa IIa -barge varied from 1200 tons to even 1800 tons (moist. 40 %) depending on the compaction and modification level. Energy density was approx. 1 MWh/frame-m³ in the large-sized barge and it was 25 % higher compared to chip trucks. The cost of waterway transport (inc. loading and unloading) was 0.02 €/MWh/km to be about 20 % of total cost according to demonstration. The most cost-efficient simulated waterway costs varied between 0.013 – 0.026 €/MWh/km (inc. loading and unloading). Costs of loading and unloading varied between 0.4 – 0.6 €/MWh (belt conveyor) and long-distance waterway transport varied between 0.9 – 2.0 €/MWh (100 km). Total logistical costs of forest chips (logging residues) according to simulation varied between 10.8 – 12.1 €/MWh (30 km truck and 100 km waterway transport).

The results of supply chain simulation established that the logistics of waterway transport can be more competitive than traditional truck transport of forest chips after 100 km distance. The most cost-efficiently solution of waterway transport was reached when combining small tug-boat with large-size barge unit. Chipping is worth to do before barge transport because of better density and handling of forest chips. Logistical system must be developed case-specifically and took the needs of customer and other circumstances into consideration.

The alternatives business models based on customer-deliver models was estimated to be more suitable to the supply chain includes long-distance waterway transport compared to models used nowadays. New business models may provide better availability of forest fuels and effectiveness of logistics at the satellite terminals. The terminal activities and barge transports create new business opportunities and make the large-scale procurement of forest fuels possible.

Keywords: Forest fuel, logistics, waterway transport, barge

ALKUSANAT

Tämä julkaisu on ”Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla” –hankkeen loppuraportti, jossa tarkastellaan metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuuksia ja arvioidaan niiden käyttökelpoisuutta osana suurimittakaavaista hankintaa. Vuoksen vesistöalue tarjoaa laajat mahdollisuudet Itä-Suomen kaupungeille ja teollisuudelle käyttää vesistöä hyödyksi metsäpolttoaineen hankinnassa. Vesiteiden potentiaali metsäpolttoaineiden kuljetuksissa liittyy hankinta-alueiden laajentamiseen kustannustehokkaasti ja ympäristöystävällisesti. Vesitiekuljetukset mahdollistavat hankinta-alueen laajentamisen sellaisille katvealueille, joista ei vielä ole suurimittakaavaista energiapuun hankintaa ja toisaalta mahdollistavat lastaus- ja purkupaikkojen hyödyntämisen metsäpolttoaineiden jalostuksen terminaaleina ja puskurivarastoina.

Tutkimushanke toteutettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston bioenergiatekniikan tutkimusyksikössä. Tutkimustyön vastuullisena johtajana toimi prof. Tapio Ranta ja projektipäällikkönä Kalle Karttunen. Hankkeen johtoryhmän puheenjohtajana toimi Antti Korpilahti (Metsäteho Oy). Tutkimushankkeen osatehtävien suorittamiseen on osallistunut bioenergiatekniikan tutkimusyksiköstä Eero Jäppinen, Essi Hämäläinen ja Olli-Jussi Korpinen. Projektityöntekijä Kai Andersin osallistui alus- ja proomumallien esisuunnitteluun. Kuljetusketjujen kustannusten simulointi toteutettiin yhteistyössä Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun yksikön Kari Väätäisen ja Antti Asikaisen kanssa. Lappeenrannan teknillisen yliopiston energia- ja ympäristötekniikan osaston Risto Soukka ja Hanna Alve osallistuivat päästölaskentamallin rakentamiseen. Lisäksi Darius Ghazanfari, John Forsell, Kaj Casen, Vesa Niinilampi, ja Otto Kankkunen tekivät harjoittelu- ja opinäytetöitä hankkeen aikana.

Tutkimusta rahoitti Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus Tekesin Climbus-ohjelma (Ilmastonmuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet) sekä alalla toimivat yritykset (Mopro Oy, Saarisavotta Oy, Perkaus Oy, Metsäteho Oy, Etelä-Savon Energia Oy, Stora Enso Oyj) sekä yhteisöt (Järvi-Suomen Uittoyhdistys, Suur-Savon energiasäätiö). Järvi-Suomen väyläyksikkö osallistui hankkeeseen asiantuntijaroolissa. Erityiskiitoksena voidaan mainita Stora Enso:n metsäosaston panos kuljetuskokeilujen yhteydessä sekä Itä-Savon metsänhoitoyhdistyksen osallistuminen energiapuun saarikorjuun kehittämiseen.

Tutkimustyön toteuttajat kiittävät projektin rahoittajia työn mahdollistamisesta, projektin johtoryhmää aktiivisesta osallistumisesta projektin ohjaukseen ja mukana olevia yrityksiä kiinnostuksesta ja yhteistyöstä tutkimus- ja kehitystyöhön.

Mikkeli syyskuu 2008

Kalle Karttunen

Projektin kesto	1.6.2006 - 30.4.2008
Projektin rahoitus	195 500 € josta Tekesin osuus 155 000 €
Hankkeeseen osallistuvat tutkimuslaitokset	Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Metsäntutkimuslaitos
Osallistuvat yritykset ja organisaatiot	Saarisavotta Oy, Perkaus Oy, Mopro Oy, Suur-Savon Sähkö Oy (Suur-Savon Energiasäätiö), Metsäteho Oy, Stora Enso Oyj., Etelä-Savon Energia Oy, Järvi-Suomen väyläyksikkö ja Järvi-Suomen Uittoyhdistys

KÄYTETYT LYHENTEET

Merkinnät

m^3 kuutiometri (= kiinto- m^3 , ellei toisin mainita)
 $i-m^3$ irtokuutiometri, tilavuuskuutio (= kehys- m^3 , ellei toisin mainita)

1 m^3 metsähaketta ~ 2,5 $i-m^3$ (tiiviys ~ 40 %)
1 m^3 metsähaketta ~ 1,9 MWh (kosteus ~ 40 %)

m^3km kuutiokilometri (kuljetussuorite)
toe ekvivalenttinen öljytonni
1 kN solmu, 1 852 m/h

E_0 tehoaika, johon ei sisälly keskeytyksiä
 E_{15} käyttöaika, johon sisältyy alle 15 min keskeytykset

Yksiköt

€ Euro
c sentti
h tunti
J Joule
kg kilogramma
m metri
 m^2 neliömetri
 m^3 kuutiometri
km kilometri
min minuutti
s sekunti
tn tonni
a vuosi
W Watti
% prosentti, 1/100
°C Celsiusaste
CO₂ Hiilidioksidi
Kpl Kappale

Yksiköiden kertoimet

k kilo = 10^3
M mega = 10^6
G giga = 10^9
T tera = 10^{12}

Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja, tiheyksiä ja muuntokertoimia: liite I

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	3
1.1	Tutkimushankkeen tausta	3
1.2	Tavoitteet.....	4
2	TOTEUTUS	5
2.1	Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet	5
2.1.1	Kuljetuskokeilut	5
2.1.2	Alus- ja proomukaluston ominaisuudet.....	6
2.2	Logistiikkajärjestelmä	10
2.2.1	Metsäpolttoaineiden proomukuljetuslogistiikka	10
2.2.2	Lastaus ja purku	13
2.2.3	Vesitiekuljetuksen simulointi.....	16
2.2.4	Liiketoimintamallien analysointi	18
2.2.5	Logistiikkapäästöjen elinkaarilaskenta.....	21
2.3	Kuljetusvirrat	25
2.3.1	Metsäpolttoaineiden kysyntä	25
2.3.2	Metsäpolttoaineiden tarjonta.....	27
2.3.3	Saatavuustarkastelu	29
3	TULOKSET	31
3.1	Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet	31
3.1.1	Suurproomuketju.....	31
3.1.2	Saarikorjuuketju	36
3.1.3	Hypoteettinen alus- ja proomukalusto.....	36
3.2	Logistiikkajärjestelmä	38
3.2.1	Kuljetuskokeilujen kustannukset	38
3.2.2	Kuljetusketjujen simuloinnin tulokset.....	40
3.2.3	Herkkyystarkastelu polttoaineen hintamuutokselle	43
3.2.4	Liiketoimintamahdollisuudet	43
3.2.5	Logistiikan päästövertailu.....	44
3.3	Kuljetusvirrat	46
3.3.1	Metsäpolttoaineiden kysyntä- ja kuljetusmäärät.....	46
3.3.2	Metsäpolttoaineiden saatavuus	46
4	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	48
4.1	Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet	48
4.2	Logistiikkajärjestelmä	48
4.2.1	Kustannukset.....	48
4.2.2	Liiketoiminta	49
4.2.3	Päästöt.....	50
4.3	Kuljetusvirrat	50
	LÄHDELUETTELO	52

LIITTEET

- Liite I Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja, tiheyksiä ja muuntokertoimia
Liite II Hakkuutähteiden ja kantojen teknistaloudellinen saatavuus valituille lastauspaikoille
Liite III Hankkeessa toteutetut julkaisut ja raportit

1 JOHDANTO

Metsäpolttoaineiden kysyntä kasvaa päästökaupan ja vaihtoehtoisten polttoaineiden hintatason kohoamisen sekä hankintalogistiikan kehittymisen seurauksena. Metsäpolttoaineiden käytön kasvattaminen on Suomelle tärkeä keino vastata ilmastonmuutoksen hillintään ja saada aikaan päästövähennyksiä. Suurimpia päästövähennyksiä saadaan, kun suurimittakaavaisissa lämpöä ja sähköä tuottavissa voimalaitoksissa korvataan fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla luonnonvaroilta. Päästövähennyksiä on mahdollista saavuttaa myös logistiikassa korvaamalla kaukaa kuljetettavia polttoaineita lähempänä polttolaitosta sijaitseviin polttoaineisiin tai korvaamalla saastuttavia kuljetusmuotoja ja -ketjuja. Päästötarkastelussa pitääkin kiinnittää huomiota koko toimitusketjun kokonaispäästöihin. Metsäpolttoaineen käytön lisääminen voi mahdollistaa päästövähennysten aikaansaamisen kaikissa ketjun osavaiheissa.

Metsähakkeen käyttöä on tavoitteena nostaa Suomessa vähintään 8 miljoonaan kuutiometriin vuodessa vuoteen 2015 mennessä (MMM 2006). Suurin käyttömäärien lisäysmahdollisuus on teollisuuden ja kaukolämmön sähköä ja lämpöä tuottavissa voimalaitoksissa (CHP-laitokset) (Asplund ym. 2005). Myös liikenteen biopolttoaineiden tuotantolaitokset saattavat yleistyä ja kasvattaa merkittävästi metsähakkeen käyttömääriä tulevaisuudessa. Metsähakkeen toimitusketjun on oltava kilpailukykyinen vaihtoehtoisten polttoaineiden hankintaan nähden. Metsähakkeen hankinta-alueiden laajentaminen ja monipuolistaminen vaatii uudenlaisia logistisia ratkaisuja. Vesitiekuljetusketju voisi osaltaan ratkaista logistisia ongelmia vesiteiden varrella sijaitseville voimalaitoksille. Lastaus ja purkutermiinaalit välivarastopaikkoina saattavat myös parantaa metsäpolttoaineen toimitusvarmuutta ja laatua voimalaitoksen näkökulmasta.

1.1 Tutkimushankkeen tausta

Lämpö- ja voimalaitosten metsäpolttoaineiden käyttömäärien kasvaessa ja raaka-aineen kysynnän lisääntyessä on tapauskohtaisesti tarvetta laajentaa hankinta-alueita. Rekkakuljetuksiin perustuvassa hankintaketjussa kuljetuskustannusten osuus metsähakkeen hinnasta kasvaa huomattavasti kuljetusmatkan kasvaessa ja tienvarsihaketuksen perustuvan toimitusketjun tehokkuus kärsii. Pelkästään rekkakuljetuksien avulla ei voida enää juurikaan laajentaa taloudellista hankinta-aluetta.

Metsäpolttoaineiden käytön lisäys kasvattaa samassa suhteessa kuljetusmääriä. Tästä aiheutuu huomattavaa liikennemäärien kasvua lisäten onnettomuusriskejä ja teiden kulumista. Pelkästään rekkakuljetusten varaan ei metsäpolttoaineiden kuljetuksia tulisikaan rakentaa, vaan harkintaan tulisi ottaa muut kuljetusmuodot. Rautatie- ja vesitiekuljetukset ovat ympäristöystävällisempiä ja energiataloudellisesti edullisempia kuin rekkakuljetukset. EU:n valkoisessa kirjassa listataan sisävesiliikenteen kehittäminen yhdeksi maantie- ja rautatieverkon ruuhkautumisen ja ilmakehän saastumisen torjunnan avaintekijäksi (Eurooppalainen liikennepolitiikka... 2001).

Suomessa vesitiekuljetusta on käytetty etenkin raakapuun kuljetuksiin pitkillä matkoilla. Vuonna 2006 raakapuun vesitiekuljetuksen keskimääräinen kuljetusmatka oli n. 300 km ja kuljetettu puumäärä n. 1,5 miljoonaa kuutiota, josta aluskuljetuksen osuus oli 30 % (Kariniemi 2007). Varsinkin Vuoksen vesistön alueella vesitiekuljetus on varteenotettava vaihtoehto myös metsäpolttoaineiden hankinnan logistisessa ketjussa.

Arvoltaan alhaisen metsäpolttoaineen vesitiekuljetuksiin ei kannata käyttää kalliita erikoisaluksia, vaan kuljetus kannattaa tehdä mahdollisimman edullista kalustoa käyttäen. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksissa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää puunkorjuussa käytettäviä proomuja. Proomuysiköitä käytetään raakapuun pitkän matkan kuljetuksissa sekä saari- ja rantaleimikoi-

den korjuun ja kuljetuksen yhteydessä. Työntökytkeyte muodostuu työntäjä aluksesta ja proomu-yksiköiden kokonaisuudessa. Kustannustehokkuus proomulogiikassa perustuu kalliin ja miehi-tetyn koneyksikön ja proomu-yksiköiden erilliskäyttöön ja proomujen lisäämismahdollisuuteen kytkeydessä. Kallis alus voi olla jatkuvasti liikenteessä, kun taas halvempia proomu-yksiköitä voi-daan seisottaa lastaus- ja purkupaikoilla niillä vallitsevan työ- ja varastotilanteen mukaisesti.

Hyödyntämällä työntöproomuja myös metsäpolttoaineiden kuljetukseen, voitaisiin alusten käyt-tömääriä kasvattaa ja mahdollisesti pienentää kuljetusten yksikkökustannuksia. Käyttämällä kul-jetuksissa mahdollisimman edullista kalustoa sekä tehostamalla lastaus- ja purkutyövaiheita olisi mahdollista saada myös metsäpolttoaineen vesitiekuljetusketjun kustannukset kilpailukykyisim-miksi verrattuna rekkakuljetuksiin.

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusketjun kustannusten minimoimiseksi olisi ketjun välivaiheita pyrittävä tehostamaan. Tiheä lastauspaikkaverkosto mahdollistaa lyhyemmän kuljetusetäisyyden lastauspaikkojen ympäriltä. Suurilla aluksilla liikennöinti ei ole juurikaan mahdollista pääväylien ulkopuolella. Tämän vuoksi tulevat kyseeseen myös alukset, joilla on mahdollista liikennöidä myös pääväylien ulkopuolella (syväys alle 2,4 metriä).

Metsäpolttoaineiden kasvava käyttö tarjoaa useita liiketoimintamahdollisuuksia hankinta- ja toi-mitusketjun eri vaiheissa. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusketju tarvitsee toimiakseen yrittäjiä, jotka vastaavat metsäpolttoaineen korjuusta metsistä, kuljetuksesta lastauspaikoille, metsäpoltto-aineen jalostuksesta hakkeeksi, vesitiekuljetuksesta ja mahdollisesta vesitien jälkeisestä kuljetuk-sesta voimalaitoksille. Talviaikaan painottuva käyttö aiheuttaa tarvetta varastoida polttoainetta suurimman kulutuksen varalle. Terminaalitoimintoihin tarvitaan terminaaliyrittäjiä, jotka vastaa-vat metsäpolttoaineen varastoinnista ja jalostamisesta. Ennen toiminnan aloittamista vaihtoehtoi-set toimintamallit ja liiketoimintamahdollisuudet on kartoitettava ja eri toimitusmallien ongel-makohteet selvitettävä. Näiden tietojen selvittäminen auttaa alalla toimivien ja alalle pyrkivien yritysten toiminnansuunnittelua ja kehittämistä.

1.2 Tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella proomukuljetusten sisältämän logistiikan mahdollisuuksia osana metsäpolttoaineiden suurimittakaavaista hankintaa. Tavoitteena oli tutkia ja selvittää:

- Hankintaketjujen kustannukset
- Uusia liiketoimintamahdollisuuksia vesitiekuljetuksen sisältämälle hankinnalle
- Päästöjen synty eri kuljetusvaihtoehdoilla
- Metsäpolttoaineiden kuljetusvirtojen analysointi

Tutkimuskysymys: Voidaanko proomukuljetuksen sisältämällä hankinnalla laajentaa hankinta- aluetta ja parantaa toimitusvarmuutta metsäpolttoaineiden käyttökohteille kustannustehokkaasti ja ympäristöystävällisesti?

Tutkimuksessa rajoituttiin Vuoksen sisävesialueelle Itä-Suomeen, jossa keskityttiin tutkimaan tarkemmin muutamaa valittua alus- ja proomukalustoa. Tutkimuksessa tarkasteltiin metsäpoltto-aineiden vesitiekuljetuksen sisältämän logistiikan kustannuksia, päästöjä ja liiketoimintamalleja sekä vertaillaan niitä muihin järjestelmiin ja kuljetusmuotoihin. Nykyisten ja tulevien metsäpolt-toaineiden kuljetusvirtojen pohjalta tehtiin tarkasteluja eri kuljetusvaihtoehtojen tarpeesta.

2 TOTEUTUS

2.1 Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet tutkimusosiossa selvitettiin olemassa olevien raakapuun aluskuljetuksen kuljetusketjut ja niiden soveltuvuus metsäpolttoaineiden kuljetukseen. Koekuljetuksia järjestettiin eri vesitiekuljetusvaihtoehtoja tarkastellen yhteistyössä alan toimijoiden kanssa. Suurella ruumaproomulla toteutettavat koekuljetukset metsähakkeelle järjestettiin syväväyliä pitkin lähtöterminaalisatamasta purkutermiinaalisatamaan ja käyttöpaikalle. Pienemällä kansilastiproomulla toteutettavissa koekuljetuksissa kuljetettiin saarikohteiden nuoren metsän kunnostuksista saatavaa pienpuuta voimalaitoksen varmuusvarastolle.

Metsäpolttoaineiden kuljetuksiin soveltuvan aluksen ja proomun rakennetta tarkasteltiin rakenneanalyysissä. Metsäpolttoaineiden kuljetukseen soveltuvan kaluston kehittämiseksi luotiin jatkoedellytyksiä esittämällä hypoteettisia alus- ja proomuvaihtoehtoja.

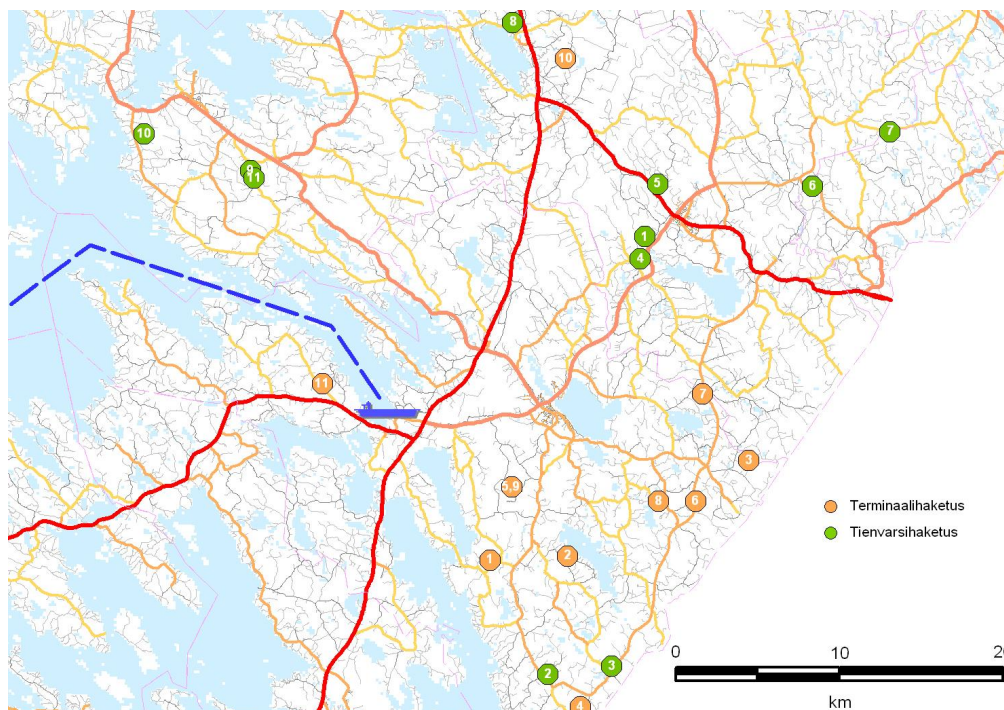
2.1.1 Kuljetuskokeilut

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämiä kuljetuskokeiluja suoritettiin kolmelle eri logistiikkavaihtoehdolle, perustuen tienvarsi-, terminaali- ja käyttöpaikkahakemukseen mobiilihakkurilla. Tienvarsi- ja terminaalihaketus toteutettiin hakkuutähdehakkeelle ja käyttöpaikkahaketus saarista korjatulle pienpuulle. (taulukko 1)

Taulukko 1. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämien kuljetuskokeilujen vaiheet.

	TIENVARSIHAKETUS	TERMINAALIHAKETUS	KÄYTTÖPAIKKAHAKETUS
Materiaali	hakkuutähde	hakkuutähde	pienpuu, kokopuu
Hakkuu	palstalle kasoille	palstalle kasoille	yhdistelmäkone
Palstakuivaus	x	x	
Metsäkuljetus	metsätraktori	metsätraktori	yhdistelmäkone
Tienvarsivarastointi	x	x	x
Tienvarsihaketus	mobiilihakkuri		
Hakerekkakuljetus	x		
Irtorisuautokuljetus		x	
Terminaalihaketus		mobiilihakkuri	
Lastaus	proomun oma kone	materiaalinkäsittelykone	metsätraktori
Tiivistys	Bobcat-tiivistyskokeilu		
Proomukuljetus	Suurproomu, ruumaproomu	Suurproomu, ruumaproomu	Pienproomu, kansilastiproomu
Purku	proomun oma kone	materiaalinkäsittelykone	metsätraktori
Käyttöpaikkahaketus			mobiilihakkuri
Hakerekkakuljetus	x	x	x

Tienvarsi- ja terminaalihaketusjärjestelmän toimivuutta osana vesitiekuljetusketjua testattiin Kiiteen ympäristössä ja lastausterminaalina oli Puhoksen syväsatama. Terminaalihaketusketjussa jouduttiin toteuttamaan ylimääräinen kuljetus terminaalista laiturille, kun tienvarsihaketusketjussa hakerekkajen lastit voitiin ajaa suoraan laiturille. Proomujen täyttämiseen oli varattu kummankin kuljetuksen yhteydessä hakkuutähdemateriaalia yhteensä yhdeltätoista eri hakkuualalta (kuva 1).



Kuva 1. Tienvarsi- ja terminaalihaketuksen kuljetuskokeilujen hakkuutähteen tienvarsi- ja terminaali-varastopisteet. Pohjakartta © Affecto Finland Oy, Lupa L7688/08

Käyttöpaikkahaketusjärjestelmän mukaista logistiikkaa testattiin nuoren metsän kunnostuskohdeiden saarikorjuun yhteydessä Pihlajaveden alueella, josta vesitiekuljetuksen osuus toteutettiin pienpuun kuljetuksena kansilastiproomulla Järvi-Savon Voima Oy:n voimalaitokselle Savonlinnaan. Käyttöpaikkahaketusjärjestelmän mukaisen logistiikan toteuttamisessa haketus tapahtui rantavarastossa mobiilihakkurilla suoraan hakerkkaan, jolla se kuljetettiin voimalaitoksen vastaanottoon.

2.1.2 Alus- ja proomukaluston ominaisuudet

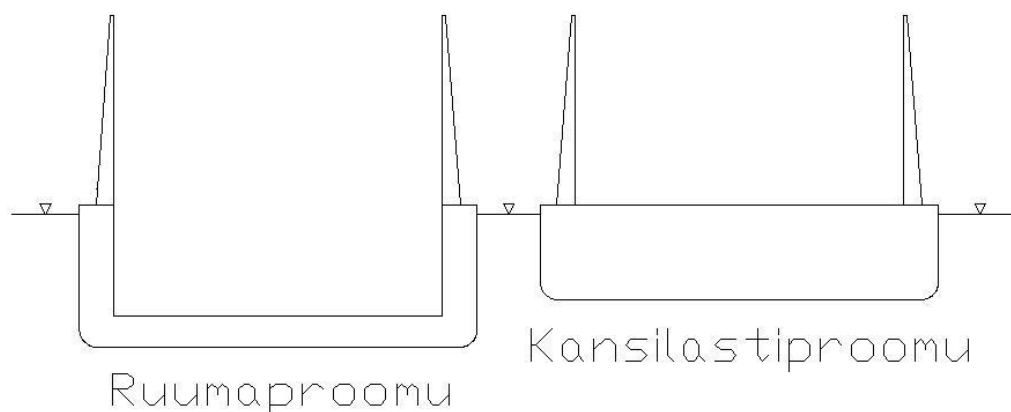
Aluksella tarkoitetaan tutkimuksessa miehitettyä työntäjää/hinaajaa, jolla kuljetetaan erillisiä proomuksikoita. Alus ja proomu muodostavat työntökytkeen. Työntäjää voidaan käyttää myös hinaamiseen ja näin toimitaankin talvella ja olosuhteista riippuen. Työntämällä saavutetaan kuitenkin parempi ohjailtavuus ja energiatehokkuus. Työntäminen edellyttää riittävän korkeaa aluksen ohjaustornia, sillä näkyvyyttä proomun päästä pitää olla vähintään 200 m eteenpäin.

Proomuksi kutsutaan vesikuljetuksiin tarkoitettua kuljetusyksikköä, joka se täyttää seuraavia vaatimuksia:

- Uppouman täyteläisyys on yli 0,8.
- Keskilaivan leikkaus on laatikkomainen, mutta palleyöristys sallitaan.
- Rungossa on hyvin pitkä laatikkomainen suora osuus, jonka pituus on vähintään yli puolet vesiviivapituudesta.
- Pohja on suora, mutta keulassa on viiste, jotta saadaan kulkuvastusta pienennettyä.
- Proomun teräsrakenne on yksinkertainen ja halpa rakentaa. (Lindholm & Lindroos 1981)

Proomuja käytetään maailmalla yleisesti sisävesikuljetuksissa. Proomukuljetuksia käytetään jonkin verran myös merellä, pääsääntöisesti kuitenkin merten rannikkoalueilla. Yleensä proomukuljetusten etuja varsinaisiin kuivalastialuksiin verrattuna on edullinen hinta ja jokikuljetuksissa tärkeä matala syväys sekä matala korkeus. Lisäksi proomuja voidaan käyttää myös väliaikaisina varastoina. (Jäppinen ym. 2006)

Yleisin proomu, joka soveltuu parhaiten metsäpolttoaineelle, on avoin ruuma- eli pohjaproomu. Muita proomutyyppejä ovat kansi- ja säiliöproomu. Ruumaproomuissa voi myös olla lastin suojaamiseksi kansirakenteita, jotka useimmiten ovat kevyitä lasikuitu- tai alumiiniluukkuja. (kuva 2)

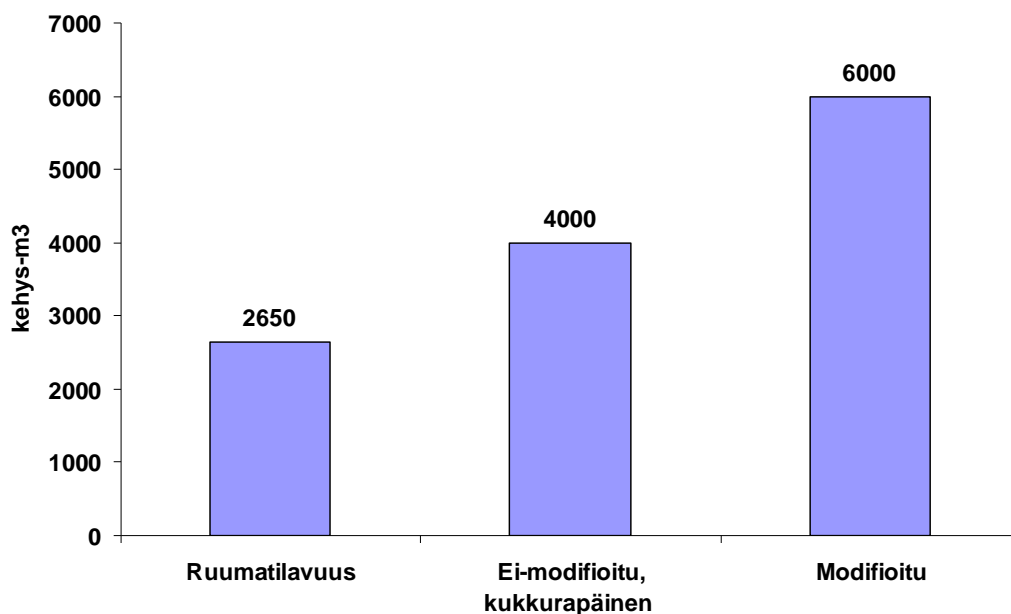


Kuva 2. Ruuma- ja kansilastiproomuun profiilikuvat (Casén 2007)

Ruumaproomuun rakenne on kaukalomainen. Proomun sivuilla on usein tolpat, joihin lasti voidaan sitoa kiinni ja jotka tukevat sitä sivuilta. Tällöin kaikki tila aluksessa on hyödynnettävissä. Näihin tolppiin olisi mahdollista rakentaa melko pienellä vaivalla hakkeen kuljetuskapasiteettia lisäävät laidat. Kansilastiproomuun muodostaa rakenteeltaan suljettu ponttoni, jonka kansi on tuettu raskaita lasteja kestäväksi. Rakenteestaan johtuen kansilastiproomut ovat usein ruumaproomuja leveämpiä ja syväkseltään matalampia ja ne sopivat parhaiten erikoislastien, kuten suurten kappaleiden ja pyörillä liikkuvan lastin kuljettamiseen. Kansilastiproomut vaativat erityisesti laitarakenteet irtolastin metsähakkeen kuljettamisen mahdollistamiseksi (Jäppinen ym. 2006)

Suurin sisävesialueella liikennöivä proomumalli on Eurooppa II a-proomu, jonka standardimitat ovat; pituus (76,5 m), leveys (11,4 m), maksimisyväys (4 m) ja kantavuus (2 540 t) (Jäppinen ym. 2006). Tilavuus on rajoittavana tekijänä kevyen hakkeen kuljetuksissa, sillä kantavuuden puolesta voitaisiin kuljettaa huomattavasti suurempia lasteja. Raakapuun kuljetuksessa puut lastataan laitarakenteesta lähteviä pylväitä vasten. Metsähakkeen kuljetuksessa on mahdollista lastata ruumaan mahtuvan materiaalin päälle pyramidin muotoinen kukkuralasti, jolloin kapasiteettia saadaan lisättyä.

Täyden kuljetustilan hyödyntäminen vaatisi kuitenkin laitarakenteiden rakentamista eli proomuun modifiointia. Ruuman pituus on 65 m ja leveys keskimäärin 10 m. Laitarakenteen maksimikorkeus voi olla 5 m, sillä korkeampi haittaisi jo näkyvyyttä työntäjäkykyettä käytettäessä ja saattaisi heikentää vakautta. Laitarakenne pitäisi pystyä nostamaan ja laskemaan kätevästi tuulen takia tyhjänä ajettaessa. Eurooppa II a –proomu Vorokissa käytetään omaa lastausjärjestelmää, joka vähentää hieman lastitilavuutta, mutta toisaalta alkuperäisestä proomumallista poistettu lastausramppi lisää ruumatilavuutta. Ruuman kehystilavuus on vakio 2650 kehys-m^3 , mutta maksimi tilavuus kukkuralastille riippuu lastin muodosta ($3775 - 4000 \text{ m}^3$) ja modifioidun mallin tilavuus riippuu laitarakenteista ($5350 - 6000 \text{ m}^3$). (kuva 3)



Kuva 3. Eurooppa II a –proomun tilavuudet metsähakkeelle (kehys-m³).

Kuljetuskokeiluissa ja laskelmissa tarkasteltiin suur- ja pienproomuketjuja. Alus- ja proomuka-luston ominaisuudet noudattelivat tarkasteluissa näitä kuljetuskonsepteja. Suurproomuketjuun valittiin suurin sisävesialueella toimiva aluskalusto, Arppe -monitoimialus ja Eurooppa II a -proomumalli Vorokki (kuva 4). Pienproomuketjun tarkastelussa käytettiin saarikorjuukohteiden aluskalustoa, Tapio -alusta ja Juri -kansilastiproomua (kuvat 5). Proomuja olisi mahdollista mo-difioida lisälaidoilla metsähakkeen kuljetukseen sopivaksi. Kansilastiproomun tilavuus laitar-a-kenteilla olisi 1750 kehys-m³.



Kuva 4. Arppe -monitoimialus ja Eurooppa Ila tyypin pohjaproomu (Mopro Oy)

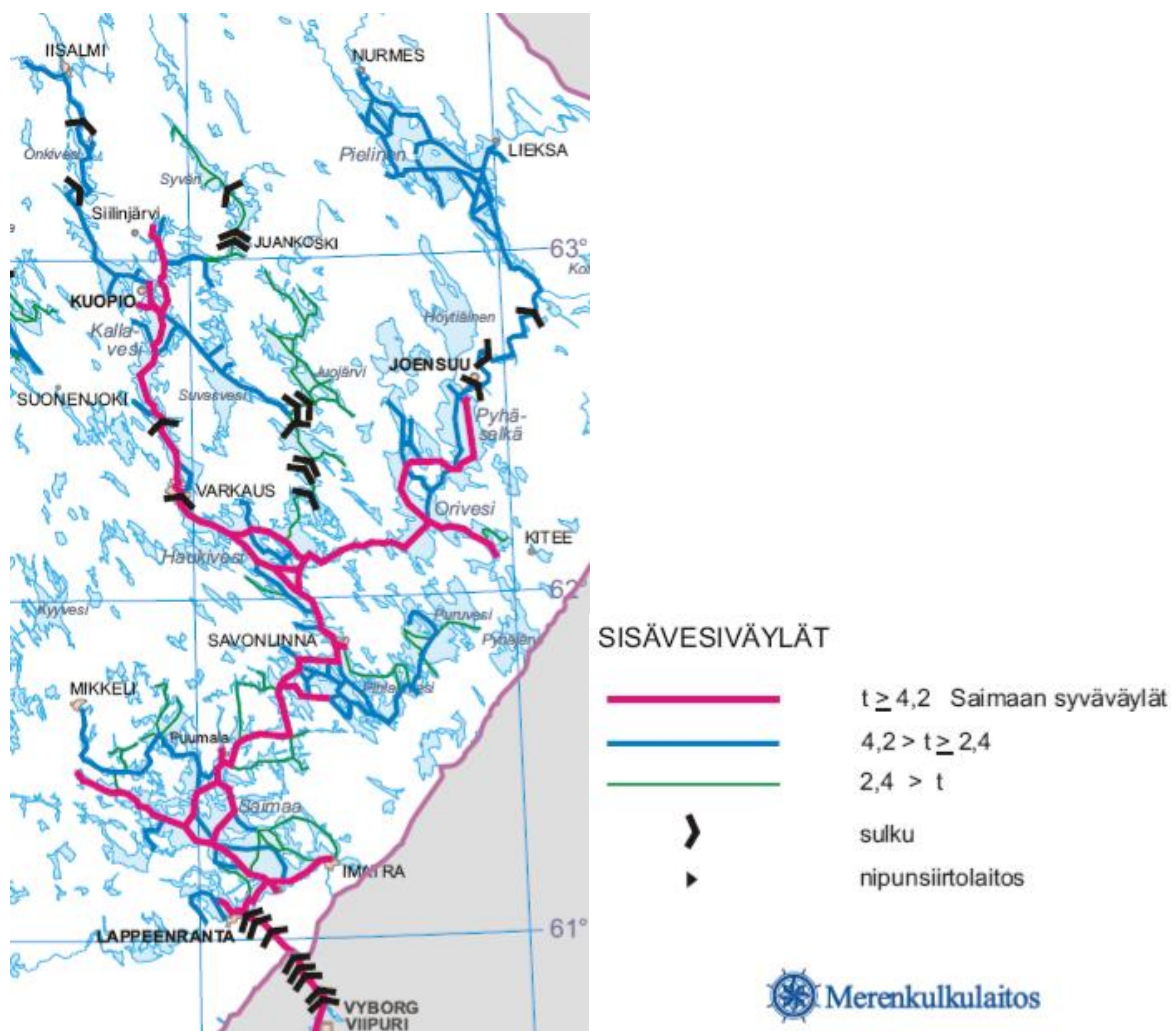


Kuvat 5. Tapio -alus (vasen) ja Juri -kansilastiproomu (oikea) (Karttunen)

Hypoteettisia alus- ja proomumalleja suunniteltiin opinnäytetöinä. Aluskaluston ja proomujen suunnittelussa lähdettiin liikkeelle annetuista lähtöarvoista, jotka olivat pituus, leveys sekä maksimisyväys. Töissä toteutettiin proomurungon suunnittelua, hinausteholaskentaa, kapasiteettilaskentaa, vakavuuden ja viippauksen laskentaa sekä hinta-arvioita. Menetelminä käytettiin SolidWorks 3D-mallia, jolla saatiin tarvittavalla tarkkuudella laskuissa käytettävät painopisteet, pinta-alat, tilavuudet ja poikkipintojen geometriset suureet. Näiden tietojen avulla varsinkin proomun vakavuuden ja viippauksen laskeminen helpottui. (Casén 2007, Forsell 2007, Niinilampi 2007)

Liikennöintialue

Suomen sisävesialueita ovat Vuoksen ja Kymijoen vesistöreitit. Kymijoki laskee Päijänteestä Kymenlaakson läpi Suomenlahteen, mutta merelle pääsy vesiteitse vaatisi kanavaratkaisuja. Vuoksen vesistö on Suomen suurin vesistöalue ja se sisältää Saimaan, Pielisen, Kallaveden ja lukuisan joukon pienempiä vesistöalueita, joita on osin yhdistetty kanavaratkaisuin laivaliikenteelle sopiviksi. Vesistö kattaakin lähes koko Itä-Suomen ja Saimaan kanavaa pitkin vesistöstä on pääsy Venäjän kautta Suomenlahteen Itämerelle. Tutkimuksessa rajoituttiin Vuoksen vesistöalueelle (kuva 6).



Kuva 6. Vuoksen vesistöalue kattaa koko Itä-Suomen ja Saimaan kanavan kautta on yhteys Itämerelle.

Suomen sisävesiväylien yhteispituus on 9678 km, joista Vuoksen vesistöalueen syväväylien pituus on 771 km (Merenkulkulaitos 2008). Sisävesiväylät voidaan jakaa syväväyliin, pääväyliin, sivuväyliin ja merkittömiin väyliin syvyyksen perusteella (taulukko 2).

Taulukko 2. Sisävesiväylien luokittelu

Sisävesiväylät	Kulkusyvyys, m	Pääliikennemuoto
Syväväylät	4,2 <	Syväväyläalukset, proomuliikenne, nippu-uitto
Pääväylät	4,2 – 2,4	Proomuliikenne, nippu-uitto, matkustajaliikenne, veneily
Sivuväylät	2,4 <	Nippu-uitto, veneily
Merkitsemättömät väylät	Ei vahvistettu	Nippu-uitto, veneily

2.2 Logistiikkajärjestelmä

Logistiikkajärjestelmän tarkastelussa selvitettiin mitä työvaiheita tarvitaan, ennen kuin metsäpolttoaine on kuljetettu metsästä proomuun. Vastaavasti tarkasteltiin työvaiheita, jotka sisältyvät metsäpolttoaineen toimitusketjuun proomusta käyttöpaikalle. Lisäksi määritettiin vaihtoehtoisia toimintamalleja toimitusketjulle metsästä proomun lastauspaikalle sekä proomun purkupaikalta käyttöpaikalle prosessikuvauksena.

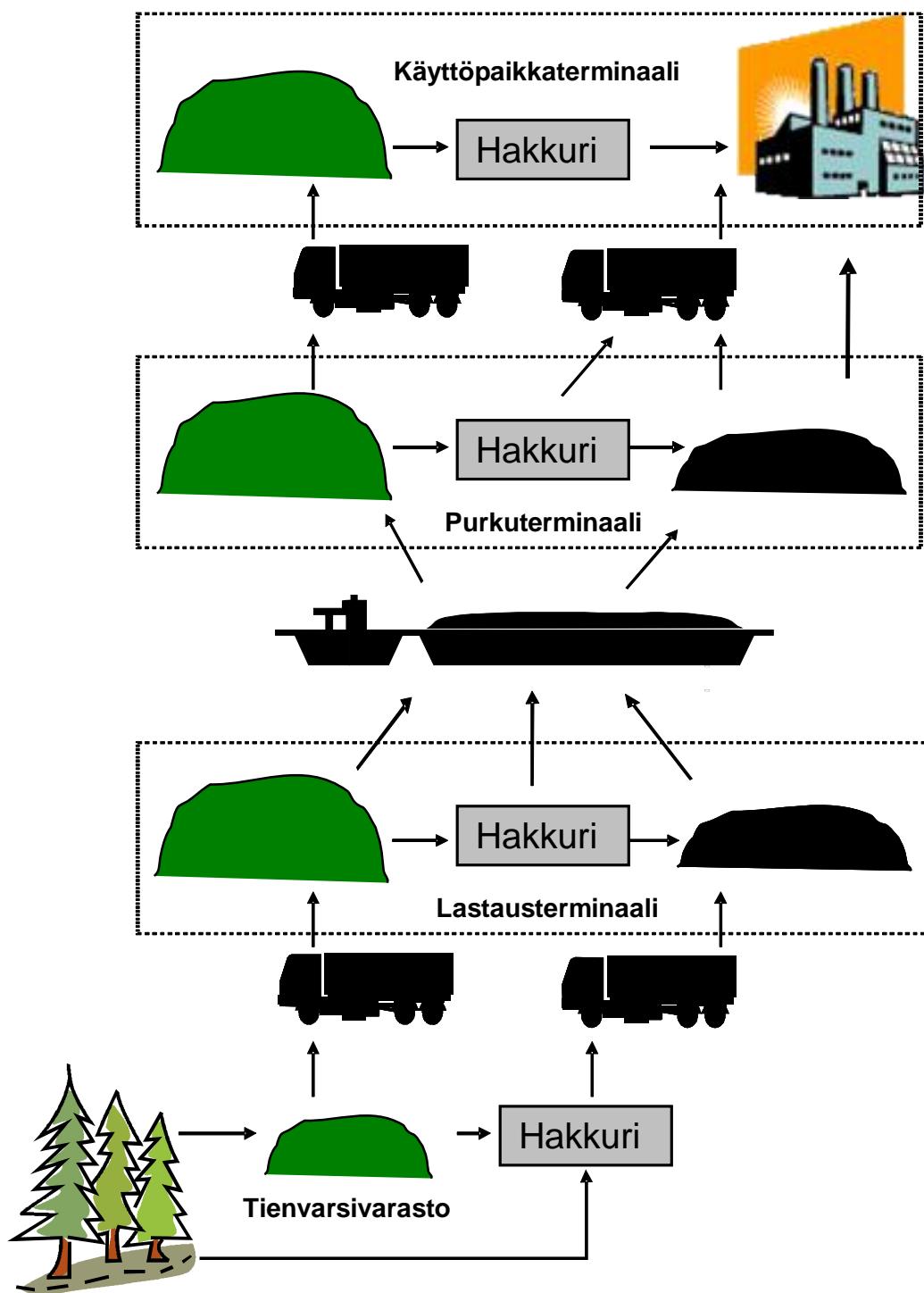
Tutkimusosiossa selvitettiin proomukaluston soveltuvuus metsäpolttoaineen hankintalogistiikkajärjestelmään ja eri tuotantomenetelmien tuomat rajoitteet ja niiden vaikutus kuljetusketjulle. Simulointien avulla tarkasteltiin eri logistiikkavaihtoehtojen toimintaa ja kustannuksia.

Päästöjen vertailututkimuksessa tarkasteltiin eri kaukokuljetusketjujen päästöjä tapaustarkasteluna lastaustermiinaalista purkutermiinaaliin. Vertailuketjuina olivat maantie-, rautatie- ja vesitiekuljetus. Päästölaskenta toteutetaan elinkaarilaskentana (Life Cycle Assessment = LCA), jota täydennettiin tarkemmalla paikkatietoon perustuvalla tarkastelulla. Kaukokuljetusketjuja vertailtiin myös perinteiseen tienvarsihaketukseen perustuvaan hankintaan. Elinkaarilaskennan täydentäminen tarkemmalla paikkatietoon perustuvalla laskennalla edustaa uutta innovatiivista tutkimusmenetelmää.

Aluskuljetuksen organisointi ja uudet liiketoimintamahdollisuudet selvitettiin koko vesitiekuljetuksen sisältämälle metsäpolttoaineen hankinnalle. Liiketoimintamalleina tarkasteltiin perinteistä urakointimallia ja ulkoistettuja liiketoimintamalleja, joita vertailtiin asiantuntijahaastattelujen pohjalta.

2.2.1 Metsäpolttoaineiden proomukuljetuslogistiikka

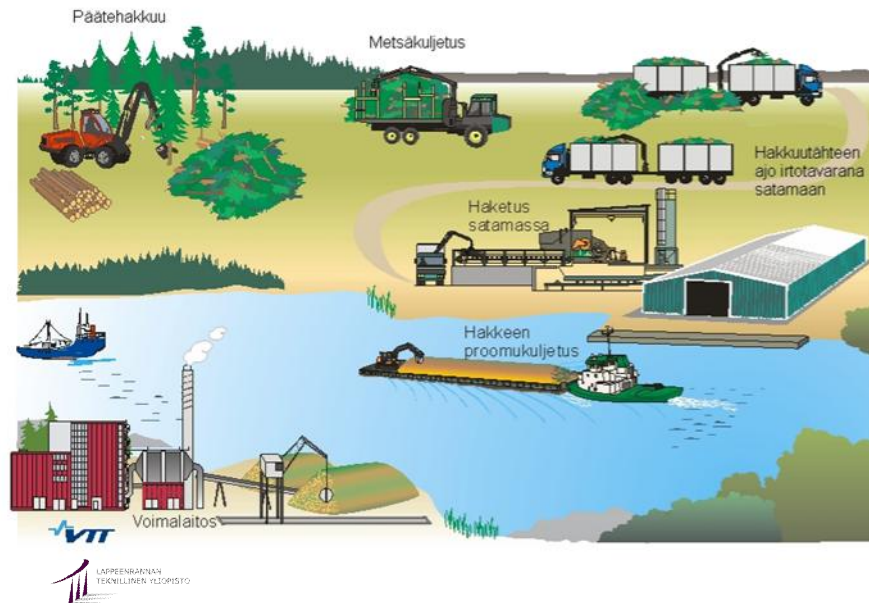
Vesitiekuljetuksen sisältämä metsäpolttoaineiden hankintaketju voidaan toteuttaa usealla eri menetelmällä. Hankintamenetelmät voidaan erotella palsta-, tienvarsi-, terminaali- ja käyttöpaikka-haketusjärjestelmään sen mukaisesti, missä haketus on järjestetty. Palstahaketus on käytännössä poistunut markkinoilta (Asikainen 2007). (kuva 7)



Kuva 7. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämän hankintaketjun prosessikuvaus.

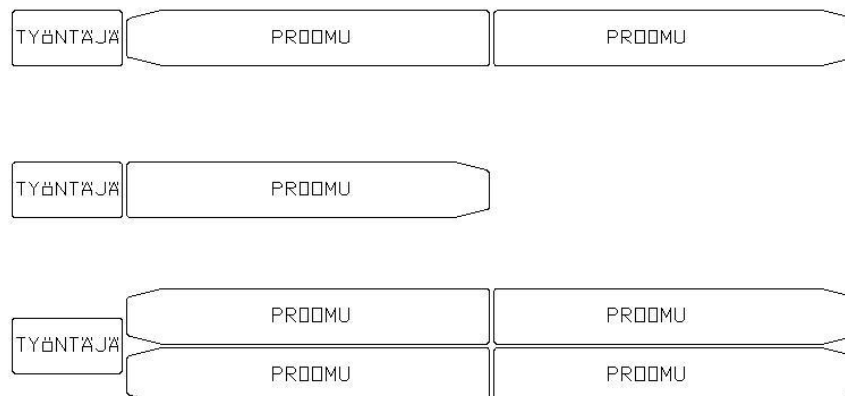
Tienvarsihaketusjärjestelmä on metsähakkeen tuotannon perusratkaisu, jonka etuina vesitiekuljetuksen sisältämässä hankintaketjussa on haketuksen (melu, pöly) tapahtuminen metsätienvarressa ja hakkeen edullisempi alkukuljetus ja varastointi. Terminaali- ja käyttöpaikkahaketuksen perustuvassa hankintajärjestelmässä hakkuutähteet kuljetetaan irtotavarana metsästä lastauspaikalle. Terminaalihaketusjärjestelmässä metsäbiomassa haketetaan lastauspaikalla (kuva 8). Päätehakkuun hakkuutähteet tai nuoren metsän kunnostuksien pienpuu voitaisiin myös paalata, jolloin saataisiin kuljetettua ja varastoitua irtotavaraa tiiviimmässä muodossa. Lastausmenetelminä voi-

daan käyttää useita eri menetelmiä, riippuen lastattavasta materiaalista, proomukalustosta ja lastauspaikan olosuhteista.



Kuva 8. Terminaalihaketusjärjestelmä osana metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämää hankintaa (Alakangas & Karttunen 2007)

Työntökytkyeen voi muodostaa yksi tai useampi proomuyksikkö, jotka on kiinnitetty työntäjäan (kuva 9). Saimaan vesistöalueella voisi proomuryhmän muodostaa maksimissaan neljä proomua ja Suomen rannikko-olosuhteissa voisi proomuryhmän muodostaa kaksi proomua (Proomukalustoimikunnan mietintö 1978).



Kuva 9. Työntökytkyeen voi muodostaa työntäjäalus ja yksi tai useampi proomuysikkö, jotka ovat kytketty tosiinsa rinnakkain tai peräkkäin.

Proomukuljetuslogistiikka voi perustua yhden, kahden tai kolmen proomuysikön järjestelmään. Kolmen proomuysikön järjestelmässä työntäjä kuljettaa yhtä proomuysikköä, kun kaksi muuta on lastattavana ja purettavana satamissa. Yhden proomuysikön logistiikassa työntäjä joutuu odottamaan lastauksien ja purkujen ajan satamissa.

Mitä suurempi kytkye ja painolasti, sitä tehokkaampaa ja suurempaa työntäjää tarvitaan. Suuritehoista työntäjää tarvitaan myös jäänmurtoon. Pienikokoisen työntäjän ja proomuysikön muo-

dostamalla kytkeydellä on mahdollista toimia matalamman syvyyksen väylillä ja saarikorjuukohdeissa. Pienemmän kokoluokan aluksen ja suuren proomuyksikön muodostamalla kytkeydellä voidaan saavuttaa edullinen kuljetuslogistiikka. Pienaluksella päästään edullisempaan kustannuskentteeseen ja suuremmalla proomulla suurempaan lastikapasiteettiin, jolloin yksikkökustannukset alenevat. Logistiikka sopii myös erityisesti heikommille väylille, joissa matala syväys ja väylän ahtaus ovat rajoitteena suuremmalle kalustolle ja mikäli aluksesta ei ole riittävän hyvä näkyvyys. (kuva 10)



Kuva 10. Pienen hinaajan, apualuksen ja suurproomun (Eurooppa IIa) muodostama kytkeyde soveltuu myös syväykseltään matalammille ja ahtaammille väylille (NK Consult, St. Petersburg).

2.2.2 Lastaus ja purku

Metsäpolttoaineiden lastauksessa ja purussa proomuun voidaan käyttää useita menetelmiä riippuen lastattavasta materiaalista ja proomukalustosta. Lastaus ja purkupaikkojen ominaisuudet ja olosuhteet vaikuttavat myös kaluston valintaan. Metsäpolttoaineiden käsittely pitäisi pystyä soveltamaan ainakin alkuvaiheessa olemassa oleviin terminaaleihin ja menetelmiin.

Järvi-Suomen Uittoyhdistyksen laatimassa selvityksessä on kartoitettu Vuoksen ja Kymijoen vesistöalueilta sellaiset paikat (satamat, lastauspaikat ja pudotuspaikat), jotka voisivat toimia lastauspaikkoina myös metsähakkeen vesitiekuljetuksille (Purhonen 2004):

- **Satamat** ovat kuntien tai yritysten omistamia syväväyläverkoston (4,2 m) piirissä olevia rahtisatamia satamapalveluineen. (15 kpl)
- **Lastauspaikat** ovat ilman varsinaisia satamapalveluja joko syväväylä tai matalamman (2,4 m) väyläverkoston piirissä olevia ”laiturillisia” lastauspaikkoja. (15 kpl)
- **Pudotuspaikat** ovat vesilain mukaisten uittosääntöjen perusteella Järvi-Suomen Uittoyhdistyksen tai Perkaus Oy:n hallinnassa olevia paikkoja, joilla nippu-uittoon tuleva puutavara siirretään trukkipurkuna veteen. Nippu-uiton vaatima vähimmäissyvyys on n. 2,2 m. (59 kpl)

Metsähakkeen lastauksessa ja purussa voitaisiin käyttää kauhakuormaajaa, hinnakuljetinta, aluksen omaa kalustoa, satamanosturia, materiaalinkäsittelykonetta tai pneumaattisia laitteita. Lastaus- ja purkumenetelmien soveltuvuus riippuu käytettävästä kuljetuskalustosta, satamaolosuhteista ja käyttömääristä.

Kauhakuormaajan etuna ovat suhteellisen edulliset käyttökustannukset. Lisäksi kauhakuormaajalla pystytään toimimaan tehokkaasti myös pienillä lastauspaikoilla. Kauhakuormaajan käyttä-

minen varsinaiseen lastaamiseen onnistuu vain, jos aluksessa on ajoramppi. Kauhakuormaajan etuna on myös lastauksessa saavutettava tiivistämishyöty. Kauhakuormaajaa tarvitaan terminaalitoiminnoissa, kuten hakekasojen siirtelyssä ja aumauksessa. Kauhakuormaajaa tarvitaan apuna varsinaisen lastauksen tapahtuessa hihnakuuljettimella.

Hihnakuuljettimen etuina on sen nopeus ja ulottuvuus (kuvat 11). Hihnakuuljettimella voidaan suorittaa lastaus sellaisilta lastauspaikoilta, joissa proomua ei voida ajaa laituriin kiinni tai satamalaituri puuttuu. Hihnakuuljettimelle hake siirretään kauhakuormaajilla. Hihnakuuljetinta voidaan siirrellä laiturilla tai vastaavasti proomua hihnakuuljettimen ollessa paikallaan. Hakkureissa ja murskaimissa on myös hihnakuuljetin tai puhallinputki, jota voitaisiin hyödyntää myös lastattaessa suoraan proomuun.



Kuvat 11. Hihnakuuljettimen käyttöä lastauksessa ESE Oy:n kuljetuskokeilussa (NK Consult, St. Petersburg)

Materiaalinkäsittelykone on hydraulinen nosturi, jolla lastaus pystytään suorittamaan nopeasti. Tuottavuus riippuu konetehosta ja kauhan koosta. Materiaalinkäsittelykoneita tehdään tela-, pyörä ja kiskoalusteisina (Mantsinen Oy). Materiaalinkäsittelykoneita on suurimmissa sisävesialueen satamapaikoissa (kuva 12). Rannikkosatamissa on satamanostureita, joissa on suuri kahmari-kauha.



Kuva 12. Telojen päällä liikkuva materiaalinkäsittelykone metsähakkeen lastauksessa proomuun Puhoksen satamassa (kauhakuormaaja apuna) (Tomi Vartiamäki, Koneyrittäjien liitto ry.)

Pneumaattisessa menetelmässä imetään lasti suuren imutorven välityksellä (kuvat 13). Imusuuttimet mahtuvat myös tarvittaessa sisään pienistäkin lastiluukuista. Pneumaattisten laitteiden toimivuutta ei ole kokeiltu heterogeeniselle metsähakkeelle. Haittapuolena on myös mekaanisiin menetelmiin verrattuna suuri energiankulutus.



Kuvat 13. Pneumaattinen kiinteä purkulaitteisto (vasen). Pneumaattinen purku mobiililaitteella (oikea). (Vigan)

Aluksen oma lastauskalusto alentaa lastauskustannuksia, mikäli pystytään välttämään muiden kalliimpien menetelmien käyttö ja välttämään sataman odotusajoilta. Hakkeen pitää olla lastauksessa oman kauhan ulottuvilla. Alusten omat lastauskalustot voivat olla kapasiteetiltaan pienempiä ja hitaampia kuin muut menetelmät. Pneumaattinen mukana kulkeva mobiililaitte saattaa olla mahdollinen myös metsähakkeen lastauksessa ja purussa. Tällaista laitetta ei kuitenkaan voitaisi käyttää muiden materiaalien lastauksessa.

Lastauksessa on tärkeää saada hakelasti mahdollisimman tiiviiksi, että kuorman kokoa saadaan kasvatettua. Metsähakelasti tiivistyy oman painonsa ansiosta, mutta parhaan tiiviyden saavuttamiseksi lastia voidaan tiivistää ajamalla kuorman päällä kauhakuormaajalla, traktorilla tai pienemmällä ”bobcatilla” (kuvat 14). Tiivistymiseen vaikuttaa hakkeen palakoko, kosteus, ruuman muoto, lastimäärä ja tiivistämiseen käytetyn koneen pintapaine.



Kuvat 14. Hakelastia voidaan tiivistää ajamalla sen päällä esim. bobcatilla (vasen, Karttunen) tai kauhakuormaajalla (oikea, NK Consult, St. Petersburg)

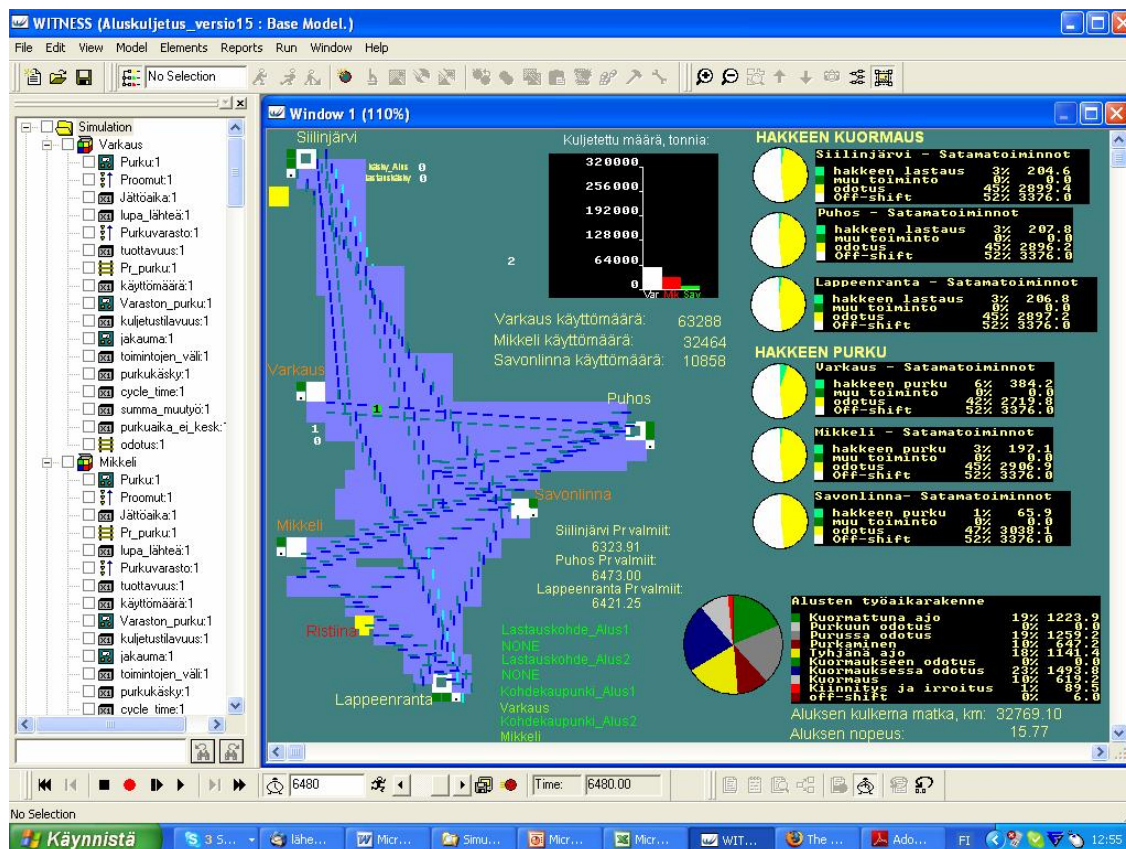
Lastinsiirtely purkuterminalissa voi tapahtua kauhakuormaajalla, hihnakuuljettimilla tai pneumaattisia putkia pitkin suoraan polttoaineen vastaanotto paikalle tai varastosiiloihin. Lasti voidaan purkaa suoraan hakerekkoihin jatkokuljetusta varten tai purkuterminaliin aumoihin puskurivarastoksi. Yleinen menetelmä rannikolla sijaitsevilla hiilivoimalaitoksilla on purkaa lasti hihnakuuljettimille, jotka siirtävät polttoaineen voimalaitoksen varastokentälle.

Lastaus- ja purkupaikkojen yhteydessä voi olla lisäksi biomassan muuta käsittelyä ja jalostamista. Jalostamisella voidaan lisätä tuotteen energiatihelyttä. Metsäpolttoaineiden jalostamista ovat haketus- ja murskaus, kuivausmenetelmät sekä biopolttoaineiden sekoitukset. Metsäpolttoaineet vaativat myös muuta käsittelyä terminalissa, kuten varastointia ja aumausta. Lisäksi terminaalit

voivat erikoistua muiden tuoteryhmien käsittelyyn. Ainakin raakapuun ja metsäpolttoaineiden terminaalitoiminnoista ja kuljetuksien järjestelyistä olisi löydettävissä keskinäistä synergiaa.

2.2.3 Vesitiekuljetuksen simulointi

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämän hankintalogistiikan ajankäytön, kuljetusmäärien ja kustannuksien tarkastelu toteutettiin Witness –ohjelmistoon rakennetun simulointimallin avulla. Simulointien lähtökohdista oli kartoittaa erilaisten järjestelmien mukaisia kustannuksia metsähakkeen vesitiekuljetuksen sisältämään hankintaan ja pyrkiä löytämään edullisia ja toimivia logistiikkaratkaisuja. Simulointimallin tärkein kehittämiskohde rajattiin satamatoimintojen ja proomukuljetusvaihtoehtojen kehittämiseen. (kuva 15)



Kuva 15. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämän hankintalogistiikan simulointiympäristö Witness-ohjelmistossa (Väättäinen, Metla)

Vesitiekuljetuksen osuuden vertailemiseksi valittiin erilaisia alus- ja proomuyhdistelmiä. Vesitiekuljetuslogistiikassa vertailtiin yhden proomuyksikön kiinteää logistiikkaa kolmen proomuyksikön vaihdettavissa olevaan logistiikkaan. Yhden proomun logistiikassa alus odottaa proomun kanssa lastaus- sekä purkupaikoissa, kun vastaavasti kolmen proomun logistiikassa alus on liikenteessä yhden proomun kanssa koko ajan muiden proomujen ollessa lastattavana ja purettavana. Lisäksi simuloitiin vaihtoehtoina kahden proomuyksikön yhtäaikaista kuljettamista.

Simulointiympäristöön toteutettuun tapaustarkasteluun valittiin lastaustermiinaaleja, jotka sijaitsivat eri suunnilla vesistöä ja joissa oli hyvä metsäpolttoaineiden saatavuus (Puhos, Siilinjärvi ja Lappeenranta) sekä käyttöpaikkoja, jotka sijaitsivat aivan vesikuljetusreittien varrella (Savonlinna, Mikkeli ja Varkaus). Käyttöpaikkojen metsähakkeen käyttömääräksi arvioitiin vuoden 2015 jälkeinen tilanne (Savonlinna 120 GWh, Mikkeli 500 GWh ja Varkaus 2000 GWh). Kuljetusosuudet simulointiympäristössä allokoitiin siten, että kokonaismäärästä Savonlinnaan kuljetettiin 10 %, Mikkeliin 30 % ja Varkauteen 60 %. Todelliset vesitiekuljetussuoritteet määräytyivät kaluston ja simulointiajojen ajankäytön mukaisesti.

Simulointimallit ajettiin 9 kuukauden (6600 tuntia) osissa kussakin skenaariossa viisi kertaa. Tulokset olivat viiden simulointiajon keskiarvoja. Simulointien perusskenaarioissa satamat toimivat kahdessa työvuorossa viitenä arkipäivänä viikossa ja viikonloppuina satamat olivat suljettuina. Alukset liikennöivät 7x24h koko yhdeksän kuukauden ajan. Satamatyövuoroista riippumattomat skenaariotarkastelut toivat esille toiminnan tehostamisen vähentämällä alusten odotusaikoja satamissa. Lastauksen ja purun simuloinnissa vertailtiin hihnakuljettimen ja suuren materiaalinkäsittelykoneen vaihtoehtoja. Hihnakuljetinmenetelmä oli riippumaton satamahenkilökunnan työvuoroista, sillä alushenkilöstön oletettiin käyttävän lastaukseen ja purkuun tarvittavaa kalustoa. Suurilla materiaalinkäsittelykoneilla toteutettu lastaus ja purku oli riippuvainen satamatyövuoroista. Kuormauksen ja purun tuottavuudet eri menetelmillä on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Vesitiekuljetussimuloinneissa käytetyt kuormauksen ja purun tuottavuudet.

Lastaus- ja purkumenetelmä	tuottavuus, tn/h	
	kuormaus	purku
Materiaalinkäsittelykone	175	165
Hihnakuljetin + kauhakuormaaja	120	75

Jokaiselle väylälle selvitettiin etäisyydet ja määritettiin nopeudet eri aluksille väylien ominaisuuksien ja proomun painojen mukaan. Pienen aluksen kytkeydellä nopeudet vaihtelivat väylän ja proomun koon mukaisesti 9,3–12,8 km/h kuormattuna ja 10,5–14,0 km/h tyhjänä. Vastaavasti suuren aluksen kytkeydellä nopeusvaihtelu oli 9,9–15,7 km/h kuormattuna ja 11,4–16,7 km/h tyhjänä. Hinattaessa (pieni alus ja suuri proomu) kuormattuna-ajon nopeutta vähennettiin kaikilla reiteillä 2 km/h alkuperäisestä arvosta. Proomun kuljetusyksikkönä käytettiin metsähake tonnia (2,93 MWh/tn, kosteus 40 %). Proomukapasiteetit arvioitiin kuljetuskokeilujen ja proomujen tilavuuksien perusteella. Lastausmenetelmien ja proomun tilavuuksien vaikutusta tiivistymiseen ja kapasiteettiin ei otettu huomioon, vaan käytettiin kuljetuskokeiluista saatuja lähtötietoja.

Satamaan saapumisvaiheet sekä satamasta lähtövaiheet proomujen asennuksineen ja irrotuksineen ym. aputoimintoineen vaihtelivat skenaariokohtaisesti. Yhden proomun logistiikassa yhden proomun kytkeydessä satamaan tulo- ja lähtötoimet veivät kukin 30 minuuttia (yht. 1 h). Vastaavasti kahden proomun kytkeydessä tulo- ja lähtö veivät kukin 48 minuuttia (yht. 1h 36 min). Kolmen proomun logistiikassa satamaan tulo, proomun vaihto ja lähtö veivät aikaa 2 tuntia. Vastaavasti kahden proomun kytkeydessä ajanmenekki oli 2h 30 min.

Yksikkökustannukset

Kalustojen kustannusrakenteen laskennassa käytettiin yrittäjien ilmoittamia kalustokohtaisia lähtöarvoja. Simulointiajoista saatujen ajanmenekkien ja kokonaissuoritteiden pohjalta laskettiin yksikkökustannukset EXCEL -sovellukseen laadituilla kustannuslaskentamalleilla. Ajon aikaiset kustannukset sisälsivät pääomakustannuksien, palkkakustannuksien ja kiinteiden yleiskustannuksien lisäksi käyttökustannukset. Kiinteät kustannukset satamassa olon ajalle sisälsivät pääomakustannukset, palkkakustannukset ja muut kiinteät yleiskustannukset. Yksikkökustannukset saatiin, kun vuotuinen kokonaiskustannus jaettiin kokonaissuoritteella.

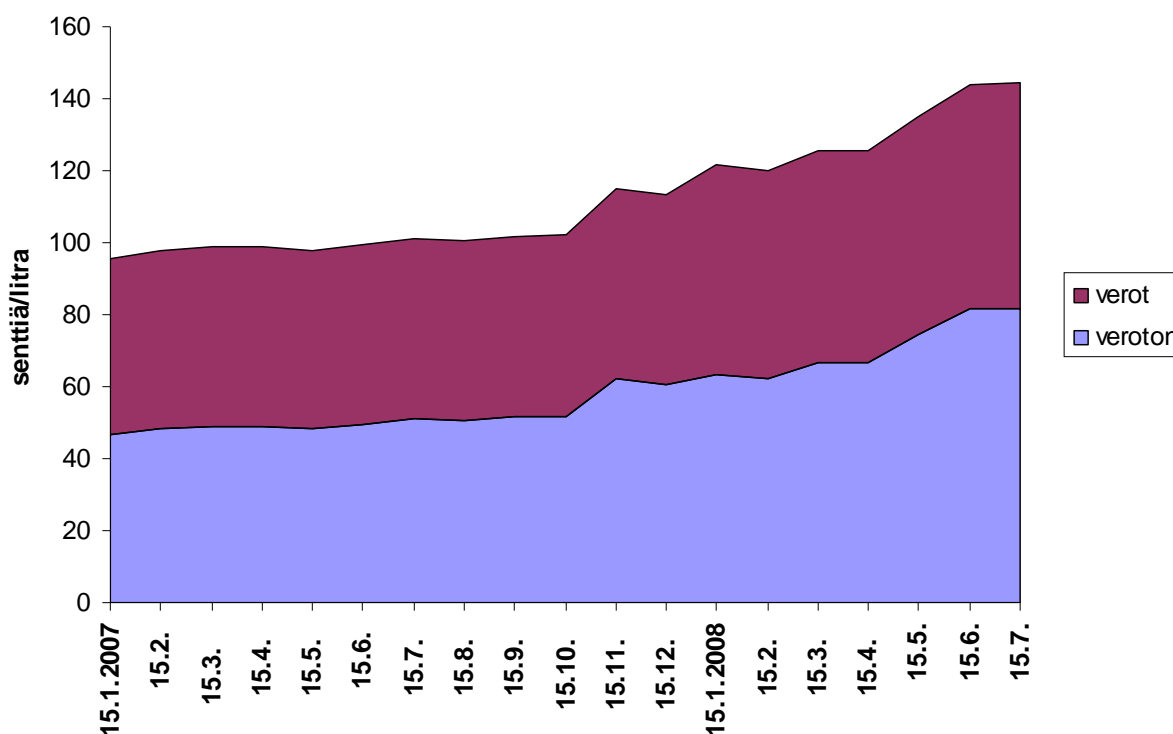
Alushenkilöstön keskimääräisenä tuntipalkkana käytettiin 16,4 €/h, joka piti sisällään tehoajan ylityökorvauksineen (6+6 h/vrk). Aluksilla työskenneltiin kahdessa vuorossa kahden viikon työjaksoissa. Pienproomussa työskenteli kaksi henkilöä ja suurproomussa yhteensä viisi henkilöä, joista kokki teki töitä yhdessä vuorossa. Palkan sivukulujen oletettiin olevan 54 % keskimääräisestä tuntipalkasta.

Vertailu hakerekkaketjuun toteutettiin selvittämällä hakerekan kustannusrakenne. Hakerekkana käytettiin simuloinneissa 130 i-m³ kokoista täysperävaunuyhdistelmää ja metsähakkeen lastipainona 34 tonnia (40 % kosteus). Hakerekka operoi täytenä tienvarsivarastolta käyttöpaikalle ja

tyhjänä takaisin. Muiksi hakerekkaketjun kustannuksiksi määritettiin tienvarsihintaa ja haketus-kustannukset. Kokonaisketjun hallinnointikustannuksia ei otettu huomioon.

Alusten polttoaineenkulutus on oleellinen ajon kustannuserä. Polttoaineena aluksissa käytetään moottoripolttoöljyä, jonka hinta oli 0,63 €/l keskimääräisen kevyen polttoöljyn hinnan mukaisesti vuonna 2007 (Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2008). Polttoaineen tuntikohtainen kulutus pysyy käytännössä samana tyhjänä ja täytenä ajettaessa, kun aluksilla ajetaan samalla koneteholla. Kulunopeuteen vaikuttaa konetehon lisäksi lastipaino ja luonnon olosuhteet (tuuli, jää). Työntökyt-kyeen nopeutena käytettiin kuljetuskokeiluissa ja käytännön toiminnassa todettuja lastipainon mukaisia ajonopeuksia. Simuloinnissa muiden koneiden ja hakerekkajen polttoaineena käytettiin dieselöljyä, jolle käytettiin vuoden 2007 keskimääräistä hintaa 0,92 €/l (10 %:n yrittäjäalennus otettu huomioon).

Polttoaineen hinnan vaikutus kuljetuskustannuksiin riippuu polttoainekustannusten osuudesta kokonaiskustannuksista. Vaikutus lasketaan siten, että polttoainekustannusten osuudella kerrotaan hintamuutos prosentteina. Jos esimerkiksi polttoaineen osuus on 30 % kokonaiskustannuk-sista ja polttoaineen hintamuutos on 10 %, on vaikutus kokonaiskustannuksiin $(30/100) \times 10 = 3$ %. Dieselöljyn keskimääräinen kuluttajahinta on noussut dramaattisesti (kuva 16).



Kuva 16. Dieselöljyn keskimääräiset kuluttajahinnat vuoden 2007 alusta heinäkuulle 2008. (Öljy- ja kaasualan keskusliitto 2008).

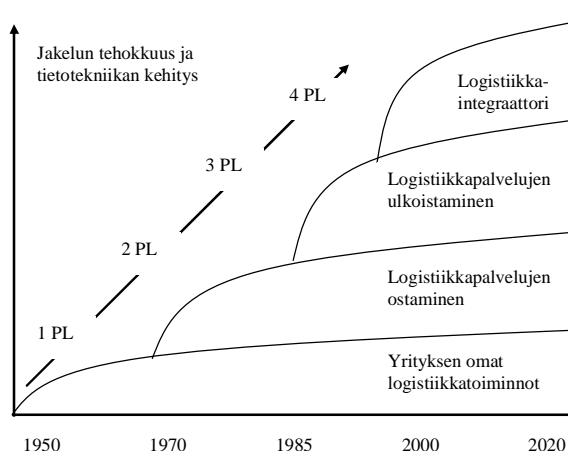
Käytännön kilpailutilanteeseen hakerekan ja proomukuljetuksen välillä vaikuttaa dieselin ja moottoripolttoöljyn (kevyt polttoöljy) väliset suhteelliset hinnanvaihtelut. Diesel-öljyn kuluttaja-hinta on noussut vuodessa 43 % (heinäkuu 2008), kun samaan aikaan kevyen polttoöljyn keski-määräinen hinta on noussut 56 %.

2.2.4 Liiketoimintamallien analysointi

Logistiikalla tarkoitetaan materiaalivirtojen ja niihin liittyvien pääoma- ja tietovirtojen hallintaa hankintalähteiltä asiakkaille. Logistisilla palveluilla tarkoitetaan materiaalivirtoihin liittyviä kul-jetus-, varastointi-, kierrätys-, lisäarvo- ja tietoliikennepalveluja. Logistiikkajärjestelmänä voi-

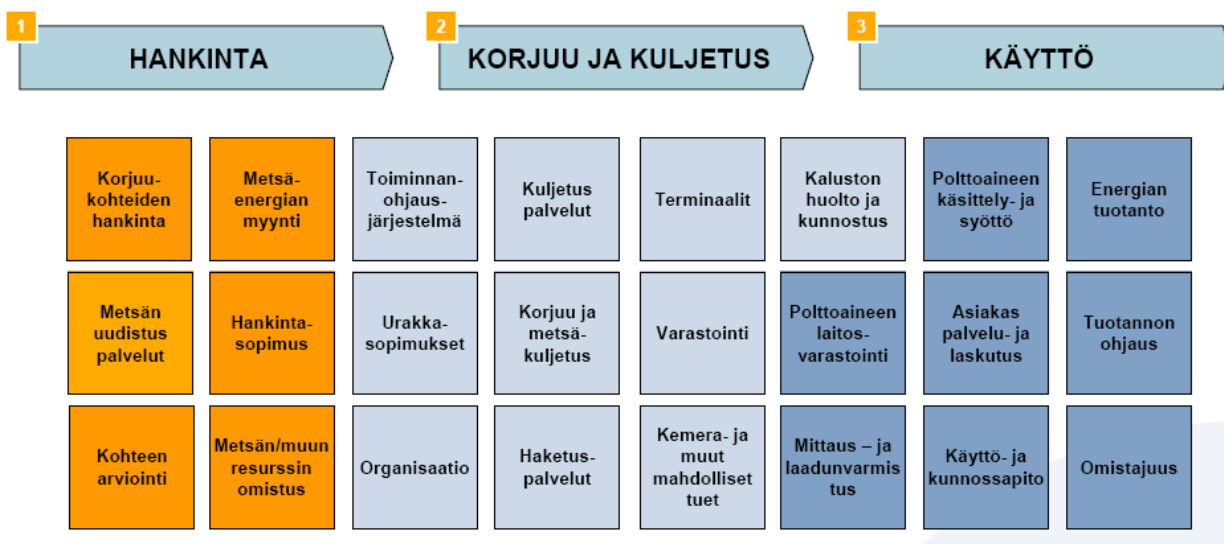
daan pitää niiden tekijöiden integroitua kokonaisuutta, jotka osallistuvat tietyn yksikön logistiikan toteuttamiseen.

Logistiikan ulkoistamisella tarkoitetaan palveluiden ostamista niiden tuottamiseen erikoistuneelta palveluntuottajalta sen sijaan että nämä toiminnot tehtäisiin itse. Liiketoimintavaihtoehdot voidaan luokiteltu ulkoistamisen laajuuden ja verkostoitumisen mukaisesti (kuva 17).



Kuva 17. Logistiikkapalvelun ulkoistamisen ja verkostoitumisen kehitys (Haapanen ja Vepsäläinen, 1999).

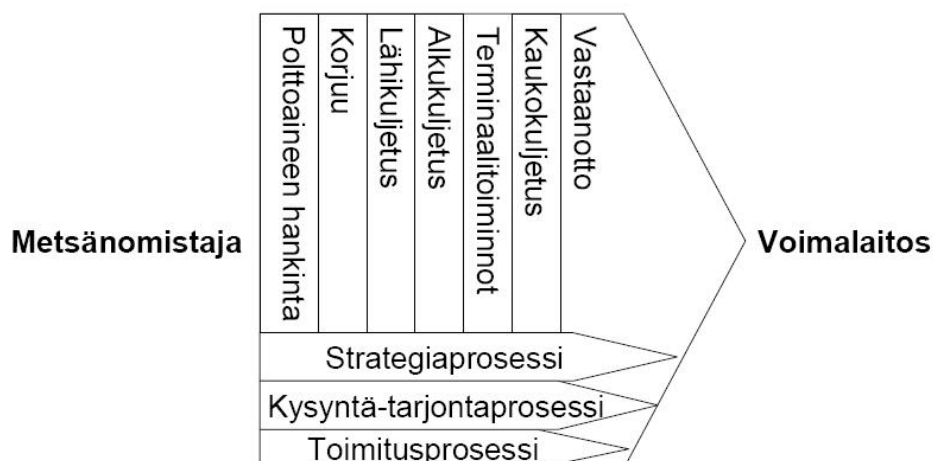
Metsäbiomassan jalostaminen metsäenergiaksi muodostaa arvoketjun biomassan hankinnan, korjuun ja kuljetuksen sekä käytön toiminnoista (kuva 18). Metsäpolttoaineiden hankintalogistiikan liiketoimintamalleille voidaan esittää erilaisia toteutustapoja. Perinteinen toimintatapa tarkoittaa toimitusketjua, jossa eri toimintavaiheita toteutetaan eri yrittäjien toimesta. Ulkoistetussa toimintatavassa yhtenäinen organisaatio ottaa vastuu koko toimitusketjusta prosessimallin mukaisesti.



Kuva 18. Metsäenergian arvoketju (Pöyry Energy Oy 2008)

Metsäpolttoaineen logistiseen prosessiin liittyy useita välivaiheita, joiden kytkeminen hallittavaksi kokonaisuudeksi vaatii prosessijohtamista. Tehokkaan toimintamallin luomisesta hyötyy sekä materiaalin myyjä, joka saa raaka-aineesta mahdollisimman kilpailukykyisen hinnan että tilaaja voimalaitos, jonka toimitusvarmuus paranee ja raaka-ainetta on saatavilla kilpailukykyiseen hintaan. Logistista prosessia hallitseva toimittaja ja mahdolliset alihankkijat hyötyvät kan-

nattavasta liiketoiminnasta kilpailluilla markkinoilla. Tehokkaassa toimitusketjussa kaikki hyötyvät. (kuva 19)



Kuva 19. Metsäpolttoaineen logistisen prosessin kuvaus, kun yritys hoitaa toimitusketjun metsästä voimalaitokselle osana terminaalihaketusrjestelmää (Liikenne- ja viestintäministeriö 2001, Porter 1985)

Liiketoimintakonsepti – käsite tarkoittaa sellaista yrityksen tekemää liiketoimintastrategiaa, joka määrittelee riippuvuudet tuote- ja palvelukonseptin ja tuotanto- ja jakelukonseptin välillä. Liiketoimintakonseptissa määritellään lisäarvo asiakkaalle ja ansaintamalli yritykselle.

Liiketoimintakonsepteina tarkasteltiin muutamaa vaihtoehtoa vesitiekuljetuksen sisältämille logistiikkaketjuille. Ne nimettiin seuraavasti:

- **Suurproomuketju:** Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämä hankintalogistiikka, jossa hyödynnetään suuria keskitettyjä satamaterminaaleja ja suurta kuljetuskalustoa syväväylillä ympärivuotisesti.
- **Pienproomuketju:** Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämä hankintalogistiikka, jossa hyödynnetään pienempiä hajautettuja lastaustermiinaaleja ja pienempää kuljetuskalustoa matalamman syvyyksen vesitieväylillä sulan veden aikana.
- **Saarikorjuuketju:** Nuoren metsän kunnostuskohteiden pienpuun vesitiekuljetuksen sisältämä hankintalogistiikka saari- ja rantakohteista.

Liiketoimintakonseptin ketjut eivät sulje pois rinnakkaisia kalustovaihtoehtoja, vaan niitä rajoittavat väylä- ja olosuhdetekniset tekijät. Liiketoimintakonsepti pitää sisällään koko vesitiekuljetuksen sisältämän metsäpolttoaineiden hankinnan ja organisoinnin metsästä voimalaitokselle.

Metsäpolttoaineiden ja raakapuun vesitiekuljetuksen liiketoimintamahdollisuuksien kartoittamiseksi järjestettiin asiantuntijoiden ideariihä. Ideariihäen osallistui yhteensä kymmenen asiantuntijaa. Ideariihessä listattiin aluskuljetuksen kehittämisen viisi merkittävintä tehostamistoimen käyttöä estettä:

1. Lastauspaikkaverkoston kehittämiseen liittyvät esteet
2. Kuljetusten keskitetyn ohjausrjestelmän käytön esteet
3. Meno-paluu kuljetusten hyödyntämisen esteet
4. Kuljetusvolyymien kasvattamiseen liittyvät esteet
5. Ympärivuotisuuden käytön esteet

Lisäksi toteutettiin erillinen haastattelututkimus. Haastattelussa kartoitettiin pääasiassa raakapuun ja metsäpolttoaineiden sisävesillä tapahtuvien aluskuljetusten (proomukuljetukset) tehostamiskeinojen käytön esteitä sekä arvioitiin erilaisia liiketoimintamalleja.

Haastatteluun valittiin 14 kpl vesitiekuljetuslogistiikan parissa työskentelevää yrittäjää ja organisaatioiden asiantuntijaa. Haastattelut toteutettiin postikyselyinä. Haastatteluvastauksia palautui yhteensä 7 kpl. Vastausprosenttia (50 %) voidaan pitää hyvänä postikyselyssä ja riittävänä rajatussa asiantuntijatarkastelussa. Vastaushalukkuutta vähensi ilmeisesti kyselylomakkeen laajuus. Haastattelun suorittaminen henkilökohtaisina haastatteluina ei ollut mahdollista ajanpuutteen vuoksi. Myös tulosten luottamuksellisuus olisi tällöin kärsinyt.

Tehostamiskeinojen käytön esteiden merkittävyyttä tarkasteltiin eri liiketoimintamallien organisaatiovaihtoehdoissa tarkemmin. Tarkempaan analysointiin valittiin liiketoimintavaihtoehdoiksi nykyisenkaltainen urakointimalli, jota vertailtiin ulkoistamis- ja koordinoitumalliin (taulukko 4).

Taulukko 4. Tutkimukseen valittujen aluskuljetuksen sisältämien organisointivaihtoehtojen toimintamallit, joista urakointimalli edustaa olemassa olevaa vaihtoehtoa (baseline). (Palander 2007, Palander ym. 2006).

Organisaatiomalli	A. Urakointimalli	B. Ulkoistamismalli	C. Koordinoitumalli
Toimintatapa	Kuljetukset ovat täysin puunhankintaorganisaation käsissä. Kuljetussuoritteet ostetaan yleensä palveluna alusyrittäjiltä, mutta myös omat alukset tulevat kysymykseen. Vertailuvaihtoehto, joka vastaa ”perinteistä” aluskuljetuksen organisointitapaa.	Puunhankintaorganisaatio on siirtänyt aluskuljetuksen sisältämän logistiikan ulkoiselle toimittajalle. Toimittajalla on laaja ”vastuu” kuljetusten toteuttamisesta alueellisesti tai tiettyjä toimituspaikkoja koskien.	Kuljetuksen järjestelyt on siirretty ulkopuoliselle ohjaajalle tai ohjauskeskukselle. Ohjaajan käsissä voi olla muitakin kuljetusmuotoja sekä lastauspaikkojen hallintaa.
Sopimus pohja	Volyymiltaan yleensä pienet ja sisällöltään rajoitetut kuljetussopimukset, joissa kuljetusyrittäjän toimintavapaus on pieni.	Volyymiltaan suuret ja sisällöltään laajat kuljetussopimukset, joissa ulkoisen toimittajan vastuu ja vapaus on suuri.	Toiminta perustuu pitkäaikaisiin toimeksiantosopimuksiin.
Ohjaustapa	Puunhankintaorganisaatio ohjaa aluksia toimituskohteilta saamiensa aikataulujen ja varastotietojensa perusteella.	Ulkoinen toimittaja ohjaa aluksia puunhankintaorganisaatiolta saamansa toimitusaikojen ja varastotietojen perusteella.	Ulkopuolinen ohjaaja järjestee kuljetuksia toimeksiantajaltaan saamansa eri toimituskohteiden aikatauluja sekä varastomääriä koskevien tietojen perusteella.

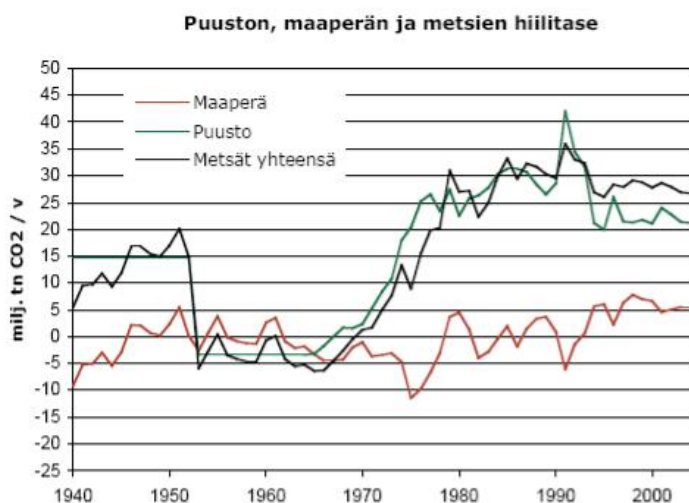
2.2.5 Logistiikkapäästöjen elinkaarilaskenta

Metsäpolttoaineiden käytön kasvattaminen on Suomelle tärkeä keino vastata ilmastonmuutoksen hillintään ja saada aikaan päästövähennyksiä. Suurimpia päästövähennyksiä saadaan, kun suurimittakaavaisissa lämpöä ja sähköä tuottavissa voimalaitoksissa korvataan fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla luonnonvaroilla. Päästövähennyksiä on mahdollista saavuttaa myös logistiikassa korvaamalla kaukaa kuljetettavia polttoaineita lähempänä polttolaitosta sijaitseviin polttoaineisiin. Päästövähennyksiä on mahdollista saavuttaa lisäksi kehittämällä logistiikkaa ja korvaamalla saastuttavampia kuljetusmuotoja. Päästötarkastelussa pitäisi kiinnittää huomiota koko toimitusketjun elinkaaren kokonaispäästöihin. Metsäpolttoaineen käyttö voi mahdollistaa päästövähennysten aikaansaamisen kaikissa ketjun osavaiheissa.

Metsillä ja puutuotteilla on kahtalainen merkitys ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksien hallinnassa. Ensinnäkin metsien ja puutuotteiden sisältämän biomassan kokonaisvarastoja voidaan lisätä niin, että saadaan aikaan hiilinielu ilmakehästä. Toiseksi puulla voidaan korvata energiaintensii-

visempiä materiaaleja tai fossiilisia polttoaineita, jolloin voidaan saada aikaan substitutio- eli korvaavuushyötyjä. (Valsta ym. 2006)

Suomen metsien puuvarat ovat jo 1970-luvun alusta lähtien kasvaneet vuotuista kokonaispoistumaa nopeammin. Suomen metsät toimivat hiilinieluna, puuston ja maaperän hiilitase huomiotuna (kuva 20). Suomen metsissä on tällä hetkellä enemmän puuraaka-ainetta kuin koskaan aikaisemmin. Valtakunnan metsien uusimpien inventointitietojen (VMI10) mukaisesti puuston kokonaistilavuus metsä- ja kitumaalla on 2176 milj. m³ (Korhonen ym. 2006). Puuston vuotuinen kasvu oli VMI10:n mittauksia edeltäneinä kasvukausina keskimäärin 97 milj. m³/a. Puun vuotuinen kokonaispoistuma, joka koostuu luonnonpoistumasta, viennistä, polttopuu- ja muusta energiakäytöstä sekä metsäteollisuuden raakapuun käytöstä, on noin 70 milj. m³. Tästä määrästä metsäteollisuus käytti vuonna 2006 noin 57 milj. m³. Polttopuuksi käytetään vuosittain noin 5 milj. m³. (Metsätilastollinen vuosikirja 2007)



Kuva 20. Kasvihuonekaasuraportoinnin mukaisesti laskettu metsien vuotuinen hiilitase 1940-2004 (Kareinen ym. 2008)

Kun vuotuinen kasvu ylittää noin kolmellakymmenellä miljoonalla kuutiolla kokonaispoistuman, vaikuttaisi lisähakkuiden mahdollisuuksia olevan runsaasti. Metsien talouskäyttöä rajoittavat kuitenkin monet tekijät, kuten metsien ikärakenne, suojelupäätökset, alueiden käytön suunnittelu, muut maankäyttötarpeet sekä vaikeat puunkorjuu- ja kuljetusolosuhteet. (Metsäteollisuuden... 2008)

Kareinen ym. (2007) ovat tutkineet hakkuutähteiden korjuun lisäämisen vaikutusta metsien kokonaishiilitaseeseen. Energiapuun korjuun vaikutus on melko vähäinen metsien kasvihuonekaasutaseeseen. Selitys vaikutuseroihin on se, että hakkuut vähentävät puuston tasetta, joka on metsien kasvihuonekaasutaseeseen ylivoimaisesti suurin tekijä. Energiapuun korjuu vaikuttaa ainoastaan maaperän varaston syötteeseen ja karike hajoaa metsissä joka tapauksessa.

Suomessa lämpötilan on ennustettu nousevan viidellä asteella seuraavan sadan vuoden aikana. Se kiihdyttäisi maaperän hajotustoiminnan yli puolitoistakertaiseksi nykyiseen verrattuna. Jotta tasapaino hiilivirtojen osalta säilyisi, pitäisi silloin metsien kasvun, kariketuotoksen ja maahan jätettävien hakkuutähteiden määrän myös puolitoistakertaistaa.

Puunkäyttö energiantuotannossa on määritelty päästökauppajärjestelmässä kasvihuoneneutraaliksi, joten poltosta aiheutuneita hiilidioksidipäästöjä ei tarvitse hyvittää päästöoikeuksina. Metsäpolttoaineiden poltossa vapautuva hiilidioksidi sitoutuu takaisin metsän kasvuun. Metsäpoltto-

aineilla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita, jolloin saavutetaan ilmastonmuutoksen ehkäisemisessä tärkeitä päästövähennyksiä.

Polttoaineen hiilidioksidin ominaispäästö osoittaa, kuinka paljon hiilidioksidia syntyy poltossa tuotettua energiayksikköä kohti. Eri polttoaineilla hiilidioksidin ominaispäästö on seuraava: maakaasu 203, raskas polttoöljy 278, kivihiili 340, turve 383 ja puulla 409 kg CO₂/MWh (KTM 2003) (taulukko 5).

Taulukko 5. Eräitten polttoaineiden tyypilliset teholliset lämpöarvot ja polton hiilidioksidin ominaispäästöt ja ominaispäästökertoimet (KTM 2003).

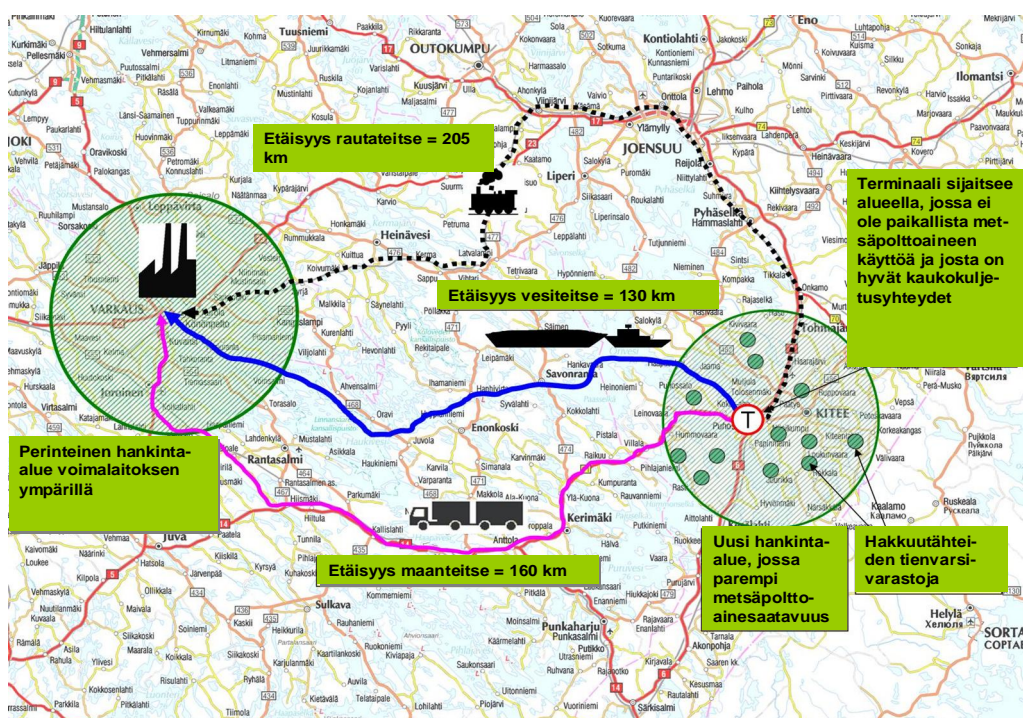
Ominaisuudet	Yksikkö	Kivihiili	POR	POK	Maakaasu	Turve	Polttohake*
Polttoaineen tehollinen lämpöarvo	[GJ/tn]	25,6	40,9	42,4	48,5	10,0	7,3
Syntyvä hiilidioksidimäärä	[kg CO ₂ /MWh _{pa}]	340	278	267	203	383	(409)
	[g CO ₂ /kg _{pa}]	2418	3157	3138	2732	1255	(824)
	[g CO ₂ /MJ _{pa}]	94	77	74	56	106	(114)

*) Polttohakkeen päästöt ilmoitettu suluissa, koska puu määritellään uusiutuvaksi luonnonvaraksi.

Puun käyttöketjussa syntyy lähes poikkeuksetta fossiilisia hiilipäästöjä eli puun käyttöketju lisää absoluuttisesti kasvihuonekaasupäästöjä (Pingoud & Lehtilä 2002). Substituutiosta onkin aina kyse suhteellisista päästövähennyksistä. Kasvihuonevaikutukseltaan edullisesta substituutiosta on kyse silloin, kun puutuoteketjun päästöt ovat pienempiä kuin sen korvaaman ketjun päästöt.

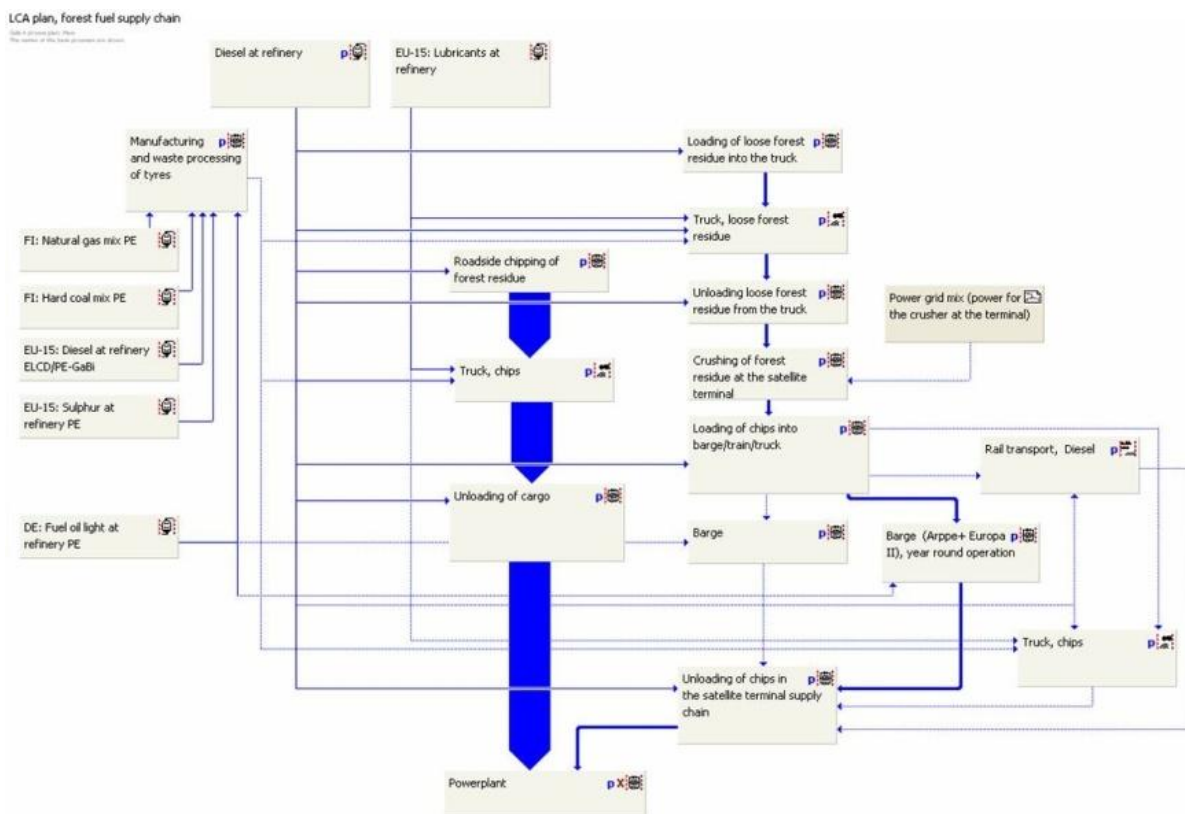
Metsäpolttoaineiden käytön kasvu keskitetyissä suurkäyttöpaikoissa kasvattaa logistiikan kuljetusmatkoja ja päästöjä. Logistiikkajärjestelmiä suunnittelemalla ja optimoimalla on mahdollista löytää ratkaisuja, jotka vähentävät kuljetusketjun päästöjä. Logistiikan päästövertailuissa pitää kiinnittää huomiota polttoaineena käytettävän materiaalin koko toimitusketjun välittömiin ja välillisiin päästöihin. Logistisen toimitusketjun välittömiä päästöjä ovat poltto- ja voiteluaineiden kulutus ja välillisinä päästöinä esimerkiksi kuljetuskaluston renkaiden valmistuksen päästöt. Puun korjuussa ja kuljetuksessa käytetään nestemäisiä poltto- ja voiteluaineita, joiden logistiikan polttoaineiden kulutuksen energiasisältö on aikaisemmissa tutkimuksissa ollut keskimäärin 3 % puun energiasisältöön suhteutettuna (Mälkki & Virtanen 2001, Hakkila 2004).

Logistiikan päästövertailussa vaihtoehtoisina logistiikkajärjestelminä vertailtiin perinteistä hankinta-alueen laajentamista tienvarsihaketuksen ja hakerekkakuljetusten avulla terminaalihaketusjärjestelmään ja kaukokuljetukseen vaihtoehtoisilla kuljetusmuodoilla. Tavoitteena oli selvittää perinteisen hankintajärjestelmän rajakuljetusetäisyys, kun tarkastellaan logistiikan päästöjä ja vertaillaan terminaalihaketukseen ja vaihtoehtoisin kaukokuljetusmuotoihin. (kuva 21)



Kuva 21. Perinteinen ja vaihtoehtoinen hankintamenetelmä tapaustarkastelussa. Pohjakartta © Affecto Finland Oy, Lupa L7688/08

Logistiikan päästölaskentaa varten toteutettiin elinkaarilaskennan simulointimalli Gabi – ohjelmistolla (kuva 22). Mallin lähtötiedot pohjautuivat kuljetuskokeilujen, asiantuntija-arvioiden ja LCA –ohjelmiston tietopankin oletusarvoihin. Laskentamallissa otettiin huomioon myös renkaiden kulumisesta johtuvat välilliset päästöt. Lähtötiedoilla laskettiin myös välittömiä polttoaineen kulutuksen mukaisia päästövertailuja EXCEL-laskentana.



Kuva 22. Gabi –elinkaarilaskentaohjelmistoon rakennettu päästölaskentamalli vesitiekuljetuksen sisältämälle hankinnalle. Nuolien koko edustaa kuljetusvirran määrää eri kuljetusketjuissa.

2.3 Kuljetusvirrat

Kuljetusvirrat tutkimusosiossa selvitettiin metsäpolttoaineiden kysyntää ja tarjontaa Itä-Suomessa sekä arvioitiin tulevien kuljetusvirtojen kehitystä ja painottumista nykyisten ja suunnitteilla olevien käyttöpaikkojen suhteen. Tutkimusosiossa tehtiin metsäpolttoaineiden saataavuustarkastelu Vuoksen vesistöalueen mahdollisiin lastauspaikkoihin.

2.3.1 Metsäpolttoaineiden kysyntä

Metsäpolttoaineilla voidaan edistää uusiutuvien luonnonvarojen osuutta sähkön ja lämmön tuotannossa ja korvata fossiilisten polttoaineiden aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä (Helynen ym. 2002). Suurin metsäpolttoaineiden käytön lisäysmahdollisuus on teollisuuden ja kaukolämmön sähköä ja lämpöä tuottavissa laitoksissa (CHP-laitokset) (Asplund ym. 2005). Kuluneen vuosikymmenen aikana merkittävin suhteellinen kasvu puuperäisten polttoaineiden käytössä on tapahtunut metsäpolttoaineiden käytössä. Jatkossa metsähakkeen käytön odotetaan edelleen lisääntyvän merkittävästi, etenkin jos korjuukustannuksia pystytään alentamaan, hakkeelle muodostuu tuotantoa kannustava hinta ja metsien ravinnetilaan aiheutuvat muutokset pystytään ratkaisemaan (Hetemäki ym. 2006). Metsähakkeen tuotannon pitää olla kilpailukykyistä sille vaihtoehtoisten polttoaineiden energiayksikkökustannuksiin nähden. Metsähakkeelle vaihtoehtoisia polttoaineita ovat fossiiliset polttoaineet öljy ja kivihiihi, hitaasti uusiutuva turve sekä puuperäiset sivutuotteet, joiden saatavuus kytketty metsäteollisuustuotantoon.

Metsäpolttoaineilla tarkoitetaan metsästä suoraan energiantuotantoon kerättävää ja jalostettavaa metsäbiomassaa (ei sisällä polttopuita). Metsäpolttoaineiden käyttö vuonna 2007 lämpö- ja voimalaitosten oli 2,7 milj. m³/a (5 TWh). Lämpö- ja voimalaitosten lisäksi metsähaketta käytetään myös pientalojen lämmityksessä, vuosittain noin 0,4 milj. m³. Yhdessä lämpö- ja voimalaitosten käyttämän metsähakkeen kanssa kokonaiskäyttö ylsi vuonna 2007 kaikkiaan 3,0 milj. m³:iin (Ylijoki 2008). Metsähakkeen tuotantoa on Suomessa tavoitteena nostaa 5 milj. m³/a (10 TWh) vuoteen 2010 mennessä, 8 milj. m³/a (16 TWh) vuoteen 2015 mennessä ja 10 milj. m³/a (20 TWh) vuoteen 2025 mennessä (MMM 2006, Arvio biomassan... 2007). Taloudellisesti kannattavilla investoinneilla metsähakkeen käyttöä on arvioitu voitavan kasvattaa n.12 milj.m³/a vuoteen 2020 mennessä (Helynen ym. 2007).

Kiinteitä puupolttoaineita käytettiin lämpö- ja voimalaitoksissa vuonna 2007 kaikkiaan 13,0 milj.m³. Kiinteiden puupolttoaineiden energiasisältö oli 25 terawattituntia (TWh), kolmannes kaikesta puuenergiasta ja 6 prosenttia kaikkien energialähteiden kokonaiskulutuksesta. Merkittävin kiinteä puupolttoaine oli kuori, jota vuonna 2007 käytettiin 7,5 milj. m³, lähes 60 prosenttia kaikista kiinteistä puupolttoaineista. Erilaisten puupurujen, -lastujen ja -pölyjen käyttö oli 1,7 milj. m³ ja lähinnä saha- ja levyteollisuuden jätetuusta koostuvan puutähdehakkeen 0,9 milj. m³. Kierrätyspuuta poltettiin 0,3 milj. m³ ja puupellettejä ja -brikettejä 42 000 tonnia. (Ylitalo 2008)

Metsähakkeen keskimääräinen hinta ilman arvonlisäveroa toimitettuna käyttöpaikalle oli keskimäärin 15,4 €/MWh (kesäkuu 2008) (Bioenergia-lehti 2008). Hakkuutähteet ovat edelleen metsähakkeen merkittävin raaka-aine, sillä liki 60 prosenttia lämpö- ja voimalaitosten käyttämästä metsähakkeesta valmistetaan avohakkuualueilta kerättävästä oksa- ja latvusmassasta. (Ylitalo 2008)

Itä-Suomen alueen metsäbiomassan käyttöarvio suurvoimalaitoksissa perustuu käyttöpaikka- ja asiantuntija-arvioihin käyttömäärien kehityksestä (taulukko 6). Stora Enso Oyj. ja Neste Oil Oyj. ovat ilmoittaneet biodieselin koelaitoksen perustamisesta Varkauteen ja mahdollisen teollisen mittakaavan laitoksen toteuttamisesta. Myös metsäbiomassaa käyttäviä uusia suurinvestointeja on tekeillä Lappeenrannassa ja Kuopiossa. Itä-Suomen ulkopuolella sijaitsevat kaupungit ovat

ilmoittaneet suurinvestoinneista ja Jyväskylän Keljonlahteen rakennettava voimalaitos tarvitsee arviolta 600 GWh metsäbiomassaa, joka tuplaisi nykyisen metsähakkeen käyttömäärän vuodesta 2010 alkaen. Nykyisten CHP-voimalaitosten oletetaan lisäävän metsäbiomassan käyttömääriä päästökaupan ja teknologisen edistymisen johdosta.

Taulukko 6. Metsähakkeen ja kantomurskeen käyttömäärien arvio Itä-Suomen suurkäyttöpaikoilla 2007-2025.

	Vuosi				
	2007	2010	2015	2020	2025
Itä-Suomi	GWh				
Mikkeli	250	360	500	500	500
Joensuu	155	300	600	600	600
Varkaus*	80	300	300	2000	2000
Savonlinna	70	100	120	120	120
Imatra	50	100	150	150	150
Simpele	20	100	100	100	100
Outokumpu	20	20	20	20	20
Iisalmi	20	20	20	20	20
Lappeenranta	0	0	600	600	600
Kuopio	0	0	300	300	300
Yhteensä	665	1300	2710	4410	4410

* Biodieselin mahdollinen tuotantolaitos Varkaudessa, jolloin käyttömäärä kasvaisi vuoden 2015 jälkeen

Fossiilisten polttoaineiden hintataso on noussut, mikä osaltaan nostaa markkinalähtöisesti maksukykyä myös vaihtoehtoisista biopolttoaineista. Biopolttoaineiden ja bioenergian tuotannon maksukykyä on pyritty parantamaan kansainvälisillä sopimuksilla (päästökauppa) sekä erilaisilla kansallisilla ohjaukeinoilla (käyttövelvoitteet, vihreät sertifikaatit, syöttötariffit, investointituet, korjuutuet ym.). Suomen metsäpolttoaineiden markkinoilla ei käytetä kaikkia edellä mainittuja ohjaukeinoja, vaan käytännön maksukykyyn vaikuttaa lähinnä investointituet, päästökauppa, sähköntuotantotuki ja Kemera-tuet.

Päästökauppa ohjailee suuria voimalaitoksia tuottamaan lämpöä ja sähköä hiilidioksidineutraaleilla polttoaineilla siellä, missä sen tuottaminen on kustannustehokkaampaa fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna. Päästökauppa nostaa esimerkiksi kivihiilen tai turpeen hintatasoa, jolloin vaihtoehtoisten polttoaineiden suhteellinen maksukyky paranee. Laskennallinen vaikutus ei ole kuitenkaan siirtynyt suoraan puupolttoaineiden hintoihin. Erilaisilla tukimuodoilla on mahdollista lisätä biopolttoaineiden käyttöä, mutta ohjaukeinot saattavat myös vääristää alueellista kilpailua ja biomassan markkinatasapainoa materiaali- ja energiakäytön välillä.

Eräissä Euroopan maissa voimalaitosten biopolttoaineesta maksukyky on huomattavasti Suomen voimalaitoksia korkeampi johtuen huomattavan korkeasta tuotantotuesta uusiutuvilla energialähteillä tuotetulle sähkölle. Itämeri helpottaa biopolttoaineiden liikkuvuutta, ja alueelle ovatkin muodostuneet nopeasti kasvavat biopolttoaineiden markkinat. On selvästi näkyvissä, että investointeja tehdään ja biopolttoaineita myydään niihin maihin, joissa on lähtömaata oleellisesti parempi maksukyky. Suomen energian tuotannon omavaraisuuden näkökulmasta tämä uhkakuva voi toteutua, jos Suomessa ei lisätä tukitoimia ja mikäli päästöoikeuksien ja fossiilisten polttoaineiden hinnat pysyvät suhteellisen matalina. (Helynen ym. 2007)

Turvetta käytetään useimmissa puupolttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa sen vakaan saataavuuden, laadun ja hinnan takia. Energialaitosten puustamaksukyky muodostuu juuri turpeen muodostaman referenssihinnan perusteella, joka kertoo enimmäismäärän, mitä laitos on valmis maksamaan puupolttoaineesta. Energialaitosten teoreettinen puustamaksukyky määräytyy tur-

peen verottoman hinnan, turpeen veron, puun saaman sähköntuotannon tuen ja päästöoikeuden hinnan perusteella (KTM 2005a, KTM 2005b). (taulukko 7)

Taulukko 7. Laskentaesimerkki metsähakkeen puustamaksukyvystä (Pöyry Energy Oy 2008).

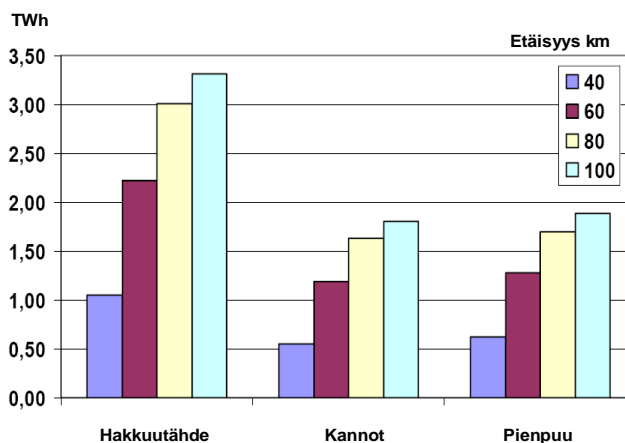
Jyrsinturpeen laitoshinta (Pöyry, 50 km, joulukuu 2007)	8,40 €/MWh
Päästökaupparasite, 11.1.2008	
Päästöoikeuden hinta (Nordpool 11.1.2008) 23 €/t _{CO2}	
Jyrsinturpeen päästökerroin (Tilastokeskus) 105,9 g _{CO2} /MJ	
105,9 g _{CO2} /MJ = 0,38124 t _{CO2} /MWh	
0,38124 t_{CO2}/MWh * 23 €/t_{CO2} = 8,77 €/MWh	8,77 €/MWh
Sähköntuotantotuki	
Metsähakkeella tuotetun sähkön tuki 6,9 €/MWh _e	
Sähköteho 25 MW _e	
Polttoaineteho 100 MW	
6,9 €/MWh_e * 25 MW_e / 100 MW	1,73 €/MWh
Metsähakkeesta maksukyky laitoksella	18,90 €/MWh

2.3.2 Metsäpolttoaineiden tarjonta

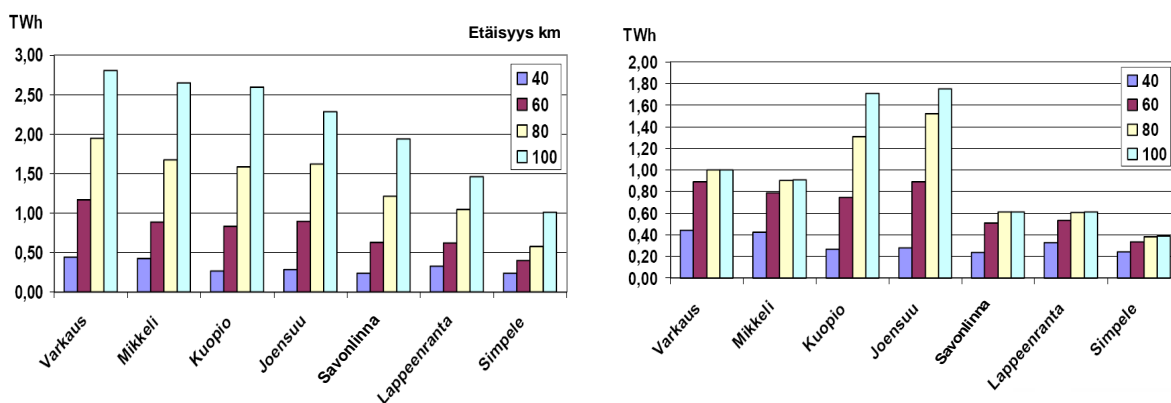
Metsäpolttoaineiden teoreettiseksi vuosittaiseksi potentiaaliksi Suomessa on arvioitu suuruusluokaltaan 45 milj. m³ (90 TWh). Teoreettinen potentiaali sisältää kaiken runko- ja latvabiomassan, jotka ainespuun ja metsänhoidollisten hakkuiden yhteydessä jäisivät metsään ilman energiaa käyttöä. (Hakkila 2004) Mikäli hakkuut kasvavat, myös metsäpolttoaineiden teoreettinen potentiaali kasvaa. Metsävarat ja niiden kasvu osoittavat kokonaisuudessaan nykyistä suuremman käyttöpotentiaalilin (Hetemäki ym. 2006).

Käytännössä vain osa metsäpolttoaineiden teoreettisesta potentiaalista on hyödynnettävissä. Käyttöä rajoittaa tekniset, taloudelliset, ekologiset sekä metsien monikäytön ja omistusrakenteen mukaiset rajoitteet. Suomen metsäpolttoaineiden teknistaloudelliseksi potentiaaliksi on arvioitu 15 milj.m³ (30 TWh) (Hakkila 2004). Arviot teknistaloudellisesta potentiaalista vaihtelevat sen mukaan minkälaisia rajoitteita laskentamenetelmissä käytetään ja mikä on ainespuun hakkuumäärä ja –tapa tulevaisuudessa. Päästökauppa, tuet ja fossiilisten polttoaineiden kallistuminen sekä teknologian kehittyminen lisäävät maksukykyä metsäpolttoaineista ja teknistaloudellista potentiaalia.

Metsäpolttoaineiden saatavuutta on arvioitu Vuoksen vesistöalueella sijaitseviin voimalaitoksiin Itä-Suomessa. Itä-Suomen ja Vuoksen vesistöalueen vaikutusalue koostuu neljästä metsärikkaasta maakunnasta; Etelä-Savo, Pohjois-Savo, Pohjois-Karjala ja Etelä-Karjala. Metsäpolttoaineiden maksimaalinen teknistaloudellinen saatavuus allokoituna Itä-Suomen alueen suurvoimalaitoksille 100 km kuljetusetäisyydeltä on arvioitu olevan 7 TWh/a, joka jakautuu hakkuutähteisiin 3.3 TWh (47 %), kantoihin 1.8 TWh (26 %) ja pienpuuhun 1.9 TWh (27 %) (kuva 23) (Ranta & Korpinen 2007). Paikkatietokohtaiset saatavuustarkastelut voidaan erotella jyvitettyihin ja jyvittämättömiin käyttöpaikkakohtaisiin laskelmiin. Jyvitettyissä laskelmissa otetaan huomioon alueellinen käyttö, joissa metsähakkeen oletetaan menevän ensisijaisesti lähimmälle käyttöpaikalle. (kuvat 24)



Kuva 23. Metsäbiomassan teknistaloudellinen saatavuus Itä-Suomessa eri kuljetusetäisyyksiltä suurvoimalaitoksille. (Ranta & Korpinen 2007)



Kuvat 24. Jyvittämätön saatavuus (vasen) ja jyvitetty saatavuus (oikea) CHP-laitoksille Itä-Suomessa. (Ranta & Korpinen 2007)

Mahdolliset suunnitteilla olevat suurinvestoinnit lämpö- ja voimalaitoksiin, pelletin tuotantoon sekä biodieselin tuotantoon metsäbiomassoista voivat kasvattaa alueen kysynnän tarjontaa suuremmaksi. Lisäksi metsäpolttoaineita käytetään kasvavassa määrin myös paikallisesti pienkiinteistöjen lämmitykseen. Metsäpolttoaineiden kustannukset vaihtelevat keskimäärin 8,8 – 13,6 €/MWh välillä riippuen lähinnä metsäpolttoaineesta ja kuljetusetäisyydestä (Ranta & Korpinen 2007).

Kuitupuu raaka-aineessa on erittäin suuri potentiaali energian tuotantoon, sellu- ja paperituotannon sijaan. Tilanne on mahdollinen, jos maksukyky puupolttoaineesta kasvaa korkeammaksi kuin maksukyky metsäteollisuuden raaka-aineesta. Tähän tilanteeseen johtaisivat samanaikainen fossiilisten polttoaineiden suuri hinnannousu ja samanaikainen metsäteollisuuden tuotteiden hinnan lasku (Helynen ym. 2007). Puustamaksukyky voidaan tulkita korkeimmaksi hinnaksi, joka raaka-aineesta on kannattava maksaa.

Kun polttoaineiden saatavuus ja kannattava kuljetusetäisyys on rajallinen, syntyy voimalaitosten ympärille eri metsäpolttoaineille eri säteisiä hankinta-alueita. Hakkuutähdehakkeen hankinta on ollut edullisinta, joten sitä on kannattavaa kuljettaa kauempaa. Tietyntä hankintaetäisyyden ja kustannusrajan ylityttyä on kannattavampaa hankkia nuorten metsien pienpuuta tai kantoja lähempää voimalaitosta sen sijaan, että hakkuutähteiden hankinta-alueita laajennettaisiin. Kaukokuljetusmuotoja kehittämällä voitaisiin kasvattaa hankintaetäisyyksiä kauempaa tuotaville metsäpolt-

toaineille. Metsäpolttoaineen kustannusrakenteen ja käyttöpaikkahinnan tulee kuitenkin olla kilpailukykyinen vaihtoehtoisten polttoaineiden suhteen.

Metsäbiomassan kuljetukset hoidetaan nykyisin pääasiassa maantiekuljetuksina (hakerekka ja irtorisuauto). Tulevaisuudessa kuljetusmatkojen pidentymisen seurauksena osa metsäbiomassasta kulkee terminaalien kautta muilla kaukokuljetusmuodoilla. Kaukokuljetusmuodoista rautatie- ja vesitiekuljetukset tulevat todennäköisesti kasvattamaan osuuttaan (taulukko 8).

Taulukko 8. Kuljetusmuotojen prosenttiosuuksina on käytetty seuraavia arvioita (Kärhä 2007).

Kuljetusmuoto	Vuosi			
	2010	2015	2020	2025
Maantie	100	95	90	85
Rautatie	0	2.5	5	7.5
Vesitie	0	2.5	5	7.5

2.3.3 Saatavuustarkastelu

Päätihakkuista saatavan hakkuutähdehakkeen laskennan lähtöaineiston tarkkuutena on leimikkotason paikkatieto. Leimikkoaineisto on koottu metsäteollisuuskonsernien (UPM-Kymmene, Metsäliitto, Stora Enso) luovuttamasta päätihakkuuaineistoista vuosilta 2002-2004. Aineiston on arvioitu soveltuvan käytettäväksi laskennan pohjaksi. Hakkuupinta-alojen suhteen ei ole tapahtunut eikä odoteta tapahtuvan merkittävää muutosta eikä rakenne puulajisuhteiden osalta ehdi tarkasteluajalla juurikaan muuttua.

Leimikkoaineisto sisältää paikkatiedon (koordinaatit yhteiskoordinaatiossa) sekä leimikkoon sisältyviä ominaisuustietoja, kuten hakkuutapa, korjattu ainespuumäärä puulajeittain, korjuuajan-kohta, korjuukelpoisuus, metsäkuljetusmatka ja hakkuuala. Metsäyhtiöiden leimikkoaineistoa on täydennetty paikallisilla päätihakkuutiedoilla, jotka perustuvat hakkuutilastoihin (Metinfo).

Hakkuutähdehakkeelle on laskettu aluksi teoreettinen potentiaali. Teoreettinen potentiaali perustuu ainespuun päätihakkuuiden yhteydessä syntyviin hakkuutähdemääriin, joista on arvioitu talteensaantoprosentiksi 65 %. Talteensaanto ottaa huomioon myös varastohävikin. Teoreettisesta potentiaalista on päästy teknistaloudelliseen potentiaaliin rajaamalla pois osa leimikkokohteista, joko liian pienen kertymän, liian pitkän metsäkuljetusmatkan tai muiden kohteiden hyödynnettävyyttä alentavien tekijöiden vuoksi.

Kantomurskeen saatavuuslaskelmat tehdään samoin kuin hakkuutähteellä, mutta käytetään kantojen korjuuseen soveltuvia rajoitteita. Talteensaantoprosentti 95 % on arvioitu korkeammaksi kuin hakkuutähteellä. Kantojen teknis-taloudellista potentiaalia heikentävät kuitenkin useat tekijät. (taulukko 9)

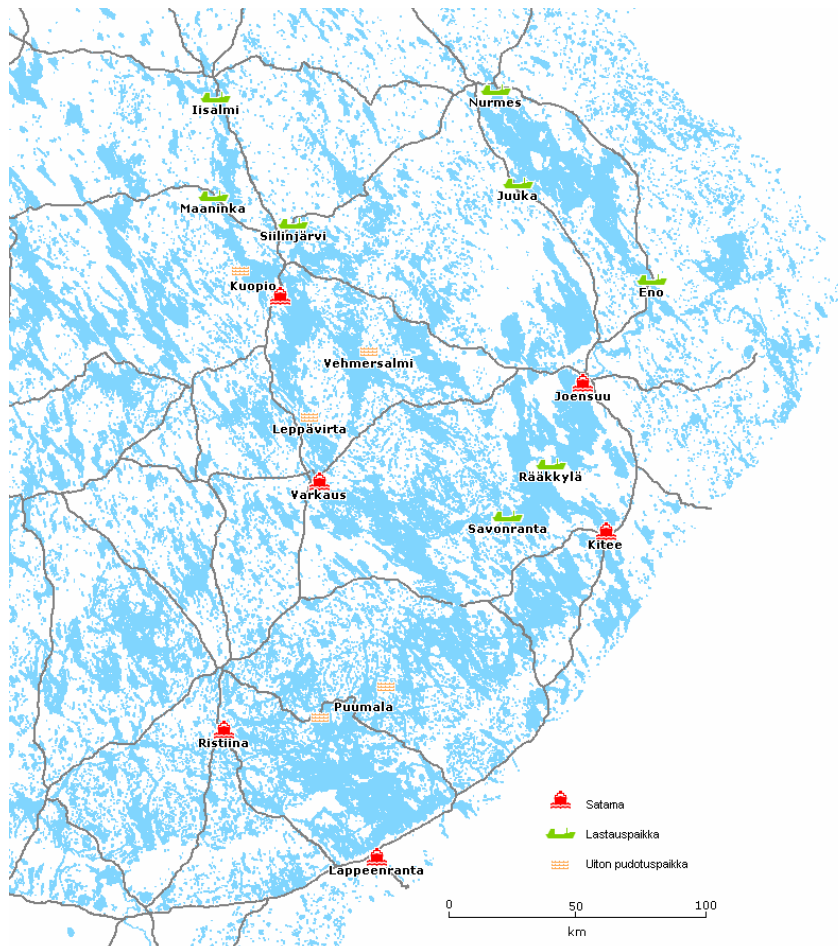
Taulukko 9. Teknis-taloudelliset leimikkorajoitteet hakkuutähteelle ja kannoille.

Rajoitteet	Hakkuutähde	Kannot
Ainespuu poistuma, m ³	≥ 200	≥ 200
Ainespuu poistuma, m ³ /ha	≥ 150	≥ 150
Metsäbiomassa kertymä, m ³	≥ 40	≥ 45
Metsäkuljetusmatka, m	≤ 400	≤ 400
Kuusivaltaisuus, %	≥ 45* ja 50**	≥ 45* ja 50**
Korjuukelpoisuus	Kaikki	Ei talvikorjuukelpoiset

* Kun leimikko sisältää kahta puulajia

** Kun leimikko sisältää useampaa puulajia

Saatavuustarkastelu toteutettiin lastauspaikoille, joiksi valittiin satamia, muita lastauspaikkoja ja uiton pudotuspaikkoja, jotka voisivat soveltua metsäpolttoaineiden lastaus- ja terminaalipaikoiksi (19 kpl) (kuva 25). Lastauspaikat pyrittiin valitsemaan myös siten, ettei 30 km hankintasäde menisi liikaa päällekkäin toisten lastauspaikkojen kanssa. Alueen nykyistä tai ennustettua metsähakkeen käyttöä eikä lastauspaikkojen mahdollista päällekkäisyyttä ole otettu tässä tarkastelussa huomioon. Voimalaitosten käyttö rajoittaa metsäbiomassan saatavuutta laitosten lähellä sijaitseviin lastauspaikkoihin, koska potentiaalinen voidaan olettaa menevän ensisijaisesti paikallisen voimalaitosten käyttöön. Voimalaitoksen metsäpolttoaineiden käyttömääristä ja saatavuudesta riippuu, onko metsäbiomassasta alueella yli- vai alijäämää.



Kuva 25. Saatavuustarkasteluihin valittujen satamien, lastauspaikkojen ja uiton pudotuspaikkojen sijainnit Vuoksen vesistöalueella. Pohjakartta © Affecto Finland Oy, Lupa L7688/08

3 TULOKSET

3.1 Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet

3.1.1 Suurproomuketju

Hakkuutähdehakkeen keskimääräinen kosteus suurproomuketjun kuljetuskokeiluissa (syyskuu, 2007) vaihteli 36,4 – 40,6 %:n välillä otannasta riippuen (taulukko 10). Keskimääräinen kosteusprosentti ensimmäisen kuljetuskokeilun loppumittauksessa oli 38,5 %. Kosteusnäytteitä otettiin myös leimikkoeräkohtaisesti haketuksen yhteydessä. Haketusyrittäjän ottamien näyte-erien keskiarvo oli ensimmäisessä kuljetusketjussa 36,4 % ja valikoiduista leimikkoeristä otettujen erikoismittausten (Metla) näyte-erien keskiarvo oli 39,3 %. Keskimääräinen kosteusprosentti toisen kuljetuskokeilun loppumittauksessa oli 39,2 % ja leimikkoeräkohtaisten näyte-erien keskiarvo oli 40,6 %.

Taulukko 10. Hakkuutähdehakkeen kosteusnäytteet.

Leimikko- numero	1. Kuljetus			2. Kuljetus	
	Yrittäjän näyte-erät	Metlan näyte-erät	Loppu- näytteet	Yrittäjän näyte-erät	Loppu- näytteet
1		43,1		37,5	
2		45,6		37,9	
3		37,8		37,1	
4	34,6	35,9		43,3	
5	36,9	38,0		34,2	
6	36,9			50,9	
7	31,9	34,6		43,5	
8	42,0				
9	35,1				
10	35,7	40,0			
11	37,9				
Keskiarvo	36,4	39,3	38,5	40,6	39,2

Puun energiasisältö määritettiin kuiva-ainepainon perusteella. Puun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vaihtelee 18,5 – 20 MJ/kg välillä (Alakangas 2000). Laskennassa käytettiin arvoa 20 MJ/kg.

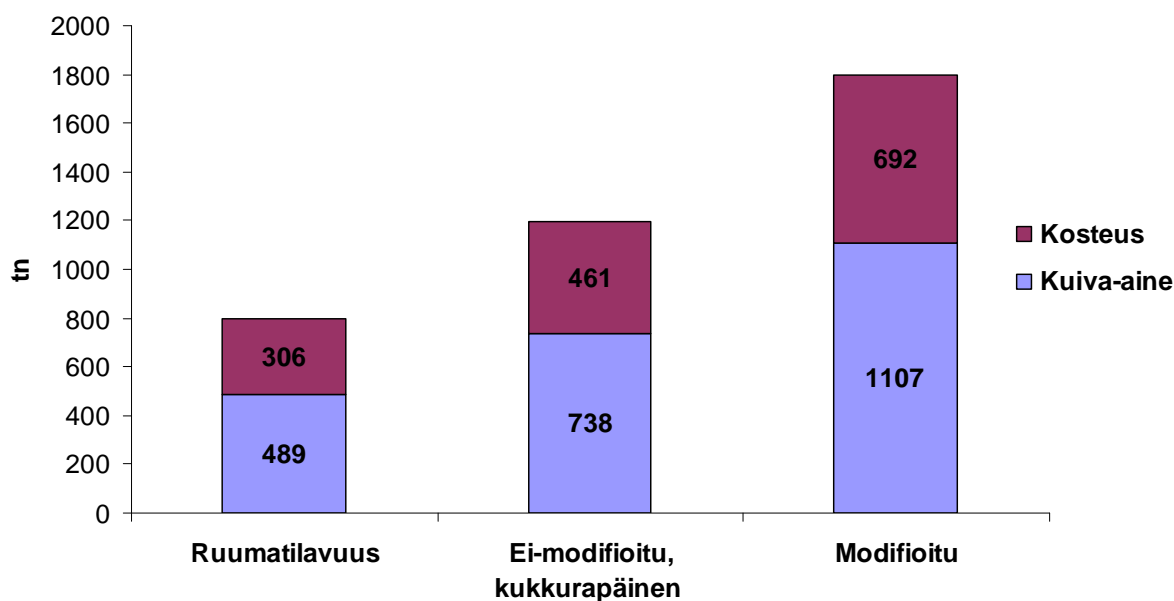
Kuljetuskokeilujen yhteydessä otettiin haketuksen jälkeen hakenäytteet palakokoanalyysiä varten. Näytteen annettiin kuivua huoneen lämmössä, jonka jälkeen hakepalat jaoteltiin pisimmän mitan mukaan eri luokkiin ja punnittiin osioiden suhteelliset painot. Hakkuutähdehakkeen näytteen kokonaismassa oli 880 grammaa. Massajakauman perusteella 82 % näytteen palasista oli alle 10 cm:n kokoisia. Näyte-erä täyttäisi laatuluokan P100 (Koneyrittäjä-lehti 6/2008).

Suurproomuketjun kuljetuskokeiluissa testattiin sekä tienvarsihaketuksen että terminaalihaketuksen perustuvaa menetelmää ennen proomukuljetusta. Haketusjärjestelmien vertailuun valittiin erilaisia leimikkokohteita normaalin käytännön mukaisesti olosuhteet huomioon ottaen (2 x 11 kpl). Tienvarsihaketuksen valikoitui keskimääräistä suurempia leimikoita (ka. 4 ha) pitemmiltä kuljetusetäisyyksiltä satamaterminaalista (ka. 36 km). Terminaalihaketuksen valikoitui keskimääräistä pienempiä leimikoita (ka. 3 ha) lyhyemmiltä kuljetusetäisyyksiltä satamaterminaalista (25 km).

Kuljetuskokeilussa käytetyn proomumallin (Eurooppa IIa) lastikapasiteetti metsähakkeelle vaihtelee modifiointi- ja tiiviysasteen mukaan. Ensimmäisessä kuljetuskokeilun tilavuudeksi saavu-

tettiin lastiruuman tilavuus eli 2650 kehys-m³ ja toisen kuljetuskokeilun tilavuudessa päästiin kukkuralastilla 3325 kehys-m³. Näistä mitatuista ja todetuista arvoista johdettiin yksikkötunnukset.

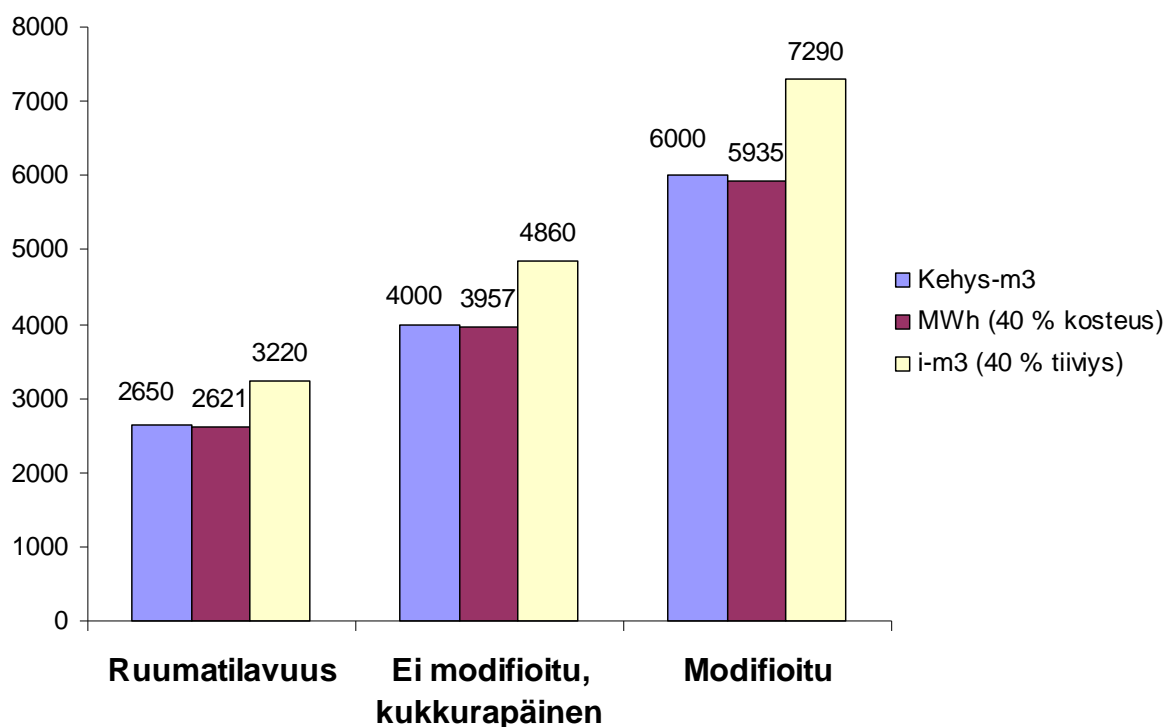
Hakkuutähdehakkeen lastipaino oli ensimmäisessä kuljetuskokeilussa 794 tn (38,5 % kosteus). Tämän perusteella laskettiin maksimi lastikapasiteetiksi kukkurapäiselle lastille 1200 tn (~4000 kehys-m³) ja modifioidulle proomumallille 1800 tn (~6000 kehys-m³). (kuva 26)



Kuva 26. Eurooppa II a –proomumallin lastikapasiteetti metsähakkeelle kuljetuskokeilujen ja proomutilavuuksien perusteella

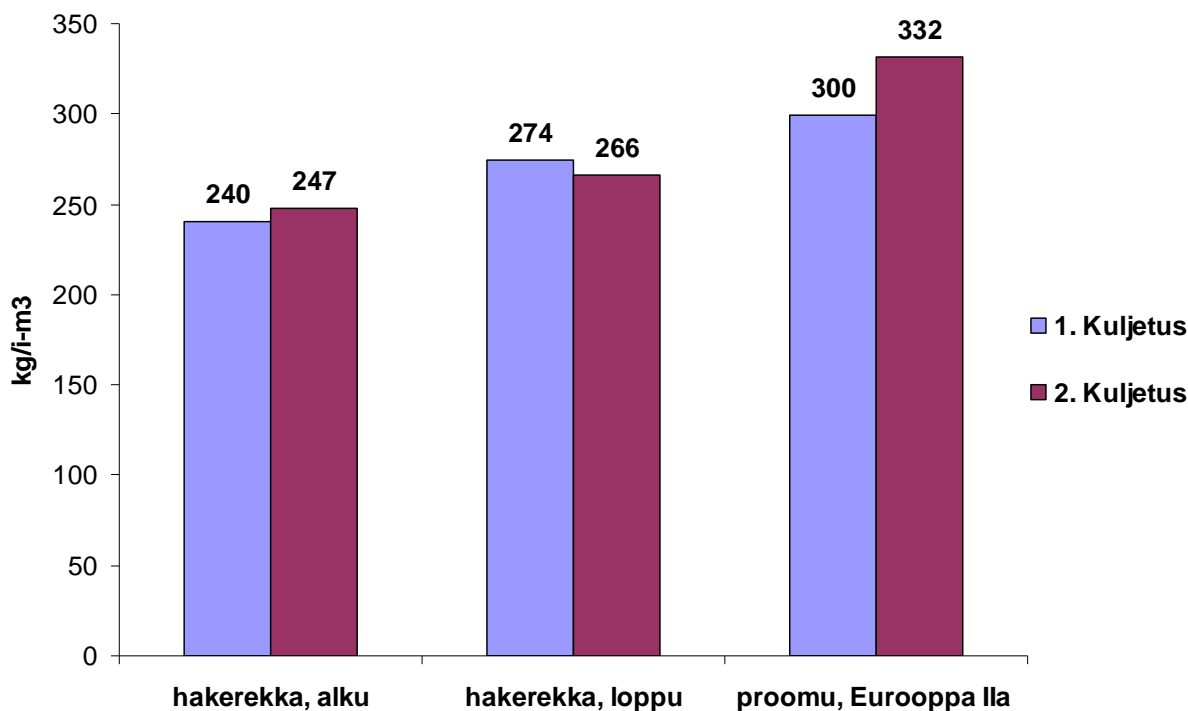
Toisessa kuljetuskokeilussa pyrittiin muodostamaan kukkurapäistä maksimilastia ja lastia tiivistettiin ajamalla pienkoneella (Bobcat, 4,7 tn) lastin päällä koko lastauksen ajan. Kukkuralasti saatiin muodostettua oikeaan muotoon ja korkeuteen ruumalastin päälle, mutta tilavuudesta jäi käyttämättä osa materiaalin loppumisen vuoksi. Lastipaino oli 1102 tn (kosteus 39,2 %), kun proomun tilavuudesta oli käytettynä 3325 kehys-m³. Tiivistyskokeilulla saatiin näin ollen lisättyä lastikapasiteettia 10 % verrattuna ensimmäiseen tiivistämättömään kuljetukseen.

Kuljetuskokeilujen keskiarvojen perusteella (tiivistetty ja tiivistämätön) kukkurapäiseen lastiin saataisiin 4000 MWh energiasisällön verran metsähaketta (~40 % kosteus). Hakerekkujen keskimääräisten ajojen perusteella kukkurapäiseen lastiin saataisiin 4860 i-m³ metsähaketta, joka vastaa 40 kpl hakerekkakuljetusta (120 i-m³). (kuva 27)



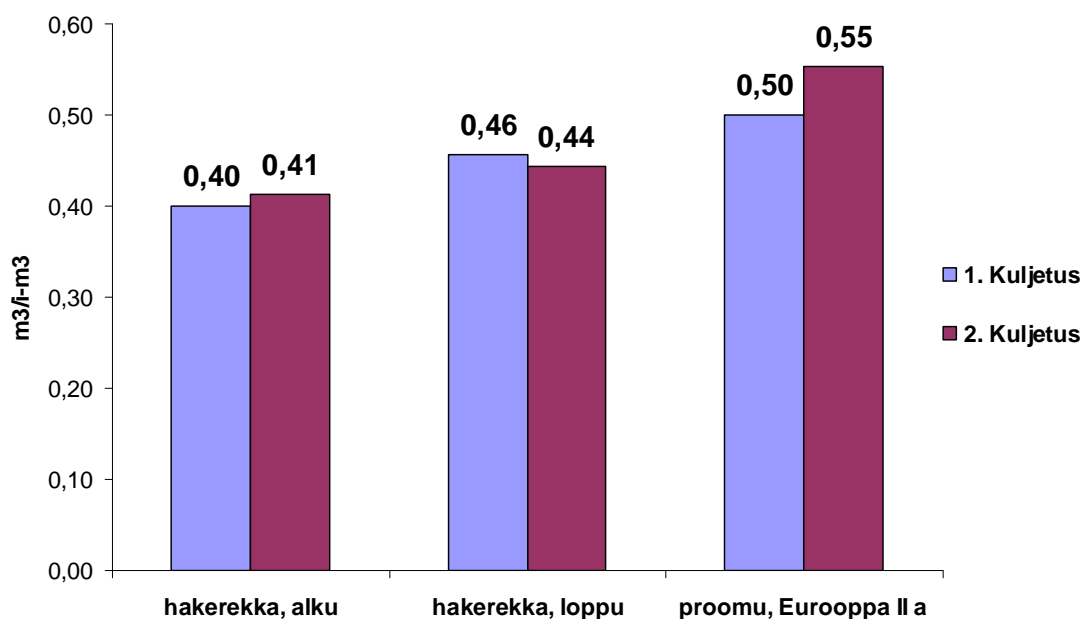
Kuva 27. Eurooppa Ila –proomumallin lastikapasiteetti metsähakkeelle kuljetuskokeilujen keskiarvojen ja proomun kehys-m³ perusteella. Yksikköinä sekä MWh että irto-m³ (= hakerekköjen keskiarvojen summa).

Kuljetuskokeiluissa proomun suuren lastikapasiteetin vaikutuksia tilavuuspainoihin, lastitiiviyteen ja energiatiheyteen vertailtiin hakerekköjen vastaaviin yksikköarvoihin. Hakerekköjen tilavuuspainot hakkuutähdehakkeelle vaihteli lastausmenetelmän mukaan. Alkukuljetuksessa satalaiturille lastaus tapahtui suoraan mobiilihakkurista hakerekköihin (120 kehys-m³) ja tilavuuspaino oli keskimäärin 244 kg/i-m³. Hakerekan loppukuljetuksella tarkoitettiin kuljetusta purkuterminaalista voimalaitoksen vastaanottoon. Loppukuljetuksessa lastaus tapahtui materiaalinkäsittelykoneilla tilavuudelta suuriin hakerekköihin (140 kehys-m³) ja tilavuuspainoksi muodostui keskimäärin 270 kg/i-m³. Proomukuljetuksissa tilavuuspainoksi muodostui ensimmäisessä kuljetuskokeilussa 300 kg/i-m³ ja toisessa tiivistyskokeilun mukaisessa kuljetuksessa 332 kg/i-m³. (kuva 28)

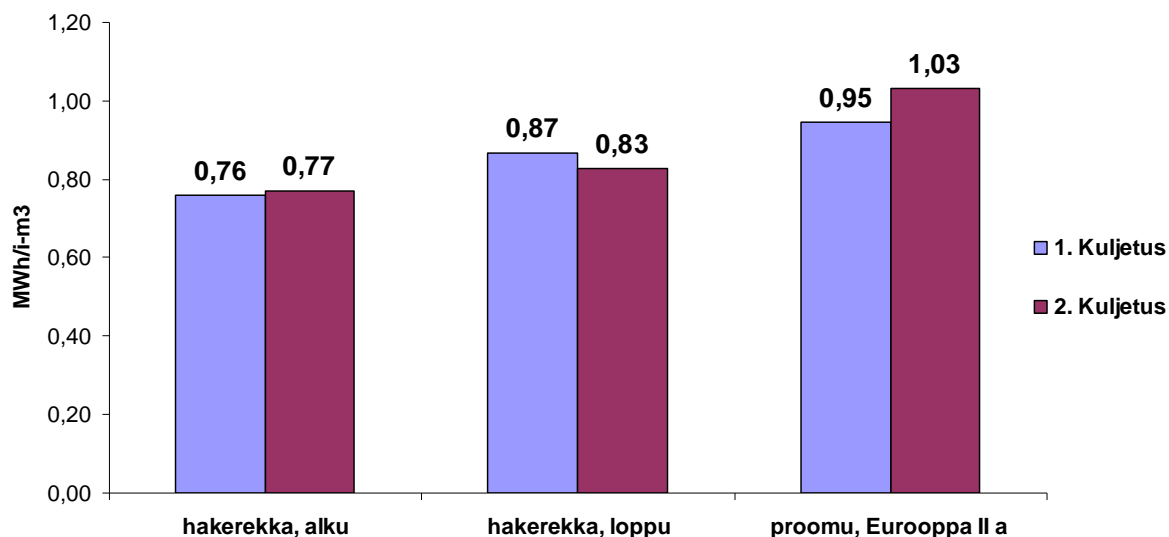


Kuva 28. Hakkuutähteestä haketetun metsähakkeen tilavuuspainot (kg/i-m³) on esitetty eri kuljetusvaiheista kummankin kuljetuskokeilun osalta.

Tilavuuspainojen ja kosteusprosenttien mukaan laskettiin vertailuarvot lastitiiviydelle (m³/i-m³) ja energiatiheydelle (MWh/i-m³). Proomukuljetuksen lastitiiviyys 0,50-0,55 m³/i-m³ ja energiatiheys 0,95-1,03 MWh/i-m³ olivat keskimäärin 25 % (9-34 %) parempia kuin vertailuissa olleiden hakerekkojen vastaavat arvot. Proomun suuremman lastikapasiteetin vaikutus lastitiivyyteen ja energiatiheyteen oli 16 % parempi kuin hakerekoilla keskimäärin ja erityistiiivityksellä saatiin lisättyä tiiviyttä lisää vielä 10 %. (kuva 29 ja 30)



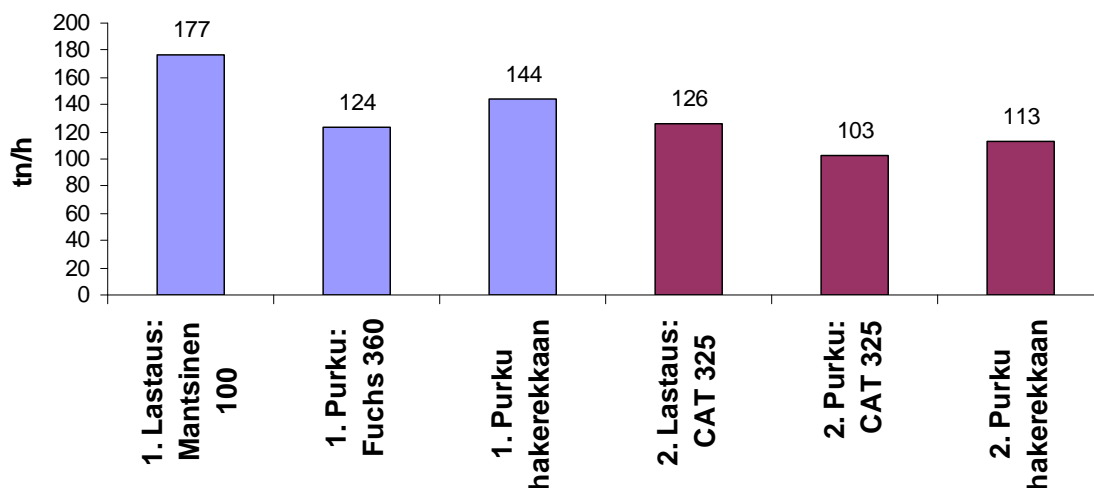
Kuva 29. Hakkuutähteestä haketetun metsähakkeen lastitiiviydet (m³/i-m³) on esitetty eri kuljetusvaiheista kummankin kuljetuskokeilun osalta.



Kuva 30. Hakkuutähteestä haketetun metsähakkeen energiatiheydet (MWh/i-m³) on esitetty eri kuljetusvaiheista kummankin kuljetuskokeilun osalta.

Lastaus- ja purkuvertailu

Lastauksen ja purun työntuottavuuteen vaikuttaa eniten lastaus- ja purkumenetelmän valinta. Kuljetuskokeiluissa testattiin LoLo –menetelmiä (Lift on/Lift off) erikokoisilla materiaalinkäsittelykoneilla ja kauhoilla. Lastauksen tuottavuus vaihteli koneesta riippuen 126-177 tn/h (E₁₅) ja purku 103-124 tn/h (E₁₅). Purku suoraan hakerekkoihin oli nopeampaa kuin purku laiturille. (kuva 31)



Kuva 32. Lastauksien ja purkujen työntuottavuus (E₁₅) erilaisten LoLo –menetelmien osalta ensimmäisessä ja toisessa kuljetuskokeilussa.

Koneteholla ja kauhakoolla oli vaikutusta työntuottavuuteen. Kauhakoko voisi olla huomattavasti suurempikin kevyen hakkeen käsittelyssä. Työntekijällä on vaikutusta työntuottavuuteen, mutta hakkeen kuormaaminen osoittautui helpommaksi ja vähemmän ammattitaitoa vaativiksi kuin esimerkiksi raakapuun käsittely.

3.1.2 Saarikorjuuketju

Pienpuuhakkeen kosteus määritettiin hakerekko kohtaisesti voimalaitoksen vastaanotossa saarikorjuun kuljetuskokeilujen yhteydessä. Leimikkoerät pidettiin erillään loppuun asti, sillä urakoitsija- ja metsänomistajakorvaukset perustuivat leimikkokohtaisiin tietoihin hakkeen määrästä ja energiasisällöstä. Keskimääräinen kosteus kokopuuhakkeelle voimalaitosmittauksen perusteella oli 46 %. Energiasisällön määrittämiseen käytettiin voimalaitoksen ilmoittamaa arvoa. (taulukko 11)

Taulukko 11. Leimikkokohtaiset kosteudet ja energiasisällöt kokopuuhakkeelle

Leimikko	Kosteus-%	MWh
1	45.4	539
2	46.6	413
3	47.0	128
keskiarvo/summa	46	1080

Kokopuuhakkeen palakokoanalyysin näytteen kokonaisuudessa oli 1124 g. Massajakauman perusteella 82 % näytteen palasista oli alle 6 cm:n kokoisia. Hake täyttäisi laatuluokituksen P63 (Koneyrityjä-lehti 6/2008).

Pienpuun kuljetuksessa kokopuuna kansilastiproomussa energiatiheys jäi vaatimattomaksi ollen keskimäärin 0,50 MWh/i-m³ (kosteus 46 %). Lastitiiviyyttä pitäisi pystyä parantamaan etenkin pitemmällä kuljetusmatkoilla energiatiheden kohentamiseksi. Kuljetuskokeilujen perusteella tuoreen pienpuun ajo suoraan kansilastiproomulle olisi ollut parempi vaihtoehto, sillä kesän yli kuivaneet puut katkeilivat vaikeuttaen kuljetusta ja lisäksi hävikkiä.

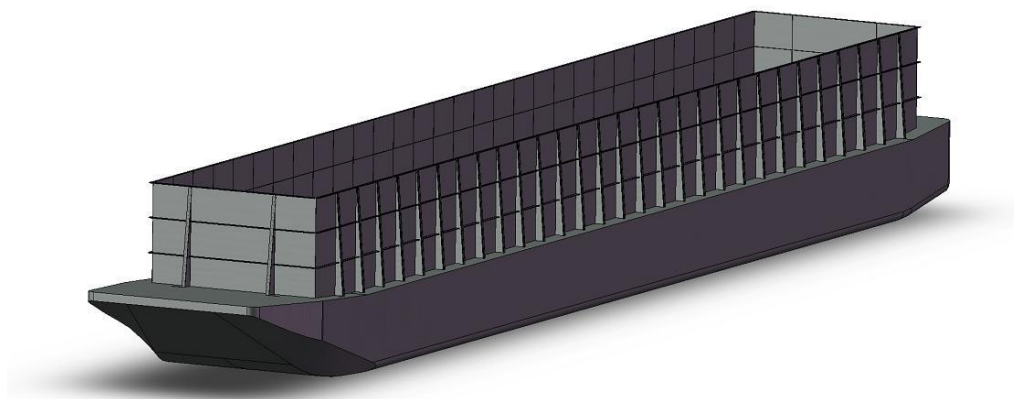
Lastaus- ja purku toteutettiin kahdella metsätraktorilla. Kokopuun lastaus sekä purku ajokoneilla kesti keskimäärin 16 min/kuorma. Ajokoneeseen lastauksen kesto kokonaisajasta (44 %) oli hieinan pidempi kuin purku proomuun lastauksen yhteydessä (37 %) ja rantavarastoon purun yhteydessä (34 %). Ajoon täytenä ja tyhjänä meni keskimäärin 20 % kokonaisajasta. Ajoon menevä aika riippuu etenkin proomun ja varastopaikan välisestä etäisyydestä, joka oli kuljetuskokeiluissa keskimäärin 100 m.

Kokopuun haketus toteutettiin Giant –mobiilihakkurilla suoraan purkuvarastosta hakerekkaan. Haketuksen tuottavuus oli keskimäärin 59 tn/h (E₀). Haketus hakerekkaan (127 kehys-m³) kesti keskimäärin 25 min. Kokopuuhakkeen tilavuuspaino oli 295 kg/i-m³ (kosteus 46 %) ja lastitiiviyys 0,40 m³/i-m³. Energiatiheys oli keskimäärin 0,77 MWh/i-m³. Hakerekan purku voimalaitoksen vastaanottoon kesti keskimäärin 35 min (punnitusajojen erotus).

3.1.3 Hypoteettinen alus- ja proomukalusto

Konseptisuunnittelun pohjalta esitettiin proomujen työntäjä ympärivuotiseen kuljetukseen Vuoksen vesistöalueelle. Työntäjälle määritettiin seuraavat mitat; pituus 23,9 m, leveys 12,6 m, syväys 2,7 m. Syväyttä muutettiin asetetusta lähtöarvosta (2,5 m), koska potkureille piti saada enemmän tilaa ja aluksen painoa (dwt) piti kasvattaa. Syväys rajoittaa kulkualueita Vuoksen vesistöalueella, mutta proomujen täydet lastit hakkeellakin vaatii kulkua vähintään pääväylillä (syväys >2,4 m). Vertailualueen Arppen syväys on 2,8 m. Leveyttä kasvatettiin asetetusta lähtöarvosta (10 m), sillä se helpottaisi proomujen hinausta talvella. Koneiksi ehdotettiin Wärtsilän 20 -sarjan keskinopeita raskaspolttoöljykoneita, koneteholtaan 2 x 800 kW. Konetehto mahdollistaa työntöktykyelle nopeudeksi 15 km/h (8 kN). Hinta-arvioksi alukselle esitettiin 1,7 milj. € (Forsell 2007)

Hypoteettisten proomujen suunnittelu toteutettiin kahden kokoluokan proomulle (pienproomu ja suurproomu), joissa tarkasteltiin sekä ruuma- että kansilastiproomujen vaihtoehtoja. Saimaa Hypo -ruumaproomu edusti hypoteettista suurproomua, jonka mitat olivat pituus 82 m, leveys 12,6 m ja maksimi syväys 4,2 m (kuva 33). Tilavuutta hypoteettisella suurproomulla olisi 7100 kehys-m³. Ruumaproomu soveltuu parhaiten reitille, jonka molemmissa päätepisteissä on satamat materiaalinkäsittelykoneineen. Saimaa Hypo -ruumaproomun hankintahinnaksi arvioidaan noin 1 milj. € (Casen 2007)



Kuva 33. Hypoteettinen lisälaidoin varustettu Saimaa Hypo -ruumaproomu. (Casen 2007)

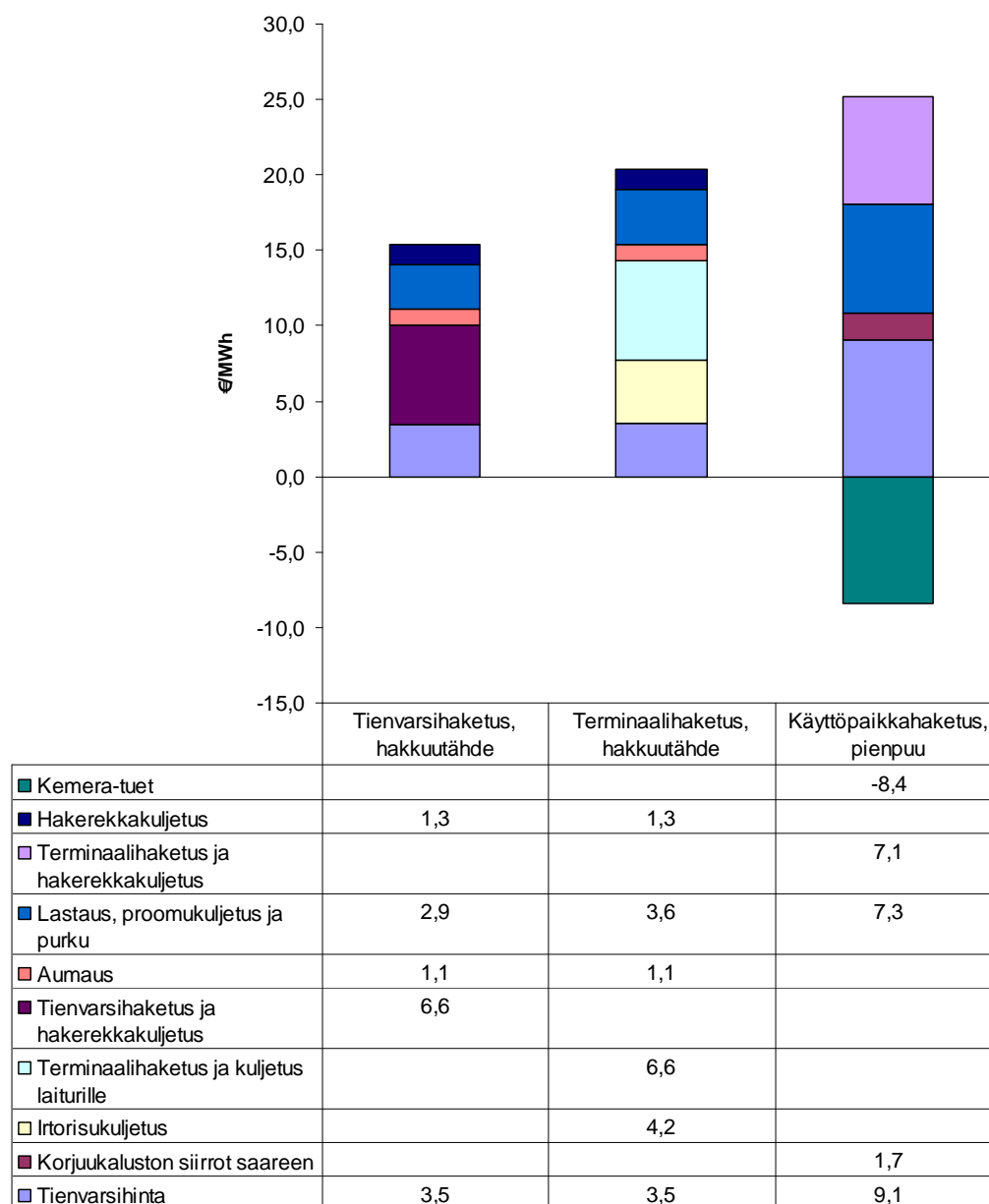
Saimaa Hypo -ro-ro-ruumaproomu oli tilavuudeltaan pienempi (6550 kehys-m³), sillä kapasiteettia vähensi lastitilaan johtava ramppi. Lastaus- ja purku voidaan suorittaa kauhakuormaajalla, sillä proomu on varustettu lastitilarampin lisäksi keularampilla sekä avattavalla ylärakenneportilla. Lastauksen ongelmaksi muodostuu lastauskorkeuden (9,5 m) saavuttaminen pelkkää kauhakuormaajaa käyttämällä. Lastin purku on mahdollista kauhakuormaajalla vaikka hakekasa olisi-kin korkea.

Pienproomun mitoituksi päätettiin; pituus 41 m, leveys 12,6 m ja maksimi syväys 3,7 m. Hinausteho osoittautui suureksi verrattuna kaksi kertaa pidempään suurproomuun. Hinausteho yhdellä ruumaproomulla nopeudella 15 km/h (8 kN) olisi 300 kW. Tilavuutta ruumaproomulla olisi 3100 kehys-m³ ja kansilastiproomulla 2300 kehys-m³. Pienproomulle arvioitiin hinnaksi noin 330 000 € (Niinilampi 2007)

3.2 Logistiikkajärjestelmä

3.2.1 Kuljetuskokeilujen kustannukset

Kuljetuskokeilujen todellisten kustannusten perusteella edullisimmaksi kuljetusketjuksi osoittautui hakkuutähteen tienvarsihaketukseen perustuva suurproomuketju, jonka kustannukset olivat 15,4 €/MWh. Vastaavan hakkuutähteen terminaalihaketuksen kokonaiskustannukset olivat 21,5 €/MWh. Suurimmat kustannukset muodostuivat pienpuun saarikorjuuketjulle 25,2 €/MWh, jonka lopullisia kustannuksia kuitenkin vähentää energiapuuharvennuksen yhteyteen saatavat Kembra-tuet, jolloin lopullinen kustannus oli 16,7 €/MWh. (kuva 34)



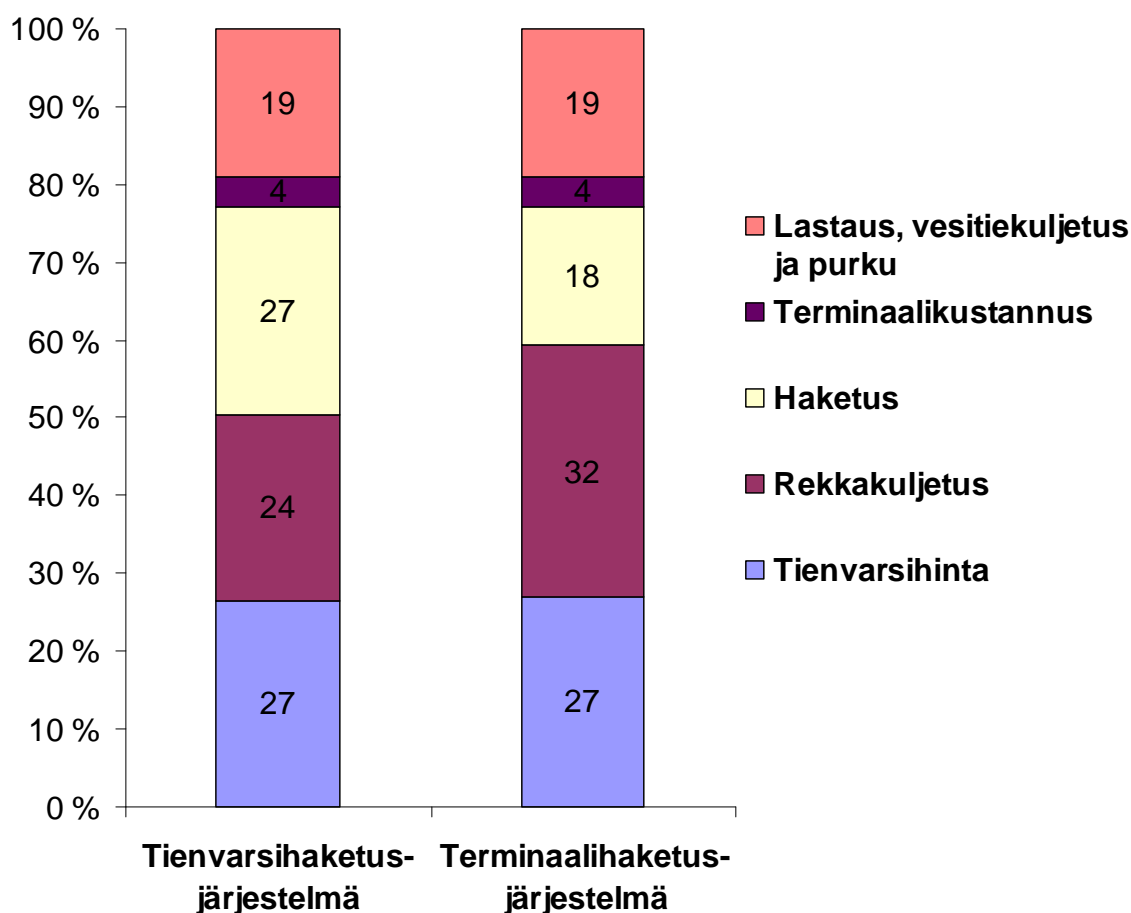
Kuva 34. Kuljetuskokeilujen toteutuneet kustannukset on esitetty erilaisille hankintaketjuille

Kuljetuskokeilut edustivat metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämän logistiikan toteuttamista käytännössä ensimmäistä kertaa. Kuljetuskokeilut olivat luonteeltaan yhden otoksen kuljetuksia ja kustannukset perustuivat tilaajan ja toimittajan väliseen laskutukseen. Tapauskohtaiset tekijät ja olosuhteet vaikuttavat myös kuljetuskokeilun kustannuksiin. Vesitiekuljetuksen osuutta nostivat terminaalihaketuksen sisältämässä kuljetuskokeilussa erilainen lastauksen laskutus ja

vajaa lastikapasiteetti. Täydellä kukkurapäisellä lastilla 130 km vesitiekuljetuksen osuus lastauksineen proomun omalla lastausjärjestelmällä olisi ollut 2,5 €/MWh (0,02 €/MWh/km). Käyttöpaikkahaketuksen vesitiekuljetuksen hintatasoa nosti vastaavasti purun suorittaminen metsätraktoreilla materiaalinkäsittelykoneen sijasta.

Haketuksen laskutus nostatti myös terminaalihaketuksen mukaisen logistiikan kustannuksia kuljetuskokeilussa. Terminaali- ja tienvarsihaketus oli hinnoiteltu yksikkökustannuksiltaan samaksi, vaikka terminaalihaketus on huomattavasti helpompi ja nopeampi toteuttaa. Terminaalihaketuksessa tuli ylimääräinen kuljetus laiturille, joka oli huomioitu näin hinnoittelussa. Hakkuutähteen terminaalihaketusrjestelmän kustannuksia lisäsi periaatteessa vain irtorisuauton korkeampi kuljetuskustannus. Terminaalihaketusrjestelmää voitaisiin suositella, mikäli tämä kustannuslisä olisi perusteltavissa terminaalihaketuksen korkeammalla tuottavuudella sekä terminaalivarastoinnin ja hakkurista riippumattoman kuljetuksen eduilla.

Suurproomuketjun kokeilun kustannusten muuntaminen vertailukelpoisemmiksi osoittaa samansuuruisia kustannuksia sekä tienvarsihaketuksen että terminaalihaketuksen mukaiselle järjestelmälle, mikäli terminaalihaketus hinnoitellaan alhaisemmaksi (2,3 €/MWh) kuin tienvarsihaketus (3,5 €/MWh) eikä ole ylimääräisiä käsittelyitä ja kuljetuksia. Tällöin kuljetuskokeilun mukaisen ketjun kokonaiskustannukset olisivat 13 €/MWh. Vesitiekuljetuksen kustannus lastauksineen ja purkuineen olisi noin 20 % kokonaiskustannuksista. (kuva 35)



Kuva 35. Tienvarsi- ja terminaalihaketusrjestelmien vesitiekuljetuksen sisältämän kuljetusketjun kustannusrakenteen esimerkki hakkuutähdhakeelle kokonaiskustannusten ollessa 13 €/MWh.

3.2.2 Kuljetusketjujen simuloinnin tulokset

Metsähakkeen vesitiekuljetuskustannukset vaihtelivat kalustosta, käyttötunneista ja vesireittivalinnoista riippuen. Simulointimallin tuottamien ajanmenekki- ja suoritetulosten avulla laskettiin yksikkökustannukset eri skenaarioille konekustannuslaskentamallien avulla. Taulukossa 12 on esitetty simulointiskenaarioissa käytetyn kaluston hankintahinnat sekä simulointien keskimääräiset käyttötunnit ja kustannukset. Simuloinneissa jokainen logistiikkavaihtoehto edusti täyttä 9 kuukauden työsuoritetta vuodessa, joten vuotuisen suoritemäärän vaikutus tulee ottaa vertailuissa myös huomioon (taulukko 13).

Taulukko 12. Simuloinneissa käytetyn kaluston hankintahinnat ja simulointien keskiarvotulokset käyttötunneista ja kustannuksista.

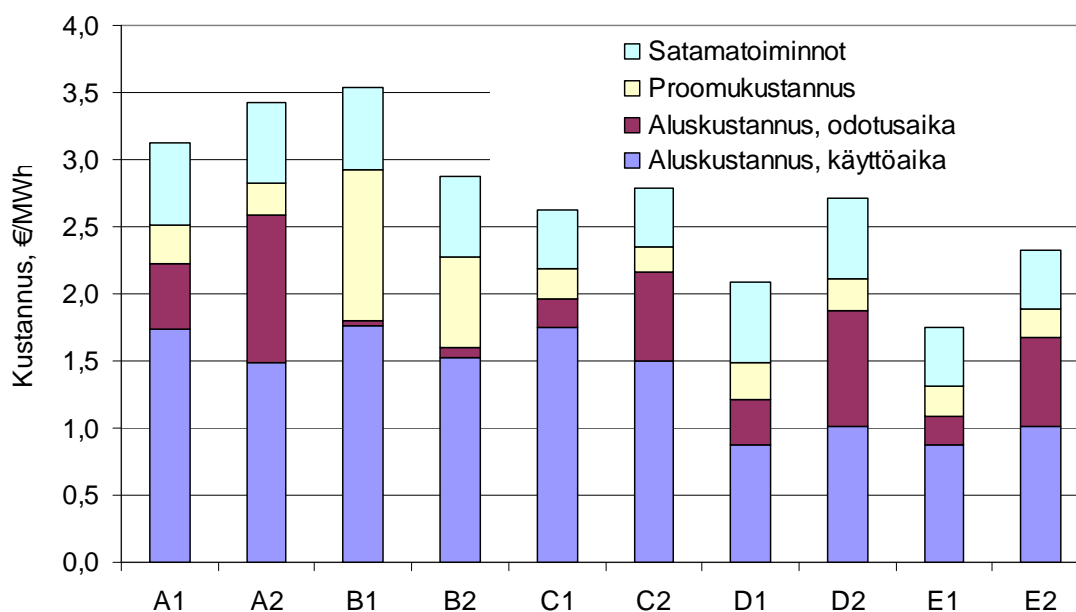
Kalusto	Hankintahinta, €	Käyttötunnit, h/a	Vuosikustannus, €/a	Tuntikustannus, €/h
Pieni alus, Tapio	900 000	3 642	395 000	108
Suuri alus, Arppe	3 800 000	2 505	885 000	355
Kansilastiproomu	600 000	3 642	51 000	22
Ruumaproomu	1 000 000	2 505	80 000	32
Modifioitu ruumaproomu	1 400 000	2 259	110 000	48
Materiaalinkäsittelykone	600 000	2 100	200 000	95
Kauhakuormaaja	195 000	2 100	112 000	53
Hihnakuuljetin	30 000	2 100	10 000	5
Hakerekka	220 000	3 000	180 000	60

Taulukko 13. Simulointiskenaariot. A1, B1, C1, D1 ja E1 edustavat pientä alusta ja vastaavasti A2, B2, C2, D2 ja E2 edustavat suurta alusta. Suluissa on esitetty kunkin skenaarion simulointien tuottamat vuosisuoritteet tonneina.

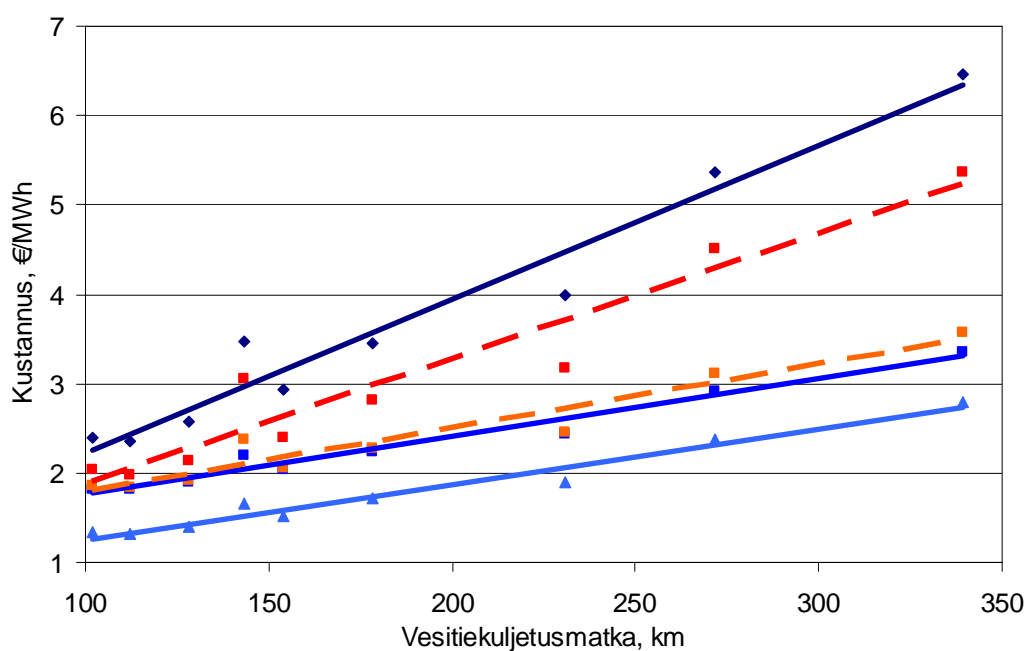
A. Kiinteä proomulogistiikka, riippuvainen satamatyövuoroista	
A1. Kansilastiproomu, proomun koko 500 tonnia (58 000 tonnia/vuosi)	
A2. Ruumaproomu, proomun koko 1200 tonnia (111 000 tonnia/vuosi)	
B. Vaihtoproomu-logistiikka, riippuvainen satamatyövuoroista	
B1. Kansilastiproomu, proomun koko 500 tonnia (97 500 tonnia/vuosi)	
B2. Ruumaproomu, proomun koko 1200 tonnia (258 000 tonnia/vuosi)	
C. Kiinteä proomulogistiikka, riippumaton satamatyövuoroista	
C1. Kansilastiproomu, proomun koko 500 tonnia (77 500 tonnia/vuosi)	
C2. Ruumaproomu, proomun koko 1200 tonnia (147 500 tonnia/vuosi)	
D. Kiinteä proomulogistiikka, riippuvainen satamatyövuoroista	
D1. Ruumaproomu, proomun koko 1200 tonnia, hinaus (98 000 tonnia/vuosi)	
D2. Modifioitu ruumaproomu, koko 1800 tonnia (150 500 tonnia/vuosi)	
E. Kiinteä proomulogistiikka, riippumaton satamatyövuoroista	
E1. Ruumaproomu, proomun koko 1200 tonnia, hinaus (123 000 tonnia/vuosi)	
E2. Modifioitu ruumaproomu, koko 1800 tonnia (176 500 tonnia/vuosi)	

Vesitiekuljetuksen kustannukset sisälsivät lastauksen ja purun sekä alusten ja proomujen kiinteät sekä muuttuvat kustannukset simulointiskenaarioiden käyttötuntien mukaisesti. Vesitiekuljetuksen keskiarvokustannukset skenaarioittain perustuivat 178,5 kilometrin kuljetusmatkalle, joka vastasi Siilinjärvi–Savonlinna väylän olosuhteita (kuva 36). Muut simuloinnin kuljetusetäisyydet perustuivat simulointimallin muille väylävaihtoehtoille lastauspaikalta käyttöpaikalle. Edullisimmaksi kuljetusvaihtoehdoksi osoittautui pienen aluksen ja suuren proomun (1200 tn) muodostama kytkye kiinteällä proomulogistiikalla, jossa lastaukset ja purut olivat riippumattomia

satamahenkilökunnan työvuoroista. Edullisin lastausmenetelmä oli hinnakuljettimen ja kauha-kuormaajan yhteiskäyttö, joka ei ollut riippuvainen satamatyövuoroista (kuvat 36 ja 37).



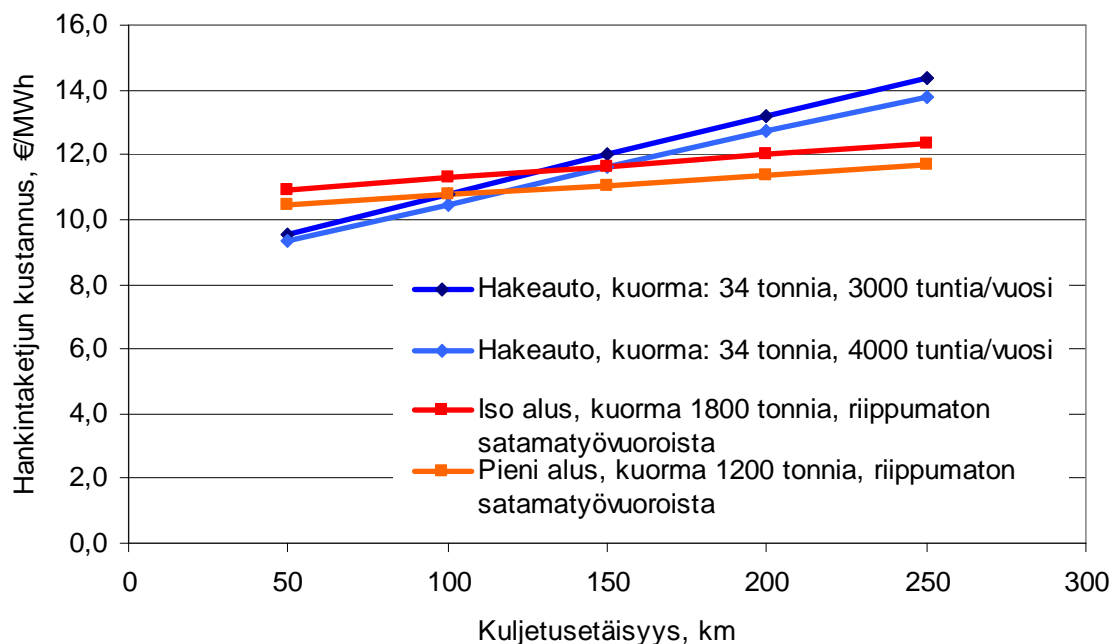
Kuva 36. Vesitiekuljetuksen kustannukset eri logistiikkavaihtoehdoille (Siilinjärvi–Savonlinna väylä, 178,5 km). Skenaariovaihtoehtojen selitteet löytyy taulukosta 13.



Kuva 37. Vesitiekuljetuskustannukset eri logistiikkavaihtoehdoilla kuljetusmatkan funktiona (kustannukset sisältävät lastauksen ja purun)

- Pieni alus ja kansilastiproomu (500 tn), vaihtoproomu-logistiikka
- Pieni alus ja kansilastiproomuja 2 kpl (1000 tn), kiinteä proomu-logistiikka
- Pieni alus ja ruumaproomu (1200 tn), kiinteä-PL, riippumaton satamatyövuoroista
- - - Suuri alus ja ruumaproomu (1200 tn), vaihtoproomu-logistiikka
- - - Suuri alus ja ruumaproomu (1200 tn), kiinteä-PL, riippumaton satamatyövuoroista

Eri kuljetusketjujen välisiin kokonaiskustannuksiin vaikuttaa ketjun kokonaislogistiikan tehokkuus. Vesitiekuljetusketju oli kilpailukykyisempi hakerekkaketjuun nähden jo 100 km jälkeen, mikäli hakerekan vuotuinen käyttömäärä oli 3000 tuntia ja proomukalustoksi otettiin käyttöön pienen aluksen ja suuren proomun muodostama kytkye. Kilpailukyvyyn rajaetäisyys vaihteli 100–150 km välillä riippuen kalustosta ja käyttöasteesta (kuva 38). Edullisimman logistiikkavaihtoehdon simuloinnin mukaiset kustannukset olivat lastauksen ja purun osalta 0,4 €/MWh ja proomukuljetuksen osalta 0,9 €/MWh, jolloin vesitiekuljetuksen kustannus oli yhteensä 1,3 €/MWh (etäisyys 100 km). Kaukokuljetusetäisyyden ollessa 100 km hakkuutähdehakkeen edullisimpien vesitiekuljetusvaihtoehtojen sisältämän logistiikan kokonaiskustannukset vaihtelivat 10,8 – 12,1 €/MWh välillä (taulukko 14).



Kuva 38. Metsähakkeen kuljetusketjujen kokonaiskustannusten vertailu (hakerekkä- vs. vesitiekuljetusketju).

Taulukko 14. Hakerekkä- ja vesitieketjun kustannukset metsähakkeelle.

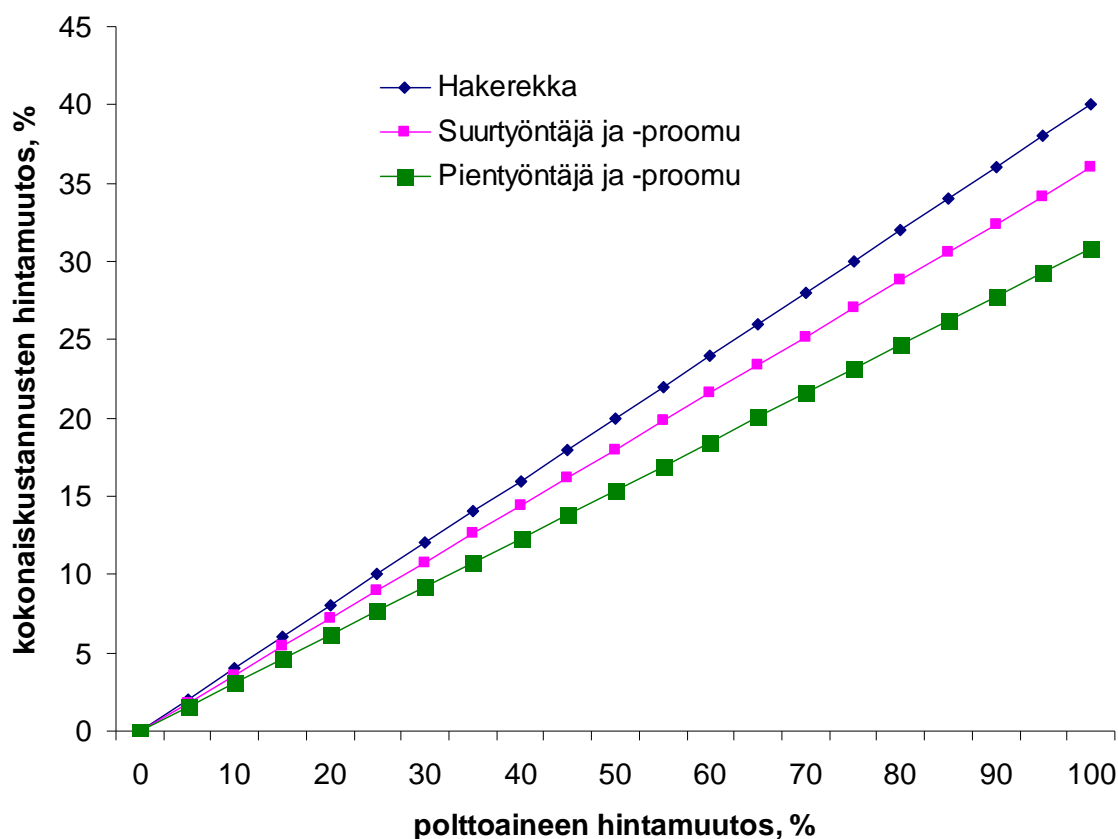
	Hakerekkäketju, €/MWh	Vesitieketju, €/MWh
Tienvarsihinta	3,5	3,5
Haketus	3,5	3,5
Rekkakuljetus, 30 km		2,2
Aumaus ja varastointi		0,3
Lastaus + purku		0,4 – 0,6
Kaukokuljetus		
100 km	3,5 – 3,8 ¹	0,9 – 2,0 ²
250 km	6,8 – 7,4 ¹	1,8 – 3,6 ²
Yhteensä		
100 km	10,5 – 10,8 ¹	10,8 – 12,1 ²
250 km	13,8 – 14,4 ¹	11,7 – 13,7 ²

¹ Kokonaiskustannukset, kun hakerekan vuotuinen käyttöaika vaihtelee 4 000 tunnista 3 000 tuntiin

² Edullisimpien vesitiekuljetusvaihtoehtojen kokonaiskustannusten vaihteluväli

3.2.3 Herkkyystarkastelu polttoaineen hintamuutokselle

Kuljetuspolttoaineiden hinnat voivat vaihdella nopeasti. Tämä luo haasteita niin kuljetusyrittäjille kuin metsäpolttoaineiden hankinnasta vastaaville organisaatioille. Kuljetuspolttoaineiden hintojen vaikutus kokonaiskustannuksiin riippuu kuljetuskaluston kustannusrakenteesta. Mitä suurempi osuus polttoaineella on kokonaiskustannuksista, sitä herkempi kuljetuskalusto on polttoaineiden hinnanvaihteluille. Polttoaineen 25 % hinnan nousu, nostaa hakerekkan kokonaiskustannuksia keskimäärin 10 %. Vertailun suurproomu- ja pienproomuketjun polttoaineen hinnan nousun vaikutus kokonaiskustannuksiin on pienempi kuin hakerekalla (kuva 39). Tämä parantaa vesitiekuljetuksen sisältämän logistiikan kilpailukykyä hakerekkakuljetuksiin nähden. Käytännön kilpailutilanteeseen vaikuttaa dieselin ja moottoripolttoöljyn (kevyt polttoöljy) väliset suhteelliset hinnanvaihtelut.



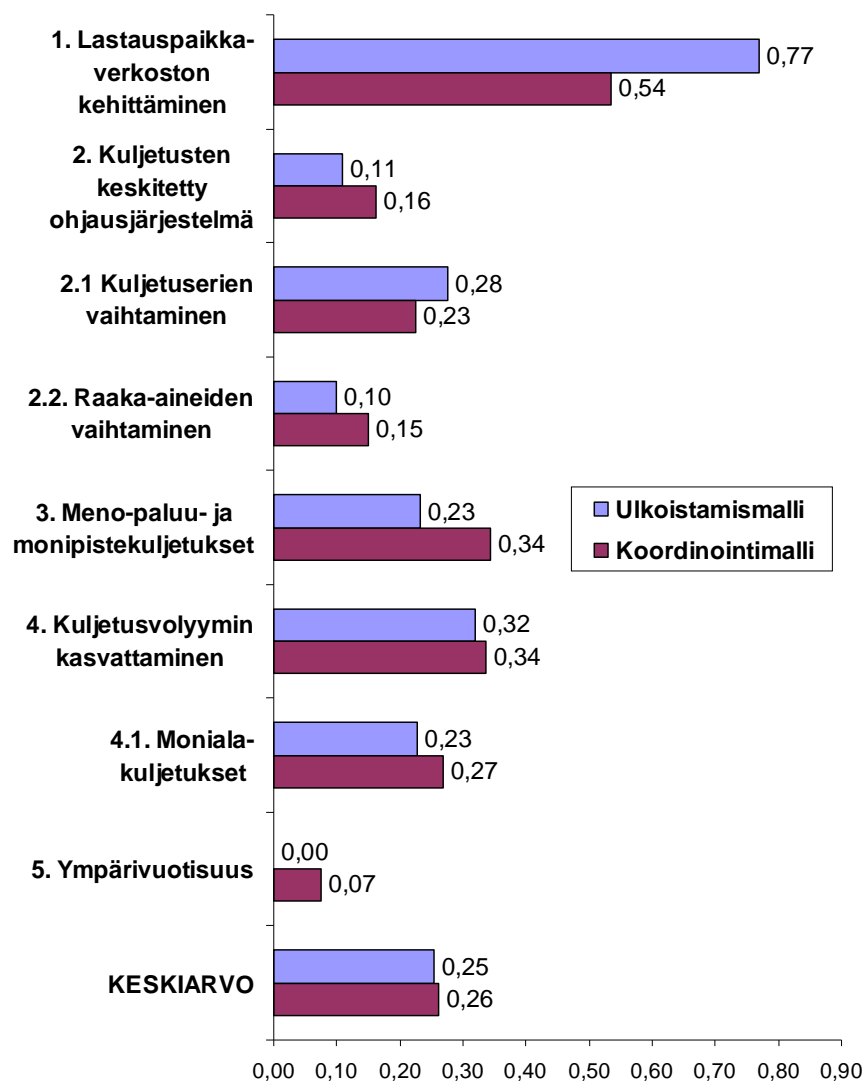
Kuva 39. Polttoaineen hinnan nousun vaikutus kokonaiskustannuksiin tarkastelluilla kuljetusmuodoilla (polttoaineiden ja kustannusrakenteen lähtötietona käytetty vuoden 2007 keskimääräistä hintatasoa).

3.2.4 Liiketoimintamahdollisuudet

Asiantuntijahaastatteluiden vastauksien tulosten mukaan aluskuljetusten ympärivuotisuuden varmistamiseen liittyvät kehittämistoimien käytön esteet nähtiin merkittävimpana raakapuun ja metsäpolttoaineiden aluskuljetusten kehittämistä estävänä tekijänä (ka. 1,57). Lastauspaikkaverkoston kehittämiseen (ka. 1,30) ja kuljetusvolyymien kasvattamiseen (ka. 0,92) liittyvien kehittämistoimien käytön esteiden merkittävyys arvioitiin myös korkeammaksi kuin kaikkien vaihtoehtojen keskiarvotulokset (ka. 0,91). Asteikkona käytettiin: 0 = ei ole vaikutusta, 1 = estää hiukan, 2 = estää merkittävästi, 3 = estää erittäin merkittävästi.

Liiketoiminnan organisoimisessa raakapuun ja metsäpolttoaineiden aluskuljetuksen sisältämälle hankinnalle paras vaihtoehto oli haastattelutulosten mukaan koordinoitumalla mukainen järjes-

telmä verrattuna nykyisen kaltaiseen urakointimalliin. Koordinointimallin (ka. 0,26) ja ulkoistamismallin (ka. 0,25) välinen keskiarvoero oli häviävän pieni. Näin ollen organisoinnin paremmuutta kannattaa etsiä ja arvioida eri osa-alueiden välisistä eroista. Ulkoistamismallin tuomat hyödyt lastauspaikkaverkoston kehittämisessä arvioitiin suurimmaksi verrattuna urakointimalliin (ka. 0,77) ja olivat suuremmat kuin koordinointimallilla (ka. 0,54). Koordinointi- ja ulkoistamismallin mukainen organisointi arvioitiin kaikilta kehittämisalueilta paremmaksi tai yhtä hyväksi kuin urakointimalli. Ulkoistamismalli arvioitiin lastauspaikkaverkoston kehittämisen ja kuljetuserien vaihtamisen mukaisissa osa-alueissa koordinointimallia paremmaksi. (kuva 40)



Kuva 40. Vertailukelpoiset vaihtoehtoisten liiketoimintamallien referenssiarvot kehittämistoimien käytön esteiden paremmuudesta, kun niitä verrataan nykyisen kaltaiseen urakointimalliin. As-teikko: - 2 = paljon huonompi, - 1 = huonompi, 0 = yhtä hyvä, 1 = parempi, 2 = paljon parempi

3.2.5 Logistiikan päästövertailu

Logistiikan päästövertailu toteutettiin elinkaarilaskentana vertailemalla perinteistä tienvarsihake- tuksiin ja hakerekkakuljetuksiin perustuvaa logistiikkajärjestelmää vaihtoehtoiseen satelliittitermi- naalin ja eri kaukokuljetusmuotojen sisältämiin järjestelmiin. Tapaustarkastelu toteutettiin läh- tökohtana Varkauden mahdollisen biojalostamon hakkuutähdehakkeen käyttötarve (50 % metsä- biomassan tarpeesta, 1 TWh). Satelliittitermiinalli sijaitsi Puhoksen satamassa. Satelliittitermi- naalin mukaisessa järjestelmässä 8 % biojalostamon tarvitsemasta kokonaismäärästä siirrettiin proomu- tai rautatiekuljetuksella suoritettavaksi.

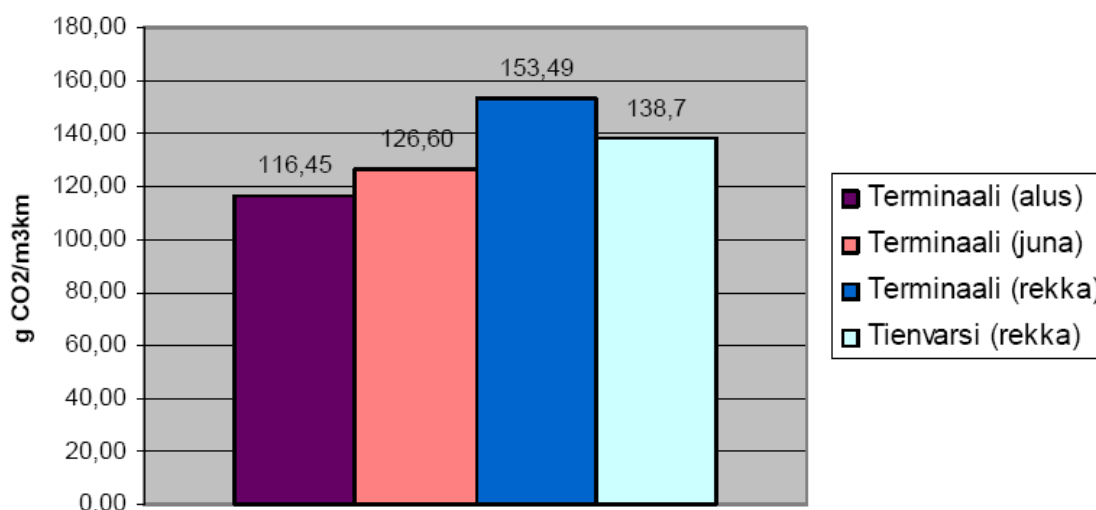
Perinteisen hankinta-alueen täydennys satelliittiterminaalilla ja vesitiekuljetuksella tuotti pienimmät hiilidioksidipäästöt. Logistiikan kokonaispäästöt olivat perinteisessä logistiikassa 28300 tn/CO₂, vesitiekuljetuksen sisältämässä vaihtoehdossa 27500 tn/CO₂ ja rautatiekuljetuksen (diesel-juna) sisältämässä vaihtoehdossa 34200 tn/CO₂. Keskimääräinen hakerekkujen kuljetusetäisyys Varkauden ympäriltä väheni perinteisessä hankinnassa 67 kilometristä 60 kilometriin. Hakerekkujen kuljetusetäisyys oli keskimäärin 2/3 pisimmästä kuljetusmatkasta.

Proomu- ja rautatiekuljetuksen lastimäärät asetettiin vastaamaan nykyisin käytössä olevaa suurproomua, joita oletettiin kuljetettavan terminaalista käyttöpaikalle 20 kpl vuodessa. Logistiikan päästövähennykset olivat proomukuljetuksen sisältämässä logistiikassa 3 % alhaisemmat verrattuna perinteiseen logistiikkaan.

Tuloksia arvioitaessa täytyy ottaa huomioon, että hakkuutähteen saatavuudeksi arvioitiin koko teknistaloudellinen potentiaali Varkauden ympäriltä. Todellista saatavuutta tulee vähentämään merkittävästi organisaatioiden välinen kilpailu metsähakkeesta ja metsänomistajien myyntihaluttomuus sekä käyttömäärien kasvu lähialueilla. Perinteisen hankinta-alueen kuljetusetäisyydet kasvaisivat, jolloin kaukokuljetusmuotojen valinnalla olisi merkitystä logistiikkapäästöjen kannalta.

Tapaustarkastelua toteutettiin myös EXCEL -laskentana polttoaineen kulutuksen mukaisille välittömille logistiikkapäästöille. Terminaalihaketukseen ja vesitiekuljetukseen perustuvalla hankinnalla saavutettava vähennys hiilidioksidipäästöissä perinteiseen hankintaan verrattuna on suuruudeltaan 3 – 18 % perinteisen hankinnan etäisyyden vaihdelta välillä 60 – 120 km. Käyttämällä terminaalissa kiinteää sähkökäyttöistä murskainta vesitiekuljetusketjulla saavutettava päästövähennys olisi huomattavasti suurempi. (Ghazanfari 2008)

Kuljetusketjut voidaan esittää vertailukelpoisimpina kuljetussuoritteen avulla. Hiilidioksidipäästöt kuljetussuoritetta kohden olivat pienimmät aluskuljetuksen sisältämällä hankinnalla (116 g CO₂/m³km), kun kaukokuljetusmatkaksi asetettiin 100 km (Ghazanfari 2008). Tällöin myös rautatiekuljetuksen päästötaloudus diesel-junalla on edullisempi hakerekkavaihtoehtoihin nähden. (kuva 41)

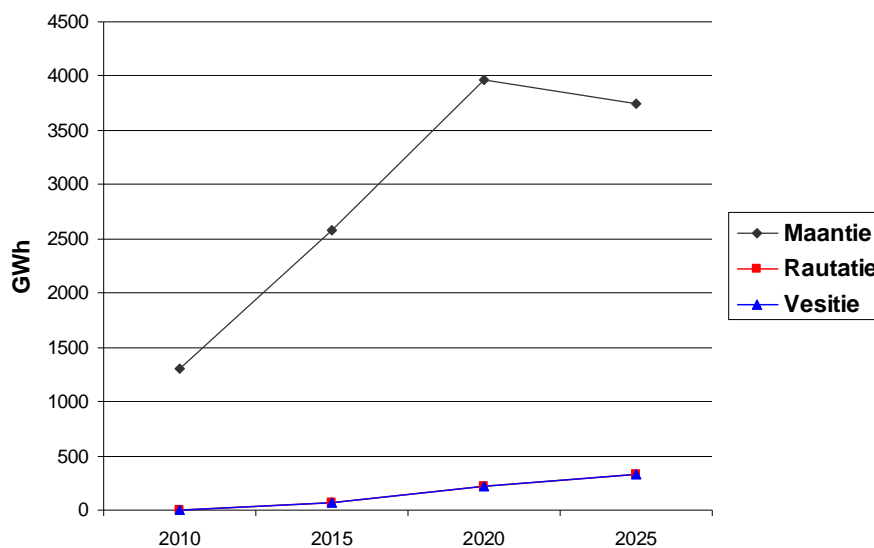


Kuva 41. Eri kuljetusketjujen kuljetussuoritekohtainen (m³km) hiilidioksidipäästö (g CO₂) tapaustarkastelussa (Ghazanfari 2008)

3.3 Kuljetusvirrat

3.3.1 Metsäpolttoaineiden kysyntä- ja kuljetusmäärät

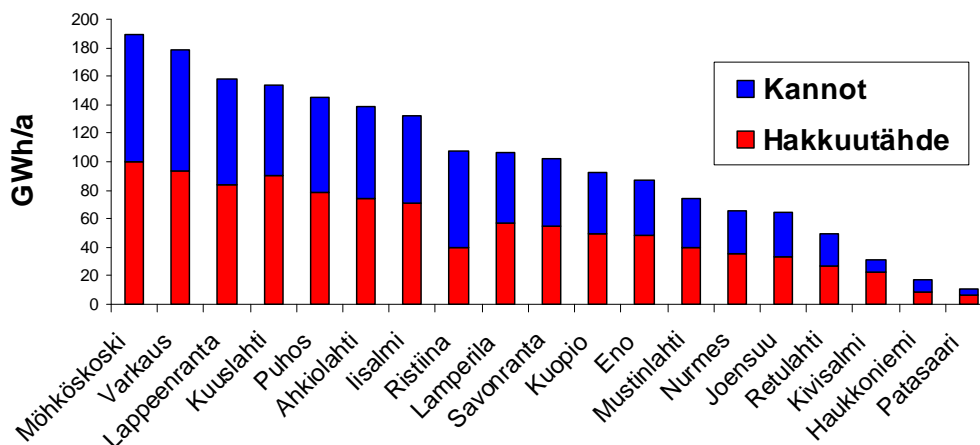
Itä-Suomessa metsäpolttoaineiden suurvoimalaitosten käyttömäärien arvioitiin nousevan nykyisestä 0,7 TWh/a (2007) käytöstä vuoteen 2010 mennessä 1.3 TWh/a ja kasvavan vuoteen 2025 mennessä 4,4 TWh/a. Kaukokuljetusmuotojen osuuden arvioitiin lähtevän merkittävämpään kasvuun vasta vuoden 2015 jälkeen (Kärhä 2007). Tällöin vesitie- ja rautatiekuljetuksen osuus saataisi olla 5 % metsäpolttoaineiden kaukokuljetusmäärästä, josta vesitiekuljetuksen osuus olisi puolet, 68 GWh/a. Vuonna 2020 metsäpolttoaineiden kaukokuljetusmäärän ollessa 10 % olisi vesitiekuljetuksen osuus 221 GWh/a ja vuonna 2025 metsäpolttoaineiden kaukokuljetusmäärän ollessa 15 %, olisi vesitiekuljetuksen osuus 331 GWh/a. (kuva 42)



Kuva 42. Arvio eri kuljetusmuotojen metsäpolttoaineiden kuljetusmäärästä Itä-Suomessa vuosina 2010-2025.

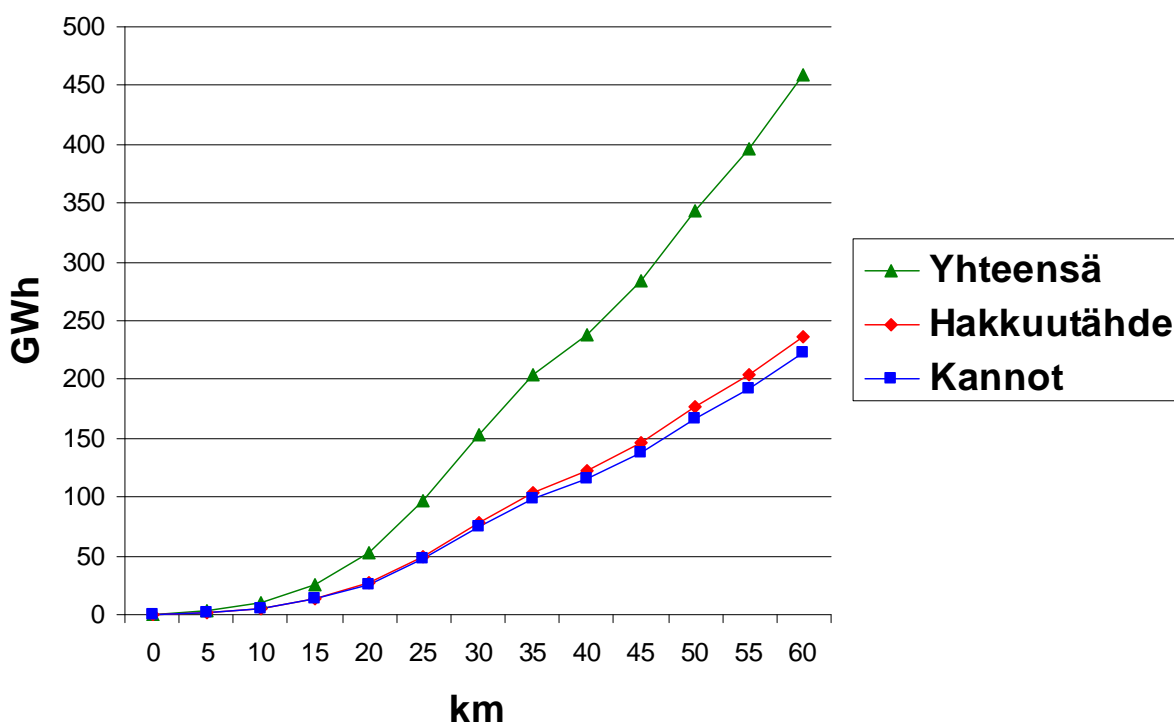
3.3.2 Metsäpolttoaineiden saatavuus

Päättehakkuiden hakkuutähteestä valmistetun metsähakkeen saatavuudet eri ajoetäisyyksillä valittujen parhaimpien lastauspaikkojen suhteen vaihtelevat riippuen alueen toteutuneista päättehakkuiden ja tavoitettavuudesta lastauspaikalle tieverkkoa pitkin (Liite II). Hakkuutähteiden ja kantojen vuosittainen saatavuus oli keskimäärin 100 GWh/lastauspaikka 30 km ajoetäisyydeltä valituille lastauspaikoille (kuva 43). Nuoren metsän kunnostuskohteiden pienpuun lisääminen laskentaan kasvattaisi saatavuutta.



Kuva 43. Hakkuutähteiden ja kantojen teknistaloudellinen vuosittainen saatavuus soveliaimmille lastauspaikoille 30 km etäisyydeltä.

Saatavuudeltaan parhaille lastauspaikoille hakkuutähteiden ja kantojen osuus oli yli 150 GWh, kun hankintaetäisyys oli 30 km. Hankintaetäisyyden kaksinkertaistaminen lisäsi saatavuuden kolminkertaiseksi. (kuva 44)



Kuva 44. Hakkuutähteiden ja kantojen teknistaloudellinen vuosittainen saatavuus on esitetty ajoetäisyyden suhteen Puhoksen satamaan.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1 Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämällä logistiikalla on hyvät tulevaisuuden näkymät. Kuljetuskokeilut osoittivat vesitiekuljetusmahdollisuudet ennakoarvioita paremmiksi. Vesitiekuljetuksen sisältämät kuljetusketjut voidaan ottaa osaksi käytännön metsäpolttoaineiden suurimittakaavaista hankintaa, mutta tutkimus- ja kehitystyötä on jatkettava ja kilpailukykyä parannettava. Vesitiekuljetuksen mahdollisen toiminnan laajuus riippuu metsäpolttoaineiden suurkäyttöpaikkojen hankintamääristä ja alueellisesta saatavuudesta.

Suurproomukuljetuksissa metsähakkeen energiatiheys oli keskimäärin 1 MWh/i-m³ (kosteus 40 %), joka oli 25 % suurempi verrattuna hakerekkakuljetuksiin. Parempaan energiatihyteen vaikuttaa proomun suuri lastimassa (kuljetuskokeilut, 800 tn ja 1100 tn) ja proomun kaukalomainen alaspäin kapeneva muoto, jotka tiivistävät lastia. Suuremmat lastipainot saattavat tiivistää hake-lastia vielä enemmän. Hakelastia on mahdollista tiivistää myös ajamalla sen päällä pienkoneella. Erytistiivistämisellä saatiin lisättyä lastitiiviyyttä 10 %. Tiivistyminen ei vaikeuttanut purkua materiaalinkäsittelykoneilla.

Suurproomuun on mahdollista lastata kukkuralasti, jolloin lastikapasiteettia voidaan kasvattaa. Eurooppa Iia –suurproomun ruumaan mahtui metsähaketta 800 tn (kosteus 40 %) ja kukkuralastilla voidaan lisäsi lastikapasiteettia 50 %, 1200 tn. Suurproomun metsähakkeen kukkuralasti vastaisi keskimäärin 40 kpl (120 i-m³) hakerekkakuljetusta ja energiasisällöltään 200 kpl (20 000 kWh/a) tyyppillisen omakotitalon vuotuista lämmöntarvetta. Modifioimalla proomua lisälaidoilla olisi mahdollista kasvattaa lastikapasiteettia lisää laitarakenteista riippuen jopa 50 %, 1800 tn. Lisälaidoista saattaa olla kuitenkin haittaa muiden raaka-aineiden kuljettamisessa. Lastikapasiteetin kasvattaminen onnistuu myös proomuyksiköiden määrää lisäämällä tai kehittämällä uusia proomumalleja. Suuremmalla lastikapasiteetilla pystytään alentamaan kuljetuksen yksikkökustannuksia. Myös raakapuun ja metsähakkeen yhteiskuljetuksilla voitaisiin lisätä lastikapasiteettia ja saavuttaa edullinen kuljetusratkaisu.

4.2 Logistiikkajärjestelmä

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämällä logistiikkajärjestelmillä voidaan parantaa toimitusvarmuutta käyttöpaikoille kilpailukykyisesti ja ympäristöystävällisesti. Kustannusten, päästöjen ja liiketoimintamallien tulosten perusteella voidaan esittää toimivia konsepteja vesitiekuljetuksen sisältämään hankintaan.

Käytännössä yksittäisen laitoksen metsähakkeen käytön volyyymi vaikuttaa hankinta-alueen kokoon ja näin ollen määrää edullisimman logistiikkamenetelmän. Korjuuketjujen kalustoratkaisut ja logistiikkajärjestelmät liiketoimintamalleineen pitäisi soveltaa käytäntöön käyttöpaikkakohtaisesti, mutta toisaalta pyrkiä vapaan kilpailun puitteissa luomaan liike- ja kansantaloudellisia hyötyjä edistäviä järjestelmiä. Liiketaloudellisina hyötyinä voidaan saavuttaa kustannustehokkaampia järjestelmiä yrityksille ja kansantaloudellisina hyötyinä esimerkiksi päästötaloudelta tehokkaampia järjestelmiä.

4.2.1 Kustannukset

Kuljetuskokeilujen kustannuksissa päästiin lähelle voimalaitoksien keskimääräistä hintatasoa ja puustamaksukykyä kokonaiskustannuksien vaihdellessa 15,4 – 21,5 €/MWh välillä riippuen kuljetusketjusta. Vesitiekuljetuksien kustannukset lastauksineen ja purkuineen olivat suurproomuka-

lustolla noin 20 % kokonaiskustannuksista, jolloin täydellä lastilla kustannukset olivat 0,02 €/MWh/km. Edullisimmaksi kuljetusketjuksi osoittautui tienvarsihaketus ennen proomukuljetusta. Terminaalihaketusjärjestelmä on kuitenkin perusteltu vaihtoehtoinen tapa suurimittakaavaisessa hankinnassa lastauspaikoille. Kuljettaminen metsähakkeena vesiteitse on perustelluinta paremman tiiviyyden ja käsiteltävyyden vuoksi. Päätehakkuiden hakkuutähteestä tuotettu metsähake on ainoa metsäpolttoaine-erä, jonka logistiikkakustannukset kestävät keskimääräisen voimallistosten hintatason vesitiekuljetuksen sisältämässä hankinnassa. Muiden metsäpolttoaine-erien, pienpuun ja kantojen, vesitiekuljetuksen sisältämän logistiikan kustannukset ovat vielä liian korkeat ja hankintaa täytyy kehittää. Pienpuun saarikorjuulla on edellytykset kannattavalle toiminnalle lyhyempien kuljetusetäisyyksien ja Kemera-tukien ansiosta. Kuljetuskokeilujen kustannuksista löytyy paljon tehostamispotentiaalia.

Vesitiekuljetuksen simuloinnissa edullisimmaksi vaihtoehdoksi vesitiekuljetuksen osalta osoitettiin pienen aluksen ja suuren proomun muodostama kytkye. Lastausmenetelmissä edullisimmaksi osoittautui hihnakuljetinjärjestelmä, joka olisi riippumaton satamatoiminnoista. Tätä kuljetusjärjestelmää testattiin käytännössä ESE Oy:n kuljetuskokeiluissa. Tällaisen ketjun käyttöön otolla päästään parhaimmillaan kilpailukykyisempään logistiikkaan verrattuna hakerekkakuljetusketjuun kuljetusetäisyyden ollessa yli 100 km maanteitse. Simuloinnin edullisimpien vesitiekuljetusvaihtoehtojen kustannukset vaihtelivat välillä 10,8 – 12,1 €/MWh, joista lastauksen ja puron kustannus hihnakuljettimella vaihteli välillä 0,4 – 0,6 €/MWh ja 100 km vesitiekuljetus 0,9 – 2,0 €/MWh. Kuljetusketjujen kilpailukykyyn ja kannattavuuteen vaikuttaa ratkaisevasti vertailuvaihtoehtojen kalustot ja menetelmät, vuosittaiset käyttötunnit ja suoritteet sekä toiminnan tehokkuus. Kuljetuskokeilussa jouduttiin käyttämään lisäksi apualusta, jonka kustannuksia ei simuloinneissa otettu huomioon.

Metsähakkeen toimitusvarmuutta käyttöpaikoille pystytään parantamaan terminaalien puskurivarastoja ja suuren lastikapasiteetin omaavia proomukuljetuksia hyödyntämällä. Liikennepolttoaineiden hinnan kohoaminen nostaa suhteessa enemmän hakerekan kokonaiskustannuksia kuin proomukuljetuksen, jolloin metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen kilpailukyky paranee. Toisaalta aluksissa käytettävän moottoripolttoöljyn hintataso on noussut nopeammin kuin hakerekoissa käytettävän diesel-öljyn. Vesitiekuljetuksen sisältämää logistiikkaa kehittämällä pystytään parantamaan kilpailukykyä entisestään ja ottamaan kuljetusketjut osaksi käytännön toimintaa suurimittakaavaisessa metsäpolttoaineiden hankinnassa.

Talviliikennöinnille ei löydetty edellytyksiä tutkimuksessa mukana olevilla kalustoilla, sillä jäänsärkeminen hidastaa kulkua ja nostaa suuren aluksen kustannuksia. Lastikapasiteetin kasvattamisella ja kalusto- ja väylävalinnoilla voidaan kuitenkin kehittää ympärivuotista talviajan kuljetusta kustannustehokkaampaan suuntaan. Metsähakkeen hintatason kohoaminen voisi myös käynnistää talviajan kuljetuksia. Terminaaliratkaisuilla voidaan varautua talviajan suurempaan metsähakkeen käyttöön. Mahdollisen biojalostamon metsähakkeen käyttötarve olisi ympärivuotinen, jolloin proomuilla voitaisiin toimittaa raaka-ainetta enemmän sulan veden aikaan.

4.2.2 Liiketoiminta

Ulkoistetut liiketoimintamallit osoittautuivat asiantuntijahaastattelujen ja saatavuustarkastelujen perusteella paremmiksi vaihtoehdoiksi vesitiekuljetuksen sisältämässä hankinnassa kuin nykyisen kaltainen urakointimalli. Koordinointimalli voidaan nähdä jatkokehityksenä ulkoistamismallin mukaiselle liiketoiminnalle.

Liiketoimintakonsepteiksi vesitiekuljetuksen sisältämälle logistiikalle esitetään terminaaliverkostomallin mukaista toimintaa joko keskitetyistä tai hajautetuista terminaaleista. Keskitettyjen terminaalien etuna on jatkuvan toiminnan kustannussäästöpotentiaali, parempi toimitusvarmuus ja tehokas organisointi sekä hankinnan laajentaminen etäisille katvealueille. Keskitettyinä ter-

minaaleina voi toimia muutamia suuria metsäpolttoaineiden jalostukseen keskittyneitä terminaalileja saatavuudeltaan ja ominaisuuksiltaan parhaissa paikoissa.

Hajautettuja terminaalipaikkoja voivat olla lastauspaikkojen puskurivarastot, raakapuun ja metsäpolttoaineiden integroidut terminaalit uiton pudotuspaikoilla sekä nuoren metsän kunnostuksen saari- ja rantakohteet. Hajautettujen terminaalien etuina ovat lyhyempien kuljetusetäisyyksien tuomat kustannussäästöt ja hankinnan laajentaminen pää- ja sivuväylien matalamman syväyksen ja ahtaampien väylien vesiteille, joille päästäisiin pienemmällä kalustolla.

Ulkoistamalla terminaaliverkostomallin sisältämä prosessi terminaaliyritykselle on mahdollista luoda tehokkaampi ja hallitumpi organisointi sekä lisätä metsäbiomassan saatavuutta lastauspaikkojen ympäriltä. Ulkoistetuista toimintamalleista olisi asiantuntijahaastattelujen perusteella eniten hyötyä lastausterminaalitoimintoihin verrattuna nykyisen kaltaiseen urakointimalliin. Aluskuljetusten ympärivuotisuuden varmistamiseen liittyvien kehittämistoimien käytön esteitä ei ulkoistetuilla toimintamalleilla pystytä ratkaisemaan.

4.2.3 Päästöt

Kuljetuslogistiikan päästötarkastelujen perusteella vesitiekuljetuksen sisältämällä hankinnalla pystyttäisiin kasvattamaan metsähakkeen kaukokuljetusetäisyyttä ympäristöystävällisesti. Kuljetusten päästöt ovat pienet verrattuna puun poltossa saavutettavaan päästöintensiivisempien polttoaineiden korvaavuushyötyyn. Kuljetusetäisyyksien kasvattaminen vesiteitse on perusteltua päästötalouden näkökulmasta.

Rautatiekuljetuksen sisältämä logistiikka tuotti enemmän päästöjä kuin perinteinen logistiikka johtuen tapaustarkastelun pitemmästä kaukokuljetuksesta ja vertailussa käytetystä diesel-junasta. Vertailukelpoisilla matkoilla myös rautatiekuljetuksen sisältämä hankinta tuottaisi päästövähennyksiä verrattuna hakerekkaketjuihin. Rautatiekuljetus sähköjunilla olisi päästötaloudessa edullinen ratkaisu.

Päästövähennyksien saavuttaminen logistiikassa edellyttää eri kuljetusmuotojen optimoimista olosuhdetekijät huomioon ottaen. Liikennepolttoaineiden hintojen nousu ajaa organisaatiot hakemaan päästö- ja energiataloudellisinta ratkaisua logistiikassa markkinalähtöisesti. Menopaluu kuljetusmahdollisuuksia kehittämällä voitaisiin vähentää laskennallisia päästöjä vesitiekuljetussissakin. Liiketoimintamallien kehittämisellä voitaisiin vaikuttaa myös logistiikan päästötalouteen.

4.3 Kuljetusvirrat

Metsäpolttoaineiden kysyntä suurvoimalaitoksissa kasvattaa tarvetta ottaa käyttöön rekkakuljetuksille vaihtoehtoisia kaukokuljetusratkaisuja. Vesitiekuljetusten sisältämällä logistiikalla voidaan kasvattaa metsähakkeen hankinta-aluetta saatavuudeltaan parempiin paikkoihin. Satelliitti-terminaalin ja vesitiekuljetuksen avulla päästään käyttöpaikkojen välisille katvealueille.

Metsäbiomassan saatavuuden varmistaminen lastausterminaalille on tärkein tekijä toiminnan menestyksekkäälle alkamiselle. Saatavuutta voidaan parantaa ottamalla käyttöön ulkoistettuja toimintamalleja, laajentamalla alkukuljetusta terminaaliin tai laajentamalla hankintaa muihin biomassoihin. Metsäpolttoaineiden saatavuus vaihtelee eri lastauspaikkojen välillä ja lisäksi vaihtelua on eri metsäpolttoaine-erien välillä. Terminaaliratkaisuissa pitäisikin pyrkiä hyödyntämään kaikkia metsäpolttoaine-eriä, mutta myös laajentamaan hankintaa turpeeseen ja peltobiomassaan. Myös perinteisen raakapuun käsittelyn ja metsäpolttoaineiden välillä voitaisiin löytää toimintamalleja, jotka tukisivat toisiaan.

Metsäpolttoaineiden kuljetuksessa kuljetusetäisyydellä on keskeinen merkitys kustannuksiin, sillä perinteisessä hankinnassa rekkojen lastitulavuus on rajallinen ja lastitiiviyys heikko. Proomukuljetuksissa voidaan kasvattaa lastitulavuutta ja parantaa lastitiiviyttä, jolloin päästään pienempiin kaukokuljetuksen yksikkökustannuksiin. Aluskalustoa on kuitenkin poistunut toiminnasta ja kalusto on osittain vanhentunutta. Mikäli metsäpolttoaineen käyttömäärät ja kaukokuljetusosuudet kasvavat arvioidulla tavalla, tarvitaan uutta kalustoa lisää. Raakapuun kaukokuljetukset tulevat lisääntymään myös jatkossa Venäjän asettamien korkeampien puutullien myötä. Vuoden 2025 arvioitu vesitiekuljetusmäärä metsähakkeelle (7,5 %) vaatisi vuosittain noin 80 kpl suurproomukuljetusta tai noin 200 kpl pienproomukuljetusta raakapuukuljetusten lisäksi.

LÄHDELUETTELO

- Alakangas, E (toim.). 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. 172 s. + liitt. 17 s.
- Alakangas, E. & Karttunen, K. 2007. Piirroskuva: Terminaalihaketusjärjestelmä osana metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen sisältämää hankintaa. Eija Alakangas (VTT) ja Kalle Karttunen (LTY).
- Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa. 2007. Professori Rintalan johtaman asiantuntijaryhmän raportti.12.2.2007. Saatavilla: www.ktm.fi
- Asikainen, A. 2007. Biomassan hankinnan haasteet. Julkaisussa: Kariniemi, A (toim.). Kehittyvä puuhuolto 2007 –seminarijulkaisu. Metsäteho Oy.
- Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen, S. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. Saatavissa: http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/
- Bioenergia- lehti. 2008. Polttoaineiden hintataso. Kesäkuu 2008. Nro 4/2008.
- Casén, K. 2007. Proomun suunnittelu. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Joulukuu 2007. 66 s.
- Energiatilastot. 1998. Suomen virallinen tilasto XLII. Helsinki, kauppa- ja teollisuusministeriö. 126 s.
- Eurooppalainen liikennepolitiikka vuoteen 2010: valintojen aika. KOM (2001) 370. Syyskuu 2001.
- Forsell, J. 2007. Työntäjän suunnittelu. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Joulukuu 2007. 65 s.
- Ghazanfari, D. 2008. Vesitiekuljetukse vaihtoehtoisena metsäpolttoaineiden kaukokuljetusmuotona –hankintaketjujen hiilidioksidipäästövertailu. Kansantaloudellisen metsäekonomian pro gradu -työ. Helsingin yliopisto. 82 s. Toukokuu, 2008.
- Haapanen, M. & Vepsäläinen, A. 1999. Jakelu 2020 - asiakkaan läpimurto. Gummerus kirjapaino. Jyväskylä.
- Hakkila, P (toim.). 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia. Loppuraportti. Tekes. 135 s.
- Helynen, S., Flyktman, M., Asikainen, A. & Laitila, J. 2007. Metsätalouteen ja metsäteollisuuteen perustuvan energialiiketoiminnan mahdollisuudet. VTT tiedotteita 2397. ISBN 978-951-38-6943-4. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2397.pdf>
- Helynen, S., Flyktman, M., Mäkinen, T., Sipilä., K. & Vesterinen, P. 2002. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. VTT tiedotteita 2145.
- Hetemäki, L., Harstela, P., Hynynen, J., Ilvesniemi, H. ja Uusivuori, J. (toim.). 2006. Suomen metsiin perustuva hyvinvointi 2015. Katsaus Suomen metsäalan kehitykseen ja tulevaisuuden vaihtoehtoihin. Metlan työraportteja 26. (9.6.2006).

Jäppinen, E., Heinimö, J., Orava, H. & Mäkelä, L. 2006. Metsäpolttoaineen saatavuus, tuotanto ja laivakuljetusmahdollisuudet Saimaan alueella. Mikkelin Ammattikorkeakoulu, Tutkimuksia ja raportteja 11.

Kareinen, T., Hirvelä, H., Sievänen, R. ja Ilvesniemi, H. 2008. Metsien kasvihuonekaasutaseet ja metsien energiakäyttö. Teoksessa: Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset. Tutkimusraportti.

Kariniemi, A. 2007. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2006. Metsätehon katsaus nro 29. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_29.pdf

Koneyrittäjä-lehti 6/2008. Raaka-aineen alkuperä luokittelun pohjana. Alakangas, E. & Vartiamäki, T.

Korhonen, K., Heikkinen, J., Henttonen, H., Ihalainen, A., Pitkänen, J. & Tuomainen T. 2006. Suomen metsävarat 2005-2005. Metsätieteen aikakauskirja 1B/2006.

KTM 2003. Kivihiilen käytön hallittu rajoittaminen sähkön ja lämmön tuotannossa. Toimikunnan väliraportti, valmistunut 12.12.2003. 70 s.

KTM. 2005 a. Puupolttoaineen kysyntä, tarjonta ja toimintavarmuus päästökauppatilanteessa. Viite 60K04773.01-Q060-031 (DRAFT) Elektrowatt-Ekono Oy. Taustaselvitys 1/2005. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Espoo.

KTM. 2005 b. Turpeen energiakäytön asema Suomen energiajärjestelmässä. Viite 60K05458.01-Q210-002B Elektrowatt-Ekono. Selvitystyö 14/2005. Kauppa- ja teollisuusministeriö. ISBN 1459-9376. 97 s.

Kärhä, K. 2007. Machinery for forest chip production in Finland in 2007. Metsätehon tuuloskalvosarja.

Liikenne- ja viestintäministeriö 2001. Logistiikan tutkimus- ja kehittämistarpeet, Suunnitelma logistiikan tutkimus- ja kehittämisohjelmaksi, Liikenne- ja viestintäministeriön mietintöjä ja muistioita B 1/2001

Lindholm, M. & Lindroos, H. 1981. Proomurungon muodon suunnittelu ja vastuksen arviointi. Lisäpainos. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Laivatekniikan laboratorio.

Mantsinen Oy. Materiaalinkäsittelykoneita valmistava yritys. www.mantsinen.com

Merenkululaitos 2008. Viitattu [18.4.2008]. <http://www.fma.fi/toiminnot/vaylat/>

Metsäteollisuuden ja metsäsektorin toimintaedellytystyöryhmä. 2008. Väliraportti 15.2.2008.

Metsätilastollinen vuosikirja 2007. Metsäntutkimuslaitos

MMM, Maa- ja metsätalousministeriö. 2006. Metsäsektorin tulevaisuuskatsaus – Metsäneuvoston linjaukset metsäsektorin painopisteiksi ja tavoitteiksi. Saatavissa: http://wwwb.mmm.fi/metso/ASIAKIRJAT/Metsaneuvoston_tulevaisuuskatsaus

- Mopro Oy. Kuva: Työntäjä Arppe ja Eurooppa II a-mallin proomu Rissanen. Saatavissa: www.mopro.fi
- Mälkki, H. & Virtanen, Y. 2001. Hakkuu- ja sahatähteiden energiakäytön elinkaariarviointi. Loppuraportti. VTT Kemiantekniikka.
- Niinilampi, V. 2007. Proomun suunnittelu. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Joulukuu 2007. 41 s.
- NK Consult. Kuvat: ESE Oy:n kuljetuskokeilun järjestäjän arkisto.
- Palander, T. 2007. Autokuljetuksen uudet organisointimahdollisuudet. Julkaisussa: Kehittyvä puuhuolto 2007. Seminaarijulkaisu 14-15.2.2007 Jyväskylä.
- Palander, T., Säynäjoki, T. ja Högnäs, T. 2006. Puutavaran autokuljetuksen uudet organisointimallit. Metsätieteen aikakauskirja 4/2006.
- Pingoud, K. & Lehtilä, A. 2002. Fossil carbon emissions associated with carbon flows of wood products. Evaluation and development of methods. VTT Research Notes 2189, 138 p.
- Porter, M.E. 1985. Competitive advantage – creating and sustaining superior performance. New York. Free press. 557 s.
- Proomukalustotoimikunnan mietintö. 1978. Komitean mietintö 1978:25. Helsinki.
- Purhonen, I. 2004. Metsähakkeen kuljetuslogistiikan kehittäminen sisävesillä –projekti. Selvitys: Vuoksen ja kymijoen vesistöalueiden lastauspaikat metsähakkeen vesitiekuljetuksille. Järvi-Suomen Uittoyhdistys.
- Pöyry Energy Oy. 2008. Verkosto- ja rahoitusstrategia biopolttoaineen tuotannossa. Kajaani 27.2.2008. Laatijat: Olli Sipilä ja Perttu Lahtinen, Pöyryn energiakonsultointi.
- Ranta, T. & Korpinen, O-J. 2007. How to analyze and maximize the forest fuel supply availability to power plants in Eastern Finland. Bioenergy 2007. International Bioenergy Conference and Exhibition. September 3rd-6th 2007. Jyväskylä.
- Valsta, L., Ahtikoski, A., Horne, P., Karttunen, K., Kokko, K., Melkas, E., Mononen, J., Pingoud, K., Pohjola, J. & Uusivuori, J. 2006. Puu ilmastomuutoksen hillitsijänä. Loppuraportti. Metsäekonomian laitoksen tutkimusraportteja 39. Helsinki 2006. 57 s. Saatavissa: <http://www.mm.helsinki.fi/~valsta/carbon/hiililoppuraportti-final.pdf>
- Vigan. Pneumaattisia laitteita valmistava yritys. www.vigan.com
- Ylitalo, E. 2008. Puun energiakäyttö 2007. SVT Maa-, metsä- ja kalatalous 2008 (Metsätalustiedote 15/2008). ISSN 1796-0479, 1797-3074. 5 s.
- Ölji- ja kaasualan keskusliitto 2008. [Viitattu 20.8.2008]. Saatavilla: <http://www.oil-gas.fi/?m=2&id=3>

Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja ja tiheyksiä (Energiatilastot, 1998).

Polttoaine	Mittayksikkö	GJ	MWh	toe	tn/m ³ (tai tn/i-m ³)
Raskas polttoöljy normaali/vähärikk.	tonni	40,60/41,10	11,278/11,417	0,970/0,0982	0,955
Kevyt polttoöljy	tonni	42,50	11,806	1,015	0,845
Dieselöljy	tonni	41,50	11,528	0,991	0,845
Kivihiili	tonni	25,211	7,003	0,602	0,800
Maakaasu (0 °C)	1 000 m ³	36,00	10,00	0,860	0,732
Mustalipeä	t _{ka}	11,70	3,250	0,279	1,415
Koivupilke (halko)	p-m ³	5,40	1,50	0,129	0,400
Sekapilke (halko)	p-m ³	4,51	1,25	0,107	0,350
Polttohake	i-m³	2,88	0,80	0,069	0,300
Sahanpuru	i-m ³	2,16	0,60	0,052	0,300
Kutterin lastu	i-m ³	1,80	0,50	0,043	0,100
Havupuun kuori	i-m ³	2,16	0,60	0,052	0,300
Koivun kuori	i-m ³	2,52	0,70	0,060	0,350
Puupelletit	tonni	16,92	4,70	0,404	0,690
Palaturve	i-m ³	5,04	1,40	0,120	0,380
Jyrsinturve	i-m ³	3,24	0,90	0,077	0,320

Muuntokertoimet

	toe	MWh	GJ	Gcal
toe	1	11,630	41,868	10,0
MWh	0,08598	1	3,6	0,86
GJ	0,02388	0,2778	1	0,2388
Gcal	0,1	1,1630	4,1868	1

Hakkuutähteiden (Ht) ja kantojen teknistaloudellinen saatavuus valituille lastauspaikoille.
Joidenkin lastauspaikkojen hankinta-alueet menevät päällekkäin, jolloin lastauspaikkakohtaisia kertymisiä ei voida laskea luotettavasti yhteen.

Ajoetäisyys lastauspaikalta								
Saatavuus [GWh/a]								
Lastauspaikka		Yht.	30 km		20 km		10 km	
			Ht	Kannot	Ht	Kannot	Ht	Kannot
1	Kuopio*	92	49	43	20	14	0	1
2	Joensuu*	65	33	32	8	8	1	1
3	Puhos*	145	78	67	26	23	5	5
4	Varkaus*	178	94	84	39	35	19	17
5	Ristiina	107	40	67	16	23	3	5
6	Lappeenranta*	158	84	74	41	37	7	7
7	Savonranta	102	55	47	30	26	6	5
8	Kivisalmi	31	23	8	14	5	5	1
9	Iisalmi*	132	71	61	25	22	4	4
10	Nurmes	66	36	30	14	12	2	1
11	Ahkiolahti	139	74	65	26	23	5	4
12	Kuuslahti	154	90	64	53	38	18	14
13	Eno	87	48	39	18	14	5	4
14	Retulahti	49	27	22	11	9	1	1
15	Möhköskoski	189	100	89	53	47	12	11
16	Mustinlahti	74	40	34	26	22	4	3
17	Lamperila	106	57	49	35	30	7	6
18	Haukkoniemi	17	9	8	3	3	1	1
19	Patasaari	11	6	5	2	2	0	0
Yhteensä		1902	1014	888	460	393	105	91

* Paikkakunnalla on olemassa tai suunnitteilla metsähaketta käyttävä suurvoimalaitos

Hankkeessa toteutetut julkaisut ja raportit

Raportit:

Karttunen, K., Jäppinen, E., Väätäinen, K. & Ranta, T. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Tutkimusraportti ENTE B-177. ISBN 978-952-214-624-3 (paperback), ISBN 978-952-214-625-0 (PDF), ISSN 1459-2630.

Karttunen, K., Ranta, T., Jäppinen, E., Hämäläinen E. & Vartiamäki, T. 2007. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto. Tutkimusraportti EN B-172. (2007), 68 s. + liitt. 4 s. ISBN 978-952-214-374-7 (paperback), ISBN 978-952-214-383-9 (PDF), ISSN 1459-2630.

Konferenssi- ja seminaariesitelmät:

Väätäinen, K., Karttunen, K., Asikainen, A. & Ranta, T. 2008. Operational cost-efficiency of waterway transporting of wood chips in the Lake Saimaa waterways. Warwick IEA conference. (Manuscript)

Karttunen, K. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Climbus-ohjelman vuosiseminaari 11.6.2008, Hämeenlinna, Aulanko.

Karttunen, K., Ranta, T., Jäppinen E., Korpinen O-J. & Hämäläinen, E. 2008. Biomass production through satellite terminals and waterway transportation of wood chips. World Bioenergy 2008. Jönköping 27-29 May 2008.

Karttunen, K. 2007. Metsähakkeen kaukokuljetus proomukalustolla. Bioenergian jatko-opintoseminaari 11.12.2007. Mikkeli.

Konferenssi- ja seminaarijulkaisut:

Väätäinen, K., Karttunen, K., Asikainen, A. & Ranta, T. 2008. Operational cost-efficiency of waterway transporting of wood chips in the Lake Saimaa waterways. Warwick IEA conference (Manuscript).

Jäppinen, E., Karttunen, K., Ranta K., Alve, H. & Soukka, R. 2008, Geographical information system (GIS) and life cycle assessment (LCA) methods combined for evaluation of biomass supply chain. 16th European Biomass Conference & Exhibition. From Research to Industry and Markets. 2-6 June. Feria Valencia. Spain.

Karttunen, K., Ranta, T., Jäppinen E., Korpinen O-J. & Hämäläinen, E. 2008. Biomass production through satellite terminals and waterway transportation of wood chips. World Bioenergy 2008. Jönköping 27-29 May 2008.

Karttunen, K., Ranta, T. & Jäppinen E. 2007. Waterway transportation potential of forest fuels in the Lake Saimaa region. Bioenergy 2007. International Bioenergy Conference and Exhibition. September 3rd-6th 2007. Jyväskylä.

Karttunen, K. Ranta, T. & Andersin, K. 2007. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Julkaisussa , Ilmastonmuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet. Jussila, J. (toim.) , p. 30-38. ISBN 978-952-457-374-0, Tekes, ClimBus- teknologiaohjelman katsaus 2007.

Karttunen, K., Jäppinen, E., Soukka, R. & Ranta, T. 2007. Combining Life Cycle Assessment (LCA) and Geographical Information System (GIS) Methods for Emission Analysis of Forest Fuel Procurement Chains. 8th Finnish Conference of Environmental Sciences. 10-11 May, Mikkelin Finland.

Karttunen, K., Ranta, T. & Jäppinen E. 2007. Waterway transportation possibilities of forest fuels in Finland. 15th European Biomass Conference & Exhibition, 7-11 May 2007 in Berlin.

Opinnäytetyöt:

Niinilampi, V. 2007. Proomun suunnittelu. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Joulukuu 2007. 41 s.

Forsell, J. 2007. Työntäjän suunnittelu. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Joulukuu 2007. 65 s.

Casen, K. 2007. Proomun suunnittelu. Opinnäytetyö. Turun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikka. Joulukuu 2007. 66 s.

Ghazanfari, D. 2008. Vesitiekuljetus vaihtoehtoisena metsäpolttoaineiden kaukokuljetusmuotona –hankintaketjujen hiilidioksidipäästövertailu. Kansantaloudellisen metsäekonomian pro gradu -työ. Helsingin yliopisto. 82 s. Toukokuu, 2008.

Harjoittelutyö:

Itä-Savon metsänhoitoyhdistys. 2007. Tekijä: Otto Kankkunen. Energiapuun saarikorjuuketjun dokumentointi Pihlajavedellä kesällä 2007.



Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Digipaino 2008

ISBN 978-952-214-624-3 (paperback)

ISBN 978-952-214-625-0 (PDF)

ISSN 1459-2630