

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto

Tutkimusraportti EN B-172

Kalle Karttunen, Tapio Ranta, Eero Jäppinen, Essi Hämäläinen ja Tomi Vartiamäki

## **METSÄPOLTTOAINEIDEN VESITIEKULJETUSMAHDOLLISUUDET**



Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta. Energia- ja ympäristötekniikan osasto

PL 181

50101 MIKKELI

ISBN 978-952-214-374-7 (paperback)

ISBN 978-952-214-383-9 (PDF)

ISSN 1459-2630

Mikkeli 2007



# TIIVISTELMÄ

Karttunen, K., Ranta, T., Jäppinen, E., Hämäläinen E. & Vartiamäki, T. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet

Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto

Tutkimusraportti EN B-172

Mikkeli 2007

68 sivua, 34 kuvaa, 6 taulukkoa, 3 liitettä

ISBN 978-952-214-374-7 (paperback)

ISBN 978-952-214-383-9 (PDF)

ISSN 1459-2630

Metsäpolttoaineen kysyntä kasvaa voimakkaasti johtuen päästökaupasta ja vaihtoehtoisten polttoaineiden hintatason kohoamisesta. Metsäpolttoaineen kysynnän kasvu aiheuttaa uusia vaatimuksia polttoaineen hankintaan. Hankintaa täytyy monipuolistaa ja laajentaa, jotta saataisiin riittävä määrä metsäpolttoainetta suurkäyttäjille. Hankintalogistiikkajärjestelmiä täytyy kehittää, jotta saataisiin metsäpolttoainetta kustannustehokkaasti suurkäyttäjille.

Metsäpolttoaineiden kaukokuljetus rekalla ei ole kannattavaa pitkistä etäisyyksistä, sillä metsäpolttoaineiden energiamäärä suhteessa tilavuuteen on alhainen. Vesitiekuljetus on osoittautunut kustannustehokkaaksi raakapuun kuljetuksessa pitkillä etäisyyksillä. Vesitiekuljetus proomukalustolla voisi olla sopiva kuljetusmuoto myös metsäpolttoaineille.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää vesitiekuljetuksen mahdollisuuksia osana metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmää. Julkaisussa käsiteltiin vesitiekuljetuksen sisältämää hankintalogistiikkajärjestelmää metsästä voimalaitokselle. Julkaisu koostui kolmesta osasta. Ensimmäisessä osassa käytiin läpi raakapuun ja metsäpolttoaineiden kaukokuljetusmuotoja. Toisessa osassa tarkasteltiin metsäpolttoaineiden hankintamenetelmiä. Kolmannessa osassa keskityttiin tarkastelemaan tarkemmin terminaalihaketusjärjestelmää osana metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksia. Tutkimus koostui asiantuntijahaastatteluista ja aikaisemmasta tutkimustiedosta.

Tämä julkaisu auttaa hahmottamaan vesitiekuljetuksen mahdollisuuksia osana metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkaa. Parhaimmillaan vesitiekuljetus mahdollistaa kustannustehokkaan vaihtoehdon laajentaa metsäpolttoaineiden hankinta-aluetta.

Hakusanat: Metsäpolttoaine, metsähake, logistiikka, vesitiekuljetus

## ABSTRACT

Karttunen, K., Ranta, T., Jäppinen, E., Hämäläinen, E. & Vartiamäki, T. Waterway transportation possibilities of forest fuels

Lappeenranta University of Technology, Department of Energy and Environment Technology  
Research Report EN B-172

Mikkeli 2007

68 pages, 34 figures, 6 tables, 3 appendices

ISBN 978-952-214-374-7 (paperback)

ISBN 978-952-214-383-9 (PDF)

ISSN 1459-2630

The use of wood fuels is increasing in Finland mainly because of the emission trade and the price level of other fuels. That makes demands on the logistical procurement system of forest fuels. The procurement area of forest fuels must be enlarged to get sufficient biomass from the forest to the major customers (CHP, combined heat and power plants). The supply logistics of forest fuels must be developed to get biomass cost-efficiently to the major energy customers.

The truck transportation of forest fuels is not profitable for long distances. The amount of energy that can be transported by truck is rather small because of the low energy and bulk density level of forest fuels. Waterway transportation has been turned out to be a cost-efficient form of round wood logistics for long distances. Waterway transportation by vessels and barges could also be a suitable logistical method for forest fuels.

The aim of the study was to determine the possibilities of the inland waterway transportation as a part of the supply system of forest fuels. The publication consists of three parts. Firstly, the round wood and forest fuels long-distance transportation methods were gone through. Secondly, the supply systems of forest fuels were examined. Thirdly, the terminal system as a part of waterway transportation was investigated more closely. The study was consisted of the special interviews and the literature survey of previous studies.

The results of this study will help to understand the possibilities of waterway transportation as a part of the supply system of forest fuels. Waterway transportation is a potential way to enlarge the procurement area of forest fuels.

Keywords: Forest fuel, logistics, waterway transportation



## ESIPUHE

Tässä julkaisussa tarkastellaan metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuuksia. Vuoksen vesistöalue tarjoaa laajat mahdollisuudet Itä-Suomen kaupungeille ja teollisuudelle käyttää vesistöä hyödyksi metsäpolttoaineen suurimittakaavaisessa hankinnassa. Vesiteiden potentiaali metsäpolttoaineiden kuljetuksissa liittyy hankinta-alueiden laajentamiseen kustannustehokkaasti, päästövähennyksiin sekä satamien ja pudotuspaikkojen hyödyntämiseen terminaalipaikkoina. Vesitiekuljetukset ovat kustannustehokkaita raakapuunkuljetuksissa verrattuna muihin kuljetusmuotoihin pitkillä kuljetusmatkoilla. Laskennalliset yksikkökustannukset ja -päästöt alentuvat johtuen suurista kuljetusmääristä ja pitkistä kuljetusetäisyyksistä. Vesitiekuljetukset mahdollistavat hankinta-alueen laajentamisen sellaisille katvealueille, joista ei vielä ole suurimittakaavaista energiapuun hankintaa ja toisaalta mahdollistavat lastaus- ja purkupaikkojen hyödyntämisen metsäpolttoaineiden terminaalipaikkoina. Julkaisussa on rajoitettu tarkastelemaan ja vertailemaan pääasiassa metsäpolttoaineiden hankintalogistiikan kustannuksia perustuen aikaisempaan tutkimustietoon.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston bioenergiatekniikan laboratoriossa toteutetaan ”Metsäpolttoaineen vesitiekuljetus proomukalustolla” -tutkimushanke. Tutkimustyön vastuullisena johtajana toimii prof. Tapio Ranta, projektipäällikkönä MMM Kalle Karttunen ja projektityöntekijänä MMM Kai Andersin. Alkuvaiheen esiselvitykseen on osallistunut DI Eero Jäppinen, DI Essi Hämäläinen ja MMM Tomi Vartiamäki. Tutkimusta rahoittaa Teknologian kehittämiskeskuksen (Tekes) Climbus-ohjelma (ilmastonmuutoksen hillinnän liiketoimintamahdollisuudet) sekä alalla toimivat yritykset (Mopro Oy, Saarisavotta Oy, Perkaus Oy, Metsäteho Oy, Etelä-Savon Energia Oy, Stora Enso Oyj) ja yhteisöt (Järvi-Suomen Uittoyhdistys, Suur-Savon energiasäätiö). Tässä julkaisussa on käytetty apuna vuonna 2006 ilmestynyttä ”Metsäpolttoaineen saatavuus, tuotanto ja laivakuljetusmahdollisuudet Saimaan alueella” -julkaisua /1/.

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

Mikkeli huhtikuu 2007

Kalle Karttunen

# KÄYTETYT LYHENTEET

## Merkinnät

k-m <sup>3</sup>	kiintokuutiometri
m <sup>3</sup>	kuutiometri (= k-m <sup>3</sup> )
i-m <sup>3</sup>	irtokuutiometri
kehys-m <sup>3</sup>	kehyskuutiometri

1 k-m<sup>3</sup> metsähaketta ~ 2,5 i-m<sup>3</sup>

1 i-m<sup>3</sup> metsähaketta ~ 0,80 MWh

1 k-m<sup>3</sup> metsähaketta ~ 2 MWh

1 solmu = 1 852 m/h

m<sup>3</sup>km kuutiokilometri  
(kuljetussuorite = kuljetustyön määrä)

toe ekvivalenttinen öljytonni eli öljytonnia vastaava määrä

## Yksiköt

€	Euro
c	sentti
h	tunti
J	Joule
kg	kilogramma
m	metri
m <sup>2</sup>	neliömetri
m <sup>3</sup>	kuutiometri
min	minuutti
s	sekunti
t	tonni
a	vuosi
W	Watti
%	prosentti, 1/100
°C	Celsiusaste

## Yksiköiden kertoimet

k	kilo = 10 <sup>3</sup>
M	mega = 10 <sup>6</sup>
G	giga = 10 <sup>9</sup>
T	tera = 10 <sup>12</sup>

**Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja, tiheyksiä ja muuntokertoimia: liite III.**

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Tutkimushankkeen tausta.....	10
1.2	Tutkimuksen tavoite ja toteutus.....	11
2	RAAKAPUUN JA METSÄPOLTTOAINEIDEN KAUKOKULJETUS.....	12
2.1	Raakapuun ja metsäpolttoaineiden kuljetus Suomessa.....	12
2.1.1	Raakapuun kuljetus.....	12
2.1.2	Metsäpolttoaineiden kuljetus.....	15
2.1.3	Metsäpolttoaineen maantiekuljetus irtotavarana.....	16
2.1.4	Metsähakkeen maantiekuljetus.....	17
2.2	Raakapuun vesitiekuljetus.....	18
2.2.1	Uitto.....	20
2.2.2	Alus.....	21
2.3	Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus.....	23
2.3.1	Proomukuljetuspotentiaali.....	23
2.3.2	Proomukuljetuskapasiteetti.....	26
3	METSÄPOLTTOAINEEN HANKINTAKETJUT.....	27
3.1	Metsähakkeen ominaisuudet.....	27
3.2	Polttoaineen hankintamenetelmät.....	29
3.2.1	Palstahaketusjärjestelmä.....	29
3.2.2	Välivarastohaketusjärjestelmä.....	29
3.2.3	Käyttöpaikkahaketusjärjestelmä.....	30
3.2.4	Terminaalihaketusjärjestelmä.....	30
3.2.5	Metsähakkeen tuotanto proomukuljetuksiin.....	31
3.3	Metsäpolttoaine-erät.....	32
3.3.1	Hakkuutähde.....	32
3.3.2	Pienpuu.....	34
3.3.3	Kannot.....	37
4	VESITIEKULJETUS OSANA TERMINAALIHAKETUSJÄRJESTELMÄÄ.....	39
4.1	Lastaus- ja purkupaikkojen terminaalityiminnot.....	40
4.1.1	Lastauspaikat.....	43
4.1.2	Lastausmenetelmät.....	44
4.1.3	Purku- ja käyttöpaikat.....	47
4.1.4	Purkumenetelmät.....	47
4.2	Kustannusten muodostuminen.....	48
4.2.1	Tienvarsihinta.....	49
4.2.2	Alkukuljetus.....	50
4.2.3	Haketus.....	52
4.2.4	Terminaali-, varastointi- ja organisaatiokustannukset.....	54
4.2.5	Lastaus ja purku.....	56
4.2.6	Proomukuljetus.....	56

4.2.7	Yhteenveto kustannuksista .....	58
4.2.8	Metsäpolttoaineiden rajakuljetusetäisyys .....	59
5	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	60
	LÄHDELUETTELO .....	64

## **LIITTEET**

Liite I	Alusyrittäjien yhteystietoja	
Liite II	Potentiaalisia metsähakkeen käyttäjiä Vuoksen vesistöalueen läheisyydessä	
Liite III	Tyypillisiä metsäpolttoaineiden tehollisia lämpöarvoja, tiheyksiä ja muuntokertoimia.	

## 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. Päästövähennyksiä on mahdollista saavuttaa lisäksi korvaamalla saastuttavia kuljetusmuotoja. Päästötarkastelussa pitääkin kiinnittää huomiota koko toimitusketjun välittömiin ja välillisiin kokonaispäästöihin. Metsäpolttoaineen käyttö voi mahdollistaa päästövähennysten aikaansaamisen kaikissa ketjun osavaiheissa.

Metsähakkeen käyttöä on tavoitteena nostaa Suomessa vähintään 8 miljoonaan kuutiometriin vuodessa vuoteen 2015 mennessä /2/. Suurin käyttömäärien lisäysmahdollisuus on teollisuuden ja kaukolämmön sähköä ja lämpöä tuottavissa voimalaitoksissa (CHP-laitokset) /3/. Myös toisen sukupolven liikenteen biopolttoaineiden tuotantolaitokset saattavat yleistyä ja kasvattaa merkittävästi metsähakkeen käyttömääriä tulevaisuudessa. Metsähakkeen toimitusketjun on oltava kilpailukykyinen vaihtoehtoisten polttoaineiden hankintaan nähden. Metsähakkeen hankintalueiden laajentaminen ja metsäpolttoaine-erien monipuolistaminen vaatii uudenlaisia logistisia ratkaisuja. Vesitiekuljetusketju voisi osaltaan ratkaista logistisia ongelmia vesiteiden varrella sijaitseville voimalaitoksille, joiden on laajennettava metsäpolttoaineiden hankintaa. Lastaus ja purkuterminaalit välivarastopaikkoina saattavat myös parantaa metsäpolttoaineen toimitusvarmuutta ja laatua voimalaitoksen näkökulmasta.

Tämän julkaisun tarkoituksena on selvittää metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuuksia Vuoksen vesistöalueella. Julkaisussa tarkastellaan vesitiekuljetusmahdollisuutta osana metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkaa. Julkaisussa käydään läpi metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkaa ja sen kustannusrakennetta sekä vesitiekuljetusta osana raakapuun ja metsäpolttoaineiden kaukokuljetusketjua. Julkaisu on osa ”Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla” -hankekokonaisuutta.

## 1.1 Tutkimushankkeen tausta

Metsäpolttoaineiden hankinnassa kuljetusten osuus on merkittävä. Tähän asti lähes kaikki metsähake tai sen raaka-aine on toimitettu käyttöpaikoille autokuljetuksin. Irtorisuilla kuljetuskustannusten osuus kokonaiskustannuksista on noin puolet ja kuljetuksen kannattavuuden rajaetäisyys on ollut noin 60 kilometriä. Risutukit tai metsähake on kannattanut kuljettaa hieman kauempaa, noin 100 kilometrin etäisyydeltä.

Voimalaitosten näkökulmasta metsähaketta on ollut saatavissa tyypillisesti alle 100 km autokuljetusetäisyydeltä 100-300 GWh/a. Lämpö- ja voimalaitosten metsäpolttoaineiden käyttömäärien kasvaessa ja raaka-aineen kysynnän lisääntyessä on monin paikoin tarvetta laajentaa myös hankinta-alueita. Myös metsäraaka-aineisiin pohjautuva liikennepolttoaineiden tuotanto saattaa tulevaisuudessa lisätä metsähakkeen käyttöä merkittävästi. Autokuljetuksiin perustuvassa hankintaketjussa kuljetuskustannusten osuus metsähakkeen hinnasta kasvaa huomattavasti kuljetusmatkan kasvaessa. Pelkästään autokuljetuksien avulla ei voida enää juurikaan laajentaa taloudellista hankinta-aluetta.

Metsäpolttoaineiden hankintamäärien kasvaessa myös kuljetusmäärät lisääntyvät. Tästä aiheutuu huomattavaa liikennemäärien kasvua sekä myös teiden kulumista. Pelkästään autokuljetusten varaan ei metsäpolttoaineiden kuljetuksia tulisikaan rakentaa, vaan harkintaan tulisi ottaa muut kuljetusvaihtoehdot. Rautatie- ja vesitiekuljetukset ovat myös ympäristöystävällisempiä ja energiataloudellisesti edullisempia kuin autokuljetukset. Myös EU:n valkoisessa kirjassa listataan sisävesiliikenteen kehittäminen yhdeksi maantie- ja rautatieverkon ruuhkautumisen ja ilmakehän saastumisen torjunnan avaintekijäksi /4/.

Suomessa vesitiekuljetusta on käytetty mm. raakapuun kuljetuksiin pitkillä matkoilla. Vuonna 2004 raakapuun vesitiekuljetuksen keskimääräinen kuljetusmatka oli ollut yli 300 kilometriä ja kuljetettu puumäärä 1 476 000 m<sup>3</sup>, josta aluskuljetuksen osuus oli ollut 41 % /5/. Varsinkin Vuoksen vesistön alueella vesitiekuljetus on varteenotettava vaihtoehto myös metsäpolttoaineiden hankinnan logistisessa ketjussa.

Arvoltaan alhaisten metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksiin ei kannata käyttää kalliita erikoisaluksia, vaan kuljetus kannattaa tehdä mahdollisimman edullista kalustoa käyttäen. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksissa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää puunkorjuussa käytettäviä aluksia. Aluskuljetukset ovat raakapuun kuljetusmenetelmiä saari- ja rantaleimikoita korjattaessa.

Tässä aluksilla tarkoitetaan järjestelmää, jossa on useita työntöproomuja (lastiyksikkö) ja yksi työntöalus. Kuljetusketjussa, jossa kuorman lastauksen ja purun osuus kokonaisajanmenekistä on huomattava, voidaan saavuttaa parempi taloudellisuus, kun käytetään edellä kuvattua alusketjua. Tämä perustuu kalliin ja miehitetyn koneyksikön ja työntöproomujen erilliskäyttöön. Kallis koneyksikkö voi olla jatkuvasti liikenteessä, kun taas halvempia lastausyksiköitä voidaan seisottaa lastaus- ja purkupaikoilla niillä vallitsevan työ- ja varastotilanteen mukaisesti.

Hyödyntämällä puunkorjuussa käytettäviä työntöproomuja myös metsäpolttoaineiden kuljetukseen, voitaisiin näiden alusten käyttömääriä kasvattaa ja näin mahdollisesti pienentää kuljetusten yksikkökustannuksia. Käyttämällä kuljetuksissa mahdollisimman edullista kalustoa sekä tehostamalla lastaus- ja purkutyövaiheita olisi kenties mahdollista saada myös metsäpolttoaineen vesitiekuljetusketjun kustannukset kilpailukykyisimmiksi verrattuna autokuljetuksiin.

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusketjun kustannusten minimoimiseksi olisi muiden kuljetusmuotojen ja välivaiheiden osuudet pyrittävä minimoimaan. Alkukuljetusmatkan minimoiminen tarkoittaa tiheän lastauspaikkaverkoston käyttöä. Suurilla aluksilla liikennöinti ei ole juurikaan mahdollista pääväylien ulkopuolella. Tämän vuoksi kyseeseen tulevat alukset, joilla on mahdollista liikennöidä myös pääväylien ulkopuolella (syväys alle 2,4 metriä).

Metsäpolttoaineiden kasvava käyttö tarjoaa useita työmahdollisuuksia hankinta- ja toimitusketjun eri vaiheissa. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusketju tarvitsee toimiakseen yrittäjiä, jotka vastaavat metsäpolttoaineen korjuusta metsistä, kuljetuksesta metsistä proomujen lastauspaikoille, metsäpolttoaineen jalostuksesta hakkeeksi, vesitiekuljetuksesta ja mahdollisesta vesitien jälkeisestä kuljetuksesta. Talviaikaan painottuva käyttö voi myös aiheuttaa tarvetta varastoida polttoainetta suurimman kulutuksen varalle. Tähän tehtävään voidaan tarvita terminaaliyrittäjiä, jotka vastaavat metsäpolttoaineen varastoinnista ja mahdollisesti myös sen jalostamisesta. Ennen toiminnan aloittamista olisi kuitenkin vaihtoehtoiset toimintamallit ja liiketoimintamahdollisuudet kartoitettava ja eri toimitusmallien ongelmakohteet selvitettävä. Näiden tietojen selvittäminen auttaa alalla toimivien ja alalle pyrkivien yritysten toiminnasuunnittelua ja kehittämistä.

## **1.2 Tutkimuksen tavoite ja toteutus**

Tutkimuksen tavoitteena on tarkastella aluskuljetusten sisältämää metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmää. Tutkimuksessa kehitetään uusia liiketoimintamalleja metsäpolttoaineiden aluskuljetuksen ja muiden kuljetusmuotojen kesken sekä tarkastellaan koko tuotantoketjun hal-

lintaan liittyviä kysymyksiä. Nykyisten ja tulevien metsäpolttoaineiden kuljetusvirtojen pohjalta tehdään tarkasteluja eri kuljetusvaihtoehtojen käyttökelpoisuudesta ja -mahdollisuudesta tuotteiden kuljetuskustannusten että kansantaloudelle aiheutuvien kustannusten näkökulmasta. Tarkastelussa otetaan huomioon myös päästöjen synty eri kuljetusvaihtoehtoja käytettäessä.

Tutkimus koostuu seuraavasta kolmesta osa-alueesta. Ensimmäisessä osa-alueessa selvitetään metsäpolttoaineiden vesitiekuljetusmahdollisuudet raakapuun kuljetuksissa käytettäviä työntöproomuja hyödynnettäessä. Toisessa osa-alueessa selvitetään vesitiekuljetuksen soveltuvuus metsäpolttoaineen hankintalogistiikkajärjestelmään pudotuspaikkaverkoston hyödynnettäessä sekä metsäpolttoaineiden aluskuljetusketjussa käytettävät liiketoimintamallit. Kolmannessa osa-alueessa arvioidaan metsäpolttoaineen nykyisiä ja tulevia autokuljetusvirtoja ja kuljetuskustannuksia sekä tarkastellaan vesitiekuljetuksen kilpailukykyä nyt ja tulevaisuudessa.

Tässä julkaisussa käsitellään valikoivasti hankekokonaisuuden ensimmäistä ja toista osa-aluetta. Julkaisusta on erityisesti apua suunniteltaessa metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksen demonstraatioita ja toiminnan kehittämistä.

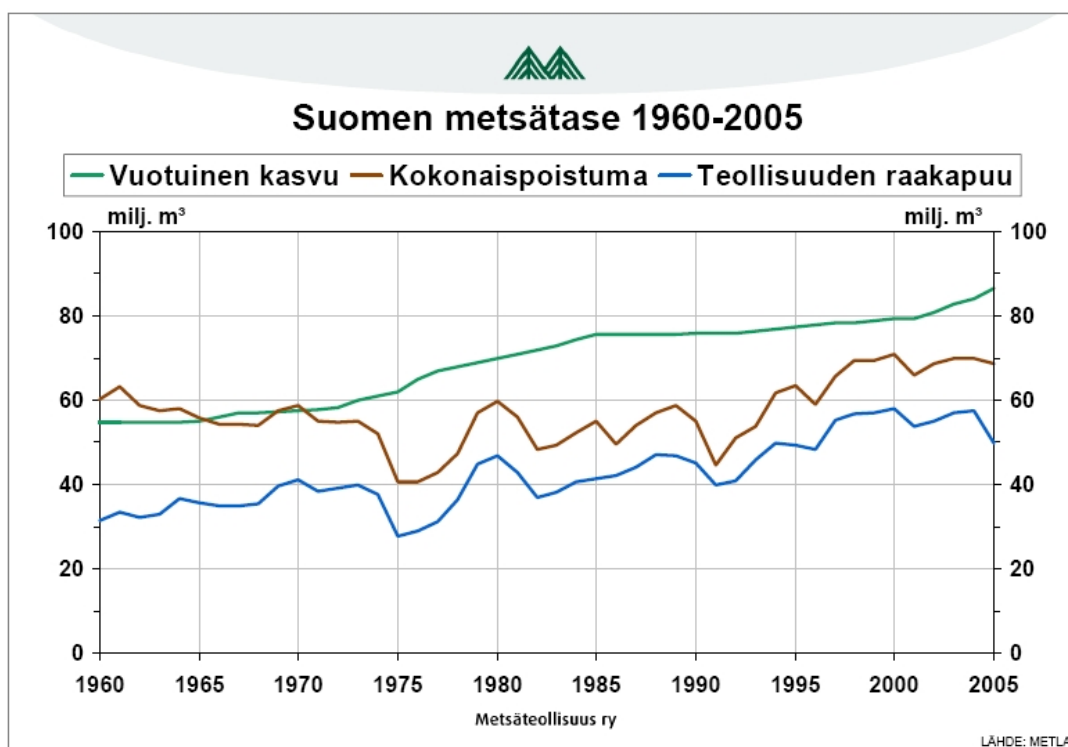
## **2 RAAKAPUUN JA METSÄPOLTTOAINEIDEN KAUKOKULJETUS**

### **2.1 Raakapuun ja metsäpolttoaineiden kuljetus Suomessa**

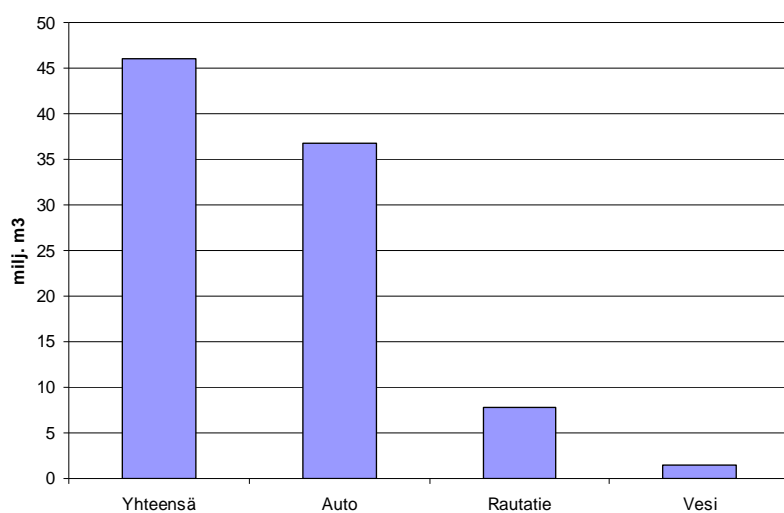
#### **2.1.1 Raakapuun kuljetus**

Suomessa raakapuun kuljetus tapahtuu valtaosin rekoilla ja junilla. Vaikka vesitiekuljetuksella on pitkät perinteet ja se on ollut aikanaan käytännössä ainut suurien määrien kuljetusmuoto, ovat muut kuljetusmuodot korvanneet sen lähes täysin. Kotimaan puunhankinta on ollut keskimäärin 55 milj.m<sup>3</sup>:n tasolla lähes vuosikymmenen vuotta 2005 lukuun ottamatta, jolloin se laski lähinnä paperiteollisuuden työselkkauksen vuoksi 52,6 milj.m<sup>3</sup>:iin (kuva 1) /6/. Kaukokuljetuksen tilastoitu aineisto sisältää yhteensä 46 milj. m<sup>3</sup> kuljetusmäärän /7/, josta vesitse kuljetettiin vain n. 1,5 milj. m<sup>3</sup> eli n. 3 % koko kuljetusmäärästä (kuva 2).





Kuva 1. Suomen metsätase (puuston kasvu ja poistuma) 1960-2005. /8/



Kuva 2. Kaukokuljetusketjujen tilastoidut kuljetusmäärät vuonna 2004. /9/

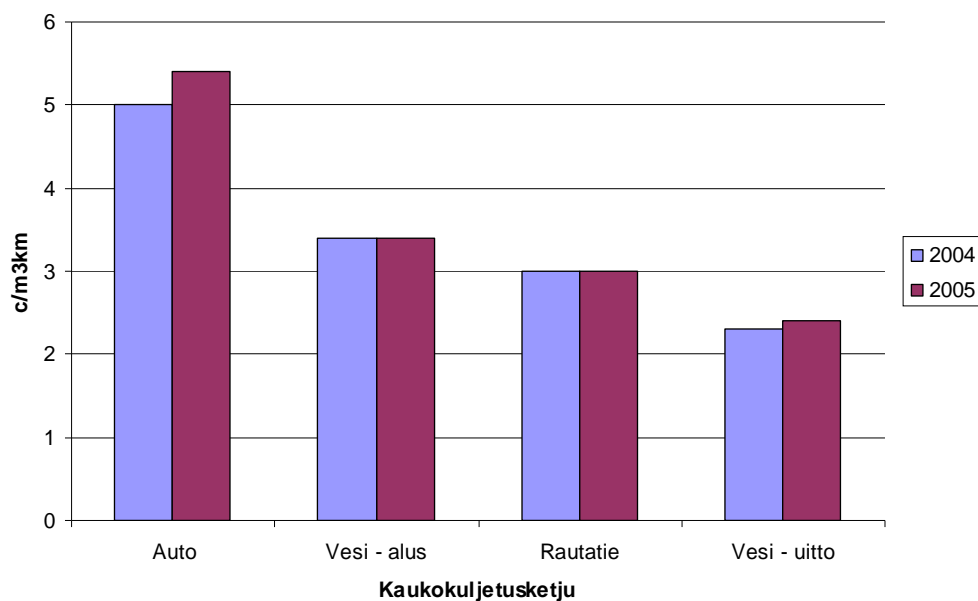
Maantiekuljetuksien suosimiseen ovat osaltaan vaikuttaneet puunhankinnan nopeus, teiden lisääntyminen sekä kaluston parannukset. Taulukossa 1 on esitetty raakapuun tilastoidut kaukokuljetusmäärät ja -kustannukset eri kuljetustapojen ja -ketjujen osalta vuodelta 2004 (taulukko 1).

Taulukko 1. Puun kaukokuljetus 2004. /9/

Kuljetustapa <i>Transportation method</i>	Kotimainen puu – <i>Domestic roundwood</i>					Tuontipu <i>Imported roundwood</i>
	Puumäärä <i>Roundwood volume</i>		Keskikuljetusmatka <i>Mean transportation distance</i>	Yksikkökustannukset <i>Unit costs</i>		
	1 000 m <sup>3</sup>	%		km	c/m <sup>3</sup> km	
<b>Kaukokuljetus yhteensä</b> <i>Total long-distance transportation</i>	<b>46 062</b>	<b>100</b>	<b>144</b>	<b>4,2</b>	<b>6,03</b>	<b>14 615</b>
josta autokuljetus yhteensä <i>of which, total by road</i>	45 666	99	95	5,3	5,02	2 839
<b>Autokuljetus tehtaalle</b> <i>By road to mill</i>	<b>36 730</b>	<b>80</b>	<b>107</b>	<b>5,0</b>	<b>5,39</b>	<b>2 823</b>
<b>Rautatiekuljetusketju</b> <i>Rail transportation sequence</i>	<b>7 856</b>	<b>17</b>	<b>284</b>	<b>3,0</b>	<b>8,58</b>	<b>8 291</b>
Autokuljetus rautatielle <i>By road to railway</i>	7 506	16	44	8,0	3,57	9
Rautatiekuljetus <i>Rail transportation</i>	7 856	17	239	2,2	5,17	8 291
<b>Vesitiekuljetusketju</b> <i>Water transportation sequence</i>	<b>1 476</b>	<b>3</b>	<b>317</b>	<b>2,6</b>	<b>8,34</b>	<b>3 502</b>
Uittokuljetusketju <i>Floating sequence</i>	870	2	351	2,3	7,93	21
Autokuljetus uittoon <i>By road to floating point</i>	870	2	47	6,5	3,06	8
Uitto <i>Floating</i>	870	2	304	1,6	4,76	21
Aluskuljetusketju <i>Barge transportation</i>	606	1	266	3,4	8,92	3 481
Autokuljetus alukseen <i>By road to barge</i>	528	1	43	7,2	3,11	0
Aluskuljetus <i>Barge transportation</i>	606	1	223	2,8	6,21	3 481

Sisältää Metsäteho Oy:n tilastoiman metsäteollisuuden ja Metsähallituksen kuljettaman puun, mikä kattaa noin 81 % metsäteollisuuden vuonna 2004 käyttämästä kotimaisesta puusta (luku 8) ja Suomeen tuodusta (luku 10) puusta.  
*These figures include about 81% of domestic roundwood consumed (Chapter 8) and roundwood imported (Chapter 10) by the forest industries.*

Eri kuljetustapojen kustannustehokkuutta pystytään vertailemaan laskennallisesti kuljetussuoritteiden yksikkökustannuksen avulla. Kuljetussuoritteen yksikkökustannus saadaan kun, kokonaiskustannukset jaetaan kuljetussuoritteella (kuljetettu määrä \* keskikuljetusmatka). Kuljetussuoritteen yksikkökustannus on pienin uittolla, sillä kerralla kuljetettavat määrät ovat suuria ja keskikuljetusmatkat pitkiä suhteessa kokonaiskustannuksiin. (kuva 3)



Kuva 3. Eri kaukokuljetusketjujen kuljetussuoritteiden yksikkökustannukset senttiä/m<sup>3</sup>km vuosina 2004 ja 2005 /7,9/.

### 2.1.2 Metsäpolttoaineiden kuljetus

Metsäpolttoaineen käytännössä ainut kaukokuljetustapa Suomessa tällä hetkellä on maantiekuljetus. Metsähakkeen tuotantoprosessin kustannukset muodostuvat pääosin kolmesta tuotantotekijästä: irtotavaran lähi- ja alkukuljetuksesta, hakkeen valmistuksesta ja kaukokuljetuksesta. Maantiekuljetuksen kustannukset kasvavat polttoaineen hinnan nousun, kuljetuskysynnän kasvun sekä kuljetusmatkojen pidentymisen seurauksena. Metsähaketta käytetään yhä enemmän suurissa polttolaitoksissa korvaamaan turpeen ja kivihiilen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä, jotka lisäävät päästökaupan myötä kustannuksia. Metsähakkeesta on tullut kilpailukykyinen verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, sillä metsäpolttoaine luokitellaan päästökaupassa uusiutuvaksi kasvihuoneutraaliksi polttoaineeksi.

Merkittävä hankintalogistiikkaan liittyvä ongelma ovat metsähakkeen korkeat kaukokuljetuskustannukset sekä hakkeen potentiaalisten käyttäjien ja hakevarojen sijainti kaukana toisistaan. Merkittäviä metsäpolttoaineen käyttökeskittymiä löytyy Keski- ja Kaakkois-Suomesta, kun taas Itä-Suomessa metsäpolttoainevarat ovat suuremmat kuin käyttöpotentiaali /11/. Tästä johtuen on tärkeää kehittää pitkien kuljetusmatkojen kaukokuljetusketjuja, mikäli metsähakkeen käyttömääriä aiotaan lisätä suunnitellusti /12/. Toisen sukupolven liikennepolttoaineiden biojalostamot lisäävät metsähakkeen käyttömääriä, mutta perinteiset käyttömuodot määräävät kysynnän tason vielä tällä vuosikymmenellä. Toisaalta perinteisten lämpö- ja voimalaitosten metsähakkeen käyttömäärät tulevat kasvamaan roimasti myös Itä-Suomen kaupungeissa.

### 2.1.3 Metsäpolttoaineen maantiekuljetus irtotavarana

Metsäpolttoaineiden maantiekuljetusta irtotavarana käytetään terminaali- ja käyttöpaikkahaketeeseen perustuvissa hankintaketjuissa. Irtotavarana kuljetettavien risuautojen hyötytilavuudet ovat perinteisesti vaihdelleet välillä 100-145 kehys-m<sup>3</sup> riippuen käytettävästä kalustosta, keski-koon ollessa noin 120 kehys-m<sup>3</sup>. Kärkyissä voi olla liukuva sisälava, jolloin kuljetuskapasiteettia saadaan lisättyä maksimissaan jopa 155 kehys-m<sup>3</sup>. Aikaisempien selvitysten perusteella tällai-seen täysperävaunuyhdistelmään mahtuu irtotavaraa n. 140 i-m<sup>3</sup> (64 MWh) /13,14/ (kuva 4). Kuormanteko-aika metsässä on ollut keskimäärin 66 min ja purkuaika terminaalissa 58 min /14/.



*Kuva 4. Perävaunun liukuva sisälava mahdollistaa suuremman kuljetuskertymän ja helpottaa lastausta ja purkua /15/.*

Metsäpolttoaineen kuljettaminen hakettamattomana irtotähteenä vaatii vahvistetut pohja- ja laitarakenteet. Irtotähte pyritään tiivistämään kuormausvaiheessa kuormaimella laitoja ja pohjaa vasten. Irtotähteen kuljettamisessa saadaan parhaimmillaan noin 25 % pienempi kuorma kuin kuljettaessa haketta.

Risutukkeja mahtuu normaaliin puutavara-autoon n. 65-70 kpl, jolloin kuorma on n. 35-38 tonnia. Risutukeilla saavutetaan sama kuormapaino kuin hakkeella. Risutukit voidaan kuljettaa pohja- ja laitarakenteisilla täysperävaunuyhdistelmillä. Risutukkien kuljettaminen tavallisilla puutavara-autoilla ei ole sallittua.

#### 2.1.4 Metsähakkeen maantiekuljetus

Metsähakkeen maantiekuljetusta hakerekoilla käytetään välivarastohaketukseen tai terminaalihaketukseen perustuvien hankintaketjujen kaukokuljetusmuotona. Metsähakkeen maantiekuljetuksen taloudellisuuteen vaikuttavat kuljetettavan raaka-aineen muoto, tilavuuspaino (tiheys), energiatiheys, kuljetusmatka ja kuljetuskaluston ominaisuudet.

Kuivan metsähakkeen, kuten myös irtotähteen autokuljetuksessa, on rajoittavana tekijänä tilavuus. Tuoreen metsähakkeen kohdalla rajoittaa kuorman kokoa yleensä käytetyn autoyhdistelmän suurin sallittu kokonaispaino. Myös hakkeen palakoko ja lastausmenetelmät vaikuttavat jonkin verran kuormatilan hyödyntämiseen.

Yleisin käytetty kuljetuskalusto (n. 50 % kalustosta) on kiinteällä kuormatilalla varustettu täysperävaunuyhdistelmä, jota käytetään erityisesti tienvarsihaketusten menetelmää käytettäessä. Toiseksi yleisin (40 %) ajoneuvoyhdistelmä on vaihtokontilla varustettu täysperävaunuyhdistelmä. Lisäksi käytetään jonkin verran (n. 10 %) puoliperävaunuyhdistelmiä ja kuorma-autoja.

Ajoneuvon suurin sallittu korkeus on 4,2 m ja leveys 2,6 m. 7-akselisen perinteisen perävaunuyhdistelmän maksimipituus on 22 m ja ns. moduuliyhdistelmän 25,25 m. Moduulirekoilla maksimileveys on 2,55 m vuodesta 2007 alkaen. Suurin sallittu yhdistelmän kokonaispaino on molemmissa tapauksissa 60 tonnia. Tyypillisesti kiinteillä kuormatiloilla varustetun täysperävaunuyhdistelmän kuormatilavuus on n. 110-120 m<sup>3</sup> ja kantavuus 34-37 tonnia. Kostealla hakkeella saavutetaan maksimi kuormapaino jo n. 100 m<sup>3</sup> kuormalla, joten tilavampien moduulirekkojen käyttöön ei useimmiten ole tarvetta./16/

Käytettäessä vaihtokonttijärjestelmää, voidaan hakkuria käyttää jatkuvasti ja pitää kuljetuskalusto jatkuvasti liikkeessä. Tällöin käytetään kahta konttisarjaa, eli 2-3 kpl 35-45 m<sup>3</sup> kontteja on kerrallaan täytettävänä ja toiset 2-3 kpl tyhjennettävänä.

Puoliperävaunuyhdistelmien käyttöä metsähakkeen ajossa rajoittaa niiden kantavuuden lisäksi jonkin verran myös ajettavuus mäkisessä maastossa. Yhdistelmän kokonaispaino saa olla korkeintaan 48 tonnia ja pituus 16,5 m. Kuormatilan koko on tyypillisesti 75-95 m<sup>3</sup>. Puoliperävaunulla voidaan kuitenkin toimia logistisesti tehokkaasti kahden perävaunun ja yhden vetoauton järjestelmällä.

Hakerekkakuljetuskustannuksiin vaikuttaa merkittävästi hakkurin ja kuljetuskaluston yhteistointa. Hakkurin ja auton käyttöaste tulisikin pyrkiä pitämään korkealla ja ottaa huomioon eri työvaiheissa tapahtuvien viivästysten vaikutus muihin työvaiheisiin. Logistiikan tehokkuuteen vaikuttavat myös ajojärjestelyt haketuspaikalla ja lastin purkupaikalla.

## 2.2 Raakapuun vesitiekuljetus

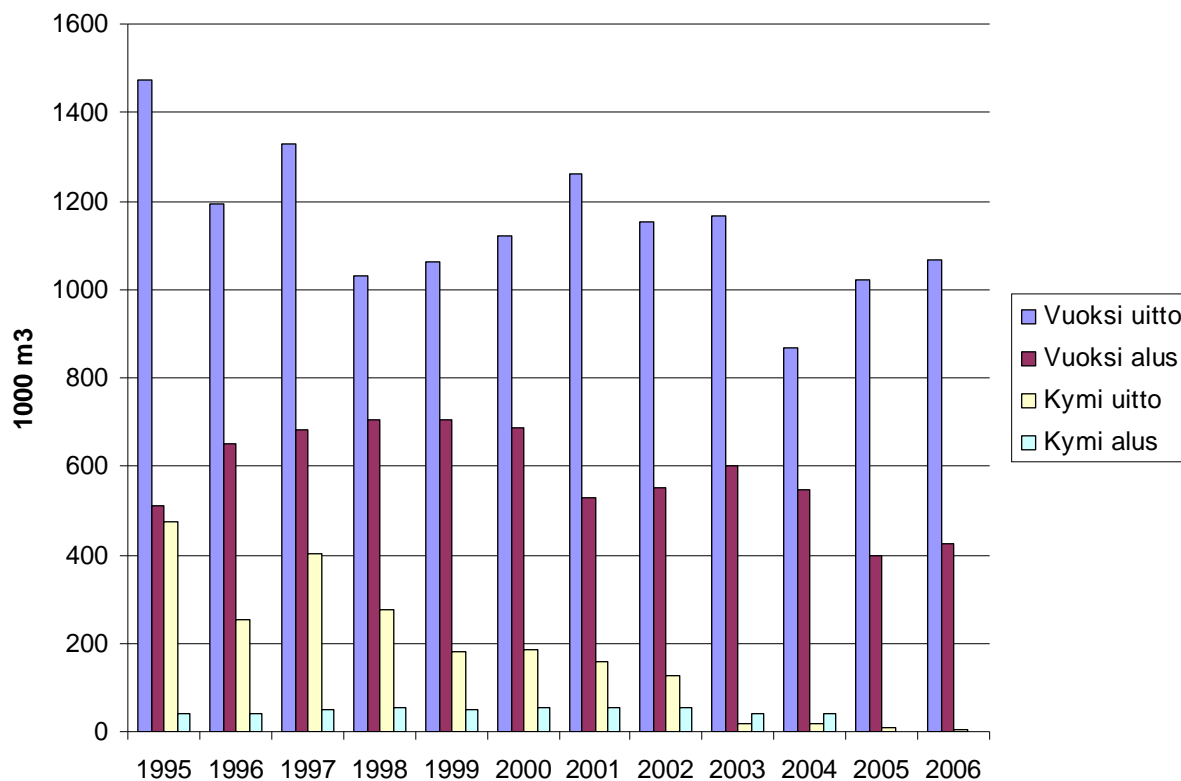
Kotimaassa puuta kuljetetaan pääasiassa Vuoksen ja Kymijoen vesistöreittejä pitkin. Vuoksen vesistö on Suomen suurin vesistöalue ja se sisältää, Saimaan, Pielisen, Kallaveden ja lukuisan joukon pienempiä vesistöalueita, joita on osin yhdistetty kanavaratkaisuin laivaliikenteelle sopiviksi. Vesistö kattaakin lähes koko Itä-Suomen ja Saimaan kanavaa pitkin vesistöstä on pääsy Venäjän kautta Suomenlahteen Itämerelle (kuva 5). Kymijoki puolestaan laskee Päijänteestä Kymenlaakson läpi Suomenlahteen, mutta merelle pääsy vesiteitse vaatisi kanavaratkaisuja.



Kuva 5. Vuoksen vesistöalue kattaa lähes koko Itä-Suomen. /17/

Autokuljetus liittyy kiinteästi myös vesitiekuljetusketjuihin. Kuljetusmuodosta riippumatta puuta kuljetetaan autolla lähes aina jossakin kuljetusketjun osavaiheessa. Poikkeuksen autokuljetusketjun puuttumiseen ovat suoraan saarista ja rannoilta uitto- tai proomukuljetukseen korjattava puutavara.

Vesitiekuljetusmäärät ovat olleet pienoisessa laskussa 90-luvun puolivälin jälkeen (kuva 6). Vesitiekuljetukset ovat kuljetusmäärällisesti vähentyneet samalla, kun raakapuun käyttömäärät ovat muuten lisääntyneet. Vesitiekuljetukset eivät ole saaneet osaansa kuljetusmäärien kasvusta huolimatta.

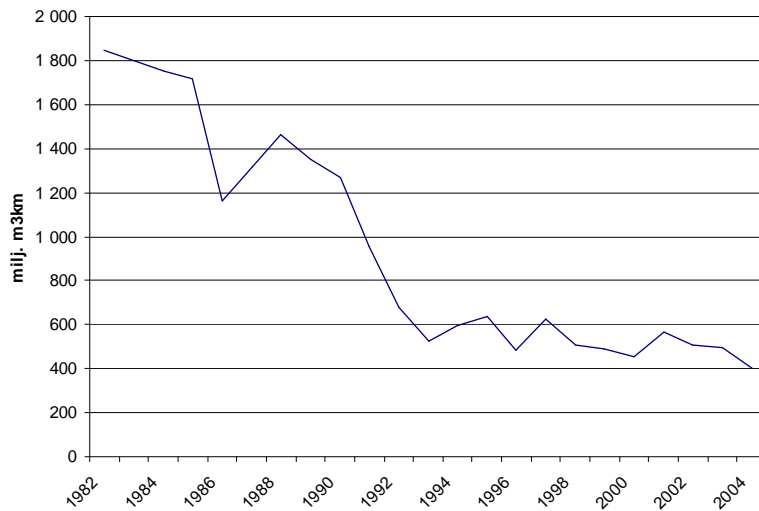


Kuva 6. Vuoksen ja Kymijoen vesistöalueen vesitiekuljetukset 1995-2006. /18/

Viime vuosina vesitse kuljetetusta puusta keskimäärin kolmasosa (35 %) on kulkenut aluskuljetuksina. Vuosi 2005 oli vesikuljetustenkin osalta poikkeuksellinen metsäteollisuuden lakon ja työsulun vuoksi. Kuljetetun raakapuun määrät jäivät n.25 % edellisvuodesta /7/. Koko alkukesän 2005 kestäneiden lakkojen takia Kymijoen puutavaran aluskuljetukset ja uitto tyrehtyivät käytännössä kokonaan ja Vuoksenkin kuljetusmäärät laskivat. Vuoden 2005 vaikutukset näkyvät myös vuonna 2006 ja vesitiekuljetusmäärät jäävätkin normaalitason alapuolelle /10/.

Raakapuun vesitiekuljetusten romahtamiseen on useita eri syitä. Paperin ja sellunvalmistuksen tutkimukset osoittivat vesisäilytyksen haittaavan erityisesti hiokepaperin valmistuksessa. Havaittiin myös sahatukkien kärsivän pitkästä säilytyksestä. Metsäteollisuudessa tehtiin kuljetusten prosessimuutoksia ja ensimmäisenä aloitettiin uitosta. Samoihin aikoihin oli käynnissä myös metsäteollisuuden uudelleen organisointi yhtiöiden yhdistyessä ja muodostaessa suurempia yksiköitä, jolloin puunkuljetukset ja reitit suunniteltiin uudestaan. /10/

Vesitiekuljetuksia olisi mahdollista lisätä huomattavasti. Erityisesti sisävesiväylät Itä- ja Keski-Suomen alueella (Vuoksen ja Kymijoen vesistöt) tarjoavat runsaasti mahdollisuuksia vesitiekuljetusten hyödyntämiseen. Hyvistä vesistöistä huolimatta raakapuun yksikkökuljetussuoritteet ovat pudonneet merkittävästi, johtuen kuljetusmäärien vähentymisestä ja kuljetusetäisyyksien lyhentymisestä (kuva 7).



Kuva 7. Puun vesitiekuljetussuoritteet 1982-2004. /5/

### 2.2.1 Uitto

Uittoa käytetään eniten mänty- ja kuusikuitupuun kuljetuksessa /19/. Uiton kustannusrakenne puoltaa sen käyttöä jatkossakin. Uitto on muita kuljetusmuotoja kustannustehokkaampi pitkillä kuljetusetäisyyksillä.

Uitto on kustannusrakenteensa vuoksi edullinen kuljetusmuoto. Uitossa saadaan kuljetettua paljon puuta kerrallaan, sillä kuljetettava raakapuu ei tarvitse erillistä kuljetuskalustoa, vaan uittoniput ja -lautat kelluvat vedessä ja niitä hinataan aluksilla (kuva 8). Uiton etuna on myös vesivarastointimahdollisuus. Uittokausi alkaa tavallisesti huhtikuun alkupuolella ja se kestää jäiden tuloon saakka.

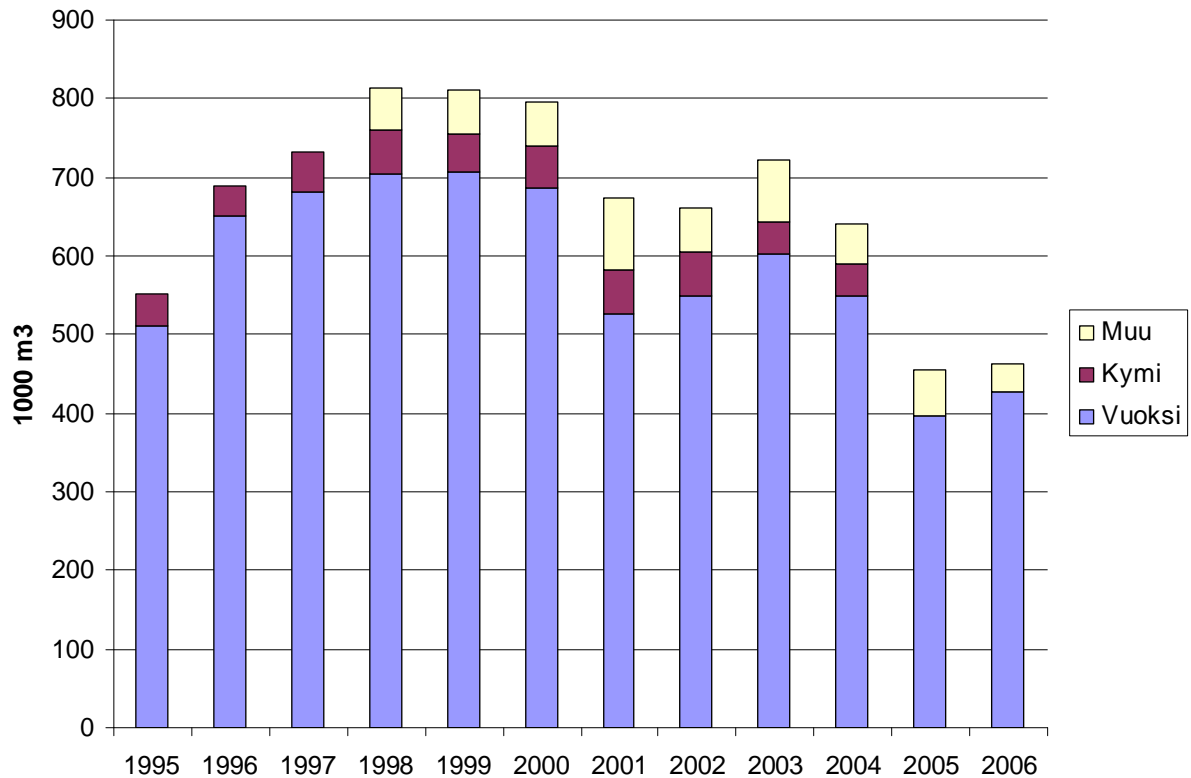




*Kuva 8. Uitossa saadaan kuljetettu kerralla suuret määrät raakapuuta, eikä erillistä kuljetuskalustoa tarvita. /18/*

### **2.2.2 Alus**

Kaikkia puulajeja ei voida uittaa. Esimerkiksi koivu uppoaa tiheän rakenteensa vuoksi helposti ja eräät tukkilajit kärsivät pitkästä vesisäilytyksestä /19/. Proomukuljetus puoltaa edelleen paikkaansa raakapuun vesitiekuljetuksissa. Aluskuljetuksia rajoittaa proomujen kuljetuskapasiteetin lisäksi väyläsyvyydet ja vesistöjen sulkurakenteet. Aluskuljetuksen yksikkökustannus oli vuonna 2005 keskimäärin 6,03 €/m<sup>3</sup> (2004: 6,21€/m<sup>3</sup>) keskilähtömatkan ollessa 212 km (2004: 223 km) /6/. Raakapuun aluskuljetuksista kotimaassa suurin osa kuljetetaan Vuoksen vesistöalueella (kuva 9).



Kuva 9. Raakapuun kotimaan aluskuljetukset 1995-2006. /18/

Toisin kuin uittokuljetuksilla, proomukaluston käytöllä ei ole välttämättä talven hiljaista kautta. Sopivalla hinauskalustolla voidaan jää särkeä ja hinata proomuja kohteeseen. Samalla alus aukaisee jäähän väylän, jota pitkin huonommallakin jääluokituksella varustetut alukset voivat kulkea. Ainoa jäätä särkevä monitoimialus Saimaalla on Mopro Oy:n Arppe (kuva 10). Vesitse tuotava tuontipuu kuljetetaan yksinomaan kuivarahtialuksilla. Proomut ovat harvoin merikelpoisia ja siksi lähinnä vain sisävesi- tai rannikkokäytössä.



Kuva 10. Mopro Oy:n työntäjä Arppe ja Eurooppa II a-mallin proomu Rissanen. /20/

## 2.3 Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus

Metsähaketta ei ole kuljetettu aikaisemmin vesiteitse Suomessa. Mopro Oy on kuljettanut 80- ja 90-luvulla haketta ja sahanpurua metsäteollisuuden sellutehtaiden raaka-aineeksi pohjaproomuilla. Lastauksen jälkeen hake tampattiin tiukaksi ajamalla pienehköllä traktorilla kasan päällä ja tiivistämällä lasti. Proomuja ei varustettu erillisillä laidoilla, vaan niihin otettiin materiaalia niin paljon kuin kyytiin saatiin. Kyseisistä kuljetuksista ei ole säilynyt dokumentteja. /21/

Enso-Gutzeit (nyk. Stora Enso Oyj) on myös kuljettanut proomuilla haketta sellutehtailleen. Kuljetukset tapahtuivat suuremmissa määrin lähinnä 70- ja 80-luvulla. Haketta on kuljetettu ainakin Uimaharjasta Sunilaan Kotkaan. Hakkeen kuljetukseen käytettiin tavallisia ponttoni- ja pohjaproomuja. Proomuihin on kokeiltu myös pieniä verkkolaitoja, joita voitiin käyttää karkeamman hakkeen kuljetuksessa. Enso-Gutzeit kokeilutti myös useamman proomun kuljetusjärjestelmää, jossa oli yhteen liitettynä jopa neljä proomua. Tämä jäi kuitenkin kokeiluasteelle. /10/

Kokemukset hakkeen kuljettamisesta ovat osoittaneet, että proomukalustojen tulisi olla suuria – mikäli mahdollista vielä suurempia kuin nykyiset Eurooppa II a-tyyppiset proomut. Eurooppa II a-proomun standardimitat ovat; pituus (76,5 m), leveys (11,4 m), maksimisyväys (4 m) ja kantavuus (2 540 t) /1/. Nykyisen kaltaiseen Eurooppa II a-proomuun mahtuu yli 2 500 i-m<sup>3</sup> metsähaketta (pohjatilavuus 2650 kehys-m<sup>3</sup>). Proomuja voitaisiin mahdollisesti modifioida lisäämällä laitoja, jolloin pystyttäisiin hyödyntämään ainakin raakapuun kuljetuksessa käytetty tila kokonaisuudessaan. Metsähakkeen kustannustehokkaaseen kuljetukseen soveltuvan proomukaluston veitoisuuden tulisi olla aikaisempien selvitysten mukaan yli 5000 i-m<sup>3</sup> ja kuljetusten pitäisi olla ympärivuotisia /22/. Poltettava hake vie keskimäärin puolet suuremman tilan kiintokuutiometriä kohden kuin raakapuu. Kuljetuskustannukset eivät kuitenkaan merkittävästi muutu. Olisi yhtä kallista kuljettaa lasti raakapuuta kuin esimerkiksi metsähaketta, mutta yksikkökustannukset metsähakkeen kuljetuksen osalta olisivat suuremmat.

### 2.3.1 Proomukuljetuspotentiaali

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, ilman, että varsinainen kuljetuskalusto seisoo. /1/

Useimmiten jatkuvaluontoisissa proomukuljetuksissa toimitaankin siten, että yhdellä hinaajalla/puskijalla hoidetaan kolmea proomua/proomuryhmää, joista yksi on lastattavana, yksi liikkeessä ja yksi purettavana. Väylistä ja tuulen voimakkuudesta riippuen voidaan useita, jopa kymmeniä, proomuja liittää yhteen ja käyttää vain yhtä hinaajaa/puskijaa. Proomukalustotoimikunnan mukaan Saimaan vesistöalueella voisi proomuryhmän muodostaa maksimissaan neljä proomua ja Suomen rannikko-olosuhteissa voisi proomuryhmän muodostaa kaksi proomua. /23/

### **Proomutyypeistä**

Yleisin proomu, ja metsäpolttoaineelle parhaiten soveltuva proomutyyppi, on avoin ruuma- eli pohjaproomu. Muita proomutyyppejä ovat kansi- ja säiliöproomu. Ruumaproomuissa voi myös olla lastin suojaamiseksi kansirakenteita, jotka useimmiten ovat kevyitä lasikuitu- tai alumiini-luokkua.

Kansiproomun muodostaa rakenteeltaan suljettu ponttoni, jonka kansi on tuettu raskaita lasteja kestäväksi. Kansiproomuissa voi olla myös kate kansilastin suojaamiseksi. Rakenteestaan johtuen ovat kansilastiproomut usein ruumaproomuja leveämpiä ja syväykseltään matalampia ja ne sopivat parhaiten erikoislastien, suurten kappaleiden ja pyörillä liikkuvan lastin kuljettamiseen. Säiliöproomuja käytetään nestemäisten tuotteiden kuljetuksessa. /1/

Vuoksen alueella toimii kolme yritystä, jotka kuljettavat aluksilla suurimman osan vesistön alueella kulkevasta puusta. Yrityksiä ovat Mopro Oy, Pielisen Laivat Oy sekä UPM-Kymmene Oyj, joka käyttää oman kalustonsa lisäksi alihankkijoita. Taulukoissa (2 ja 3) on katsaus Vuoksen alueen alus- ja proomukalustosta.

Taulukko 2. Katsaus Vuoksen vesistöalueella kulkevista aktiivisesti proomuja kuljettavista aluksista.

Nimi	Omistaja	Pituus [m]	Leveys [m]	Syväys max. [m]	Jääluokka
Juha	BR-Juha Oy, Joroinen	24,70	6,45	2,20	ei ole
Hanhi	Järvikuljetus M Papunen	18,00	5,00	2,20	ei ole
Helmi	Järvikuljetus M Papunen	15,50	4,00	1,80	ei ole
Halli	Lempiäinen V&J Metsäurakointi	14,00	4,80	2,00	ei ole
T11	Lempiäinen V&J Metsäurakointi	10,00	3,00	1,60	ei ole
T3	Lempiäinen V&J Metsäurakointi	12,00	3,00	1,50	ei ole
Arppe	Mopro Oy	29,40	12,50	2,80	1 A super
Murillo	Navitie Oy	15,00	4,00	1,70	ei ole
Haapaniemi	Navitie Oy	27,00	7,00	1,50	ei ole
Jermac	Pielis-Laivat Oy	25,70	7,50	2,80	1 c tai 1 b
Teppo	Purhonen Oiva, Varkaus	20,00	6,00	1,80	ei ole
Tapio	Saarisavotta Oy	19,80	4,84	2,40	ei ole
Pusku	Tapani Kankkunen	12,00	4,50	1,85	ei ole
Arvo	Uittoyhdistys	17,60	4,36	1,80	ei ole
Parkko	UPM-Kymmene Oyj, Metsä	22,40	6,58	2,80	ei ole
Säynävä	Vesistöurakointi Säynävä Ay	10,40	3,20	1,80	ei ole

Taulukko 3. Katsaus Vuoksen vesistöalueella raakapuuta kuljettavista proomuista.

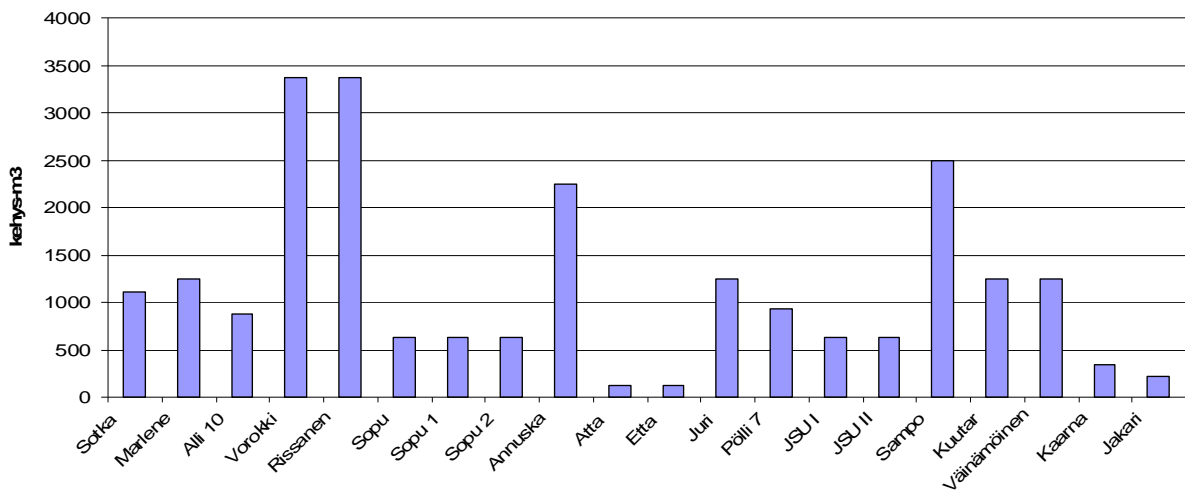
Nimi	Omistaja	Pituus [m]	Leveys [m]	Syväys max. [m]	Vetoisuus max. k-m <sup>3</sup>
Sotka	Järvikuljetus M Papunen	67,00	12,00	1,90	885
Marlene	Järvikuljetus M Papunen	53,00	12,00	1,70	1000
Alli 10	Lempiäinen V&J Metsäurakointi	49,60	12,20	1,70	700
Vorokki	Mopro Oy	76,50	11,30	3,95	2700
Rissanen	Mopro Oy	73,49	11,33	3,95	2700
Sopu	Navitie Oy	35,00	9,00	1,60	500
Sopu 1	Navitie Oy	35,00	9,00	1,60	500
Sopu 2	Navitie Oy	35,00	9,00	1,60	500
Annuska	Pielis-Laivat Oy	59,00	12,20	3,40	1800
Atta	Purhonen Oiva	20,00	6,00	1,80	100
Etta	Purhonen Oiva	20,00	6,00	1,80	100
Juri	Saarisavotta Oy	60,00	12,00	1,70	1000
Pölli 7	Tapani Kankkunen	49,00	12,00	1,70	750
JSU I	Uittoyhdistys	35,00	7,50	1,80	500
JSU II	Uittoyhdistys	35,00	7,50	1,80	500
Sampo	UPM-Kymmene Oyj, Metsä	77,00	10,96	2,40	2000
Kuutar	UPM-Kymmene Oyj, Metsä	61,00	9,20	2,40	1000
Väinämöinen	UPM-Kymmene Oyj, Metsä	61,00	9,20	2,40	1000
Kaarna	Vesistöurakointi Säynävä Ay	32,00	6,50	1,80	270
Jakari	Vesistöurakointi Säynävä Ay	20,00	8,00	1,40	180

Useat käytössä olevat proomut ovat ruuma- eli pohjaproomuja eli niiden rakenne on kaukalo-  
mainen. Proomun sivuilla on usein kansilastia varten tolpat, joihin lasti voidaan sitoa kiinni ja  
jotka tukevat sitä sivuilta. Tällöin kaikki tila aluksessa on hyödynnettävissä. Näihin proomuihin  
on mahdollista rakentaa melko pienellä vaivalla hakkeen kuljetuksen vaatimat laidat. Tämä edel-

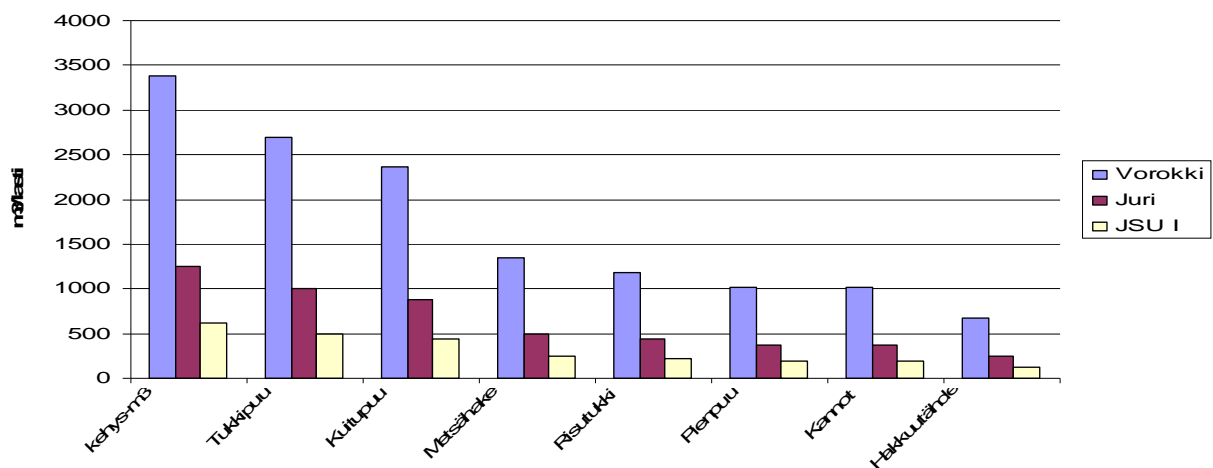
lyttää kuitenkin laskelmia, joilla selvitetään, minkälaisen lastin proomun vakavuus sallii /24/. Kansilastiproomut eivät välttämättä sovellu niin hyvin irtonaisen metsähakkeen kuljetuksiin, mutta esimerkiksi pienpuun ja risutukkien kaukokuljetus olisi mahdollista.

### 2.3.2 Proomukuljetuskapasiteetti

Metsäpolttoaineiden aluskuljetuksessa proomujen kantavuus ei ole ongelma, mutta tilavuus on. Kevyttä ja kuivaa metsähaketta pystyttäisiin proomujen kantavuuden ja maksimisyvyyksen puolesta ottamaan kyytiin yli kolme kertaa enemmän kuin nykyisen kaltaisiin proomuihin mahtuu. Vaikka saataisiin käytettyä proomujen raakapuun kuljetuksissa käytetty tila hyväksi täysimääräisesti, samaan tilaan saataisiin mahtumaan vain puolet vähemmän metsähaketta kuin raakapuuta tiiviyskertoimien /Liite III/ perusteella (kuva 11 ja kuva 12).



Kuva 11. Saimaan vesistöalueella käytössä olevien proomujen laskennallisia tilavuuksia johdettuna raakapuun kuljetusmääristä.

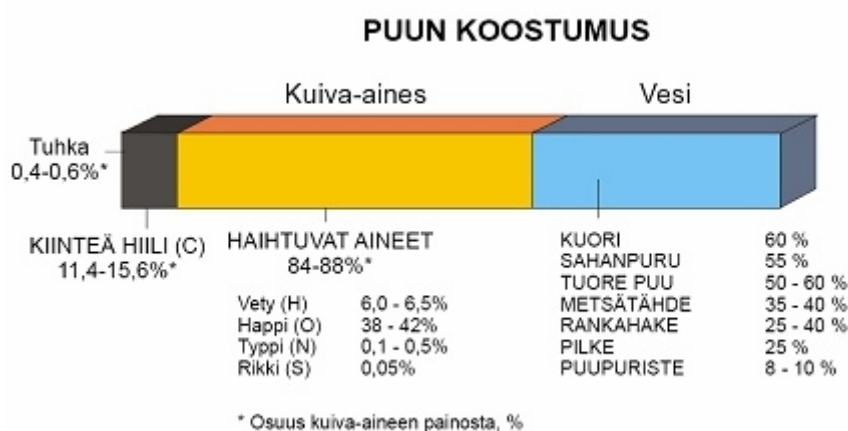


Kuva 12. Laskennallisia vetoisuusmääriä eri polttoaine-erillä irtotavarana kuljetettuna eri kokoluokan proomuilla, mikäli kehystilavuus pystyttäisiin hyödyntämään täysimääräisesti (m<sup>3</sup>/lasti).

### 3 METSÄPOLTTOAINEEN HANKINTAKETJUT

#### 3.1 Metsähakkeen ominaisuudet

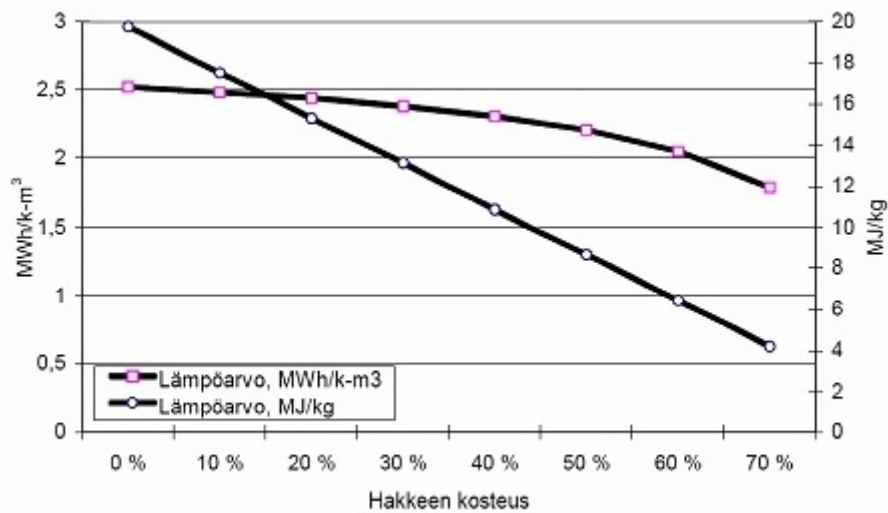
Metsähake tarkoittaa hakkuutähteestä tai pienpuusta hakettua haketta. Kannoista tehdään kantomursketta, joka on palakooltaan suurempaa kuin hake. Hakkeen ja murskeen ominaisuudet vaihtelevat riippuen raaka-aineen ominaisuuksista (kuva 13). Tärkeimpinä ominaisuuksina metsähakkeella on sen kosteus, tiiviys ja palakoko. Tarkastelussa on hyvä huomioida myös tehollinen lämpöarvo [MJ/kg (1 MJ = 0,2778 kWh)], tehollinen lämpöarvo toimituskosteudessa eli saapumistilassa, energiatiheys (MWh/i-m<sup>3</sup>) ja kuiva-tuoretiheys (kg/m<sup>3</sup>).



Kuva 13. Puun koostumus /25/.

Puun kuiva-tuoretiheys tarkoittaa kuivamassaa (kg) jaettuna tilavuudella (m<sup>3</sup>) tuoreena. Kotimaisten polttoaineiden tiheys vaihtelee suuresti. Puun tiheys saattaa vaihdella kasvupaikan, geneettisen perimän ja iän mukaan. Koivun tiheys on yleensä 470-500, männyn 380-420, kuusen 380-400, harmaalepän 360-370 ja haavan 400 kg/m<sup>3</sup>. Ensiharvennusmännyn kuiva-tuoretiheys on n. 379 kg/m<sup>3</sup>. Tiheys vaihtelee myös puun eri osien välillä. /26/

Hakkuutähteiden kosteus- % kaatotuoreena vaihtelee noin 40–60 %:n välillä /26/. Hakkuutähteen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa on 18,3-20 MJ/kg ja saapumistilassa 6-9 MJ/kg. Vastaavasti hakkuutähteen energiatiheys on 0,7-0,9 MWh/i-m<sup>3</sup> eli noin 1,75-2,25 MWh/m<sup>3</sup> (kuva 14). Vaikka hakkuutähteen nettolämpöarvo alenee neulasten varisemisen, lahoamisen ja uuteaineiden vapautumisen kautta, pysyy keskimääräinen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo samana varastoinnin ajan /27/. Näin ollen vain kosteus jää jäljelle merkittävänä tehollista lämpöarvoa säätelevänä tekijänä /26/.



Kuva 14. Hakkuutähdehakkeen tehollisen lämpöarvon riippuvuus kosteudesta (MWh/m<sup>3</sup> tai MJ/kg) /26/.

Tehollinen lämpöarvo osoittaa biomassaa poltettaessa vapautuvan lämpöenergian vähennettynä veden höyrystymiseen kuluvalle energialle. Höyrystävä vesi on lähtöisin osin biomassan sisältämästä vedestä ja osin poltossa syntyvästä vedestä, kun vety yhtyy happeen. Kysymys on huomattavista vesimääristä, sillä tuoreessa hakkuutähteessä vettä on jopa 500 kg/m<sup>3</sup>, ja poltossa syntyy vettä lisää yli 150 kg/m<sup>3</sup>. Hakkuutähdehakkeen irtokuutiometrin tehollinen lämpöarvo vaihtelee välillä 0,7-0,9 MWh/i-m<sup>3</sup>, kun jyrshinturpeen lämpöarvo on vastaavasti 0,9 MWh/i-m<sup>3</sup>. Männyn tehollinen lämpöarvo on 30 % kosteudessa 0,87 ja kuusen 0,84 MWh/i-m<sup>3</sup>. Vastaava lämpöarvo 50 %:n kosteudessa männyllä on 0,81 ja kuusella 0,78 MWh/i-m<sup>3</sup>. /28/ Nurmen /27/ selvityksen mukaan hakkuutähteiden annettaessa kuivua palstalla, paranee tähteestä saatavan polttohakkeen tehollinen lämpöarvo siinä määrin, että neulasten varisemisen johdosta tapahtuva massan menetys korvautuu täysimääräisesti kosteuden alenemisella. Yksi kiintokuutiometri vastaa noin 2,5 irtokuutiometriä (vaihteluväli 2,2-2,6). Yksi irtokuutiometri on noin 0,40 kiintokuutiometriä eli 400 litraa (vaihteluväli 0,38-0,46). /Liite III/

Kaatotuoreesta havupuusta tehdyn hakkuutähdehakkeen ja kokopuuhakkeen kosteus on suurimman osan vuotta noin 55 %. Jos se saadaan ennen laitoksella toimitusta kuivattua noin 45 %:iin, biomassan tehollinen lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti kasvaa noin 6 %. Kosteuden aletessa 35 %:iin lämpöarvon lisäys on kaikkiaan jo lähes 11 %. Lisäksi ylimääräinen kosteus vaikuttaa kattilassa palamislämpötiloihin sekä hyötysuhteeseen suurten savukaasuhäviöiden takia. Myös polttoaineen käsittelytekniiset ominaisuudet paranevat metsähakkeen kosteuden laskiessa. Myös tulevaisuudessa mahdollisten toisen sukupolven liikennepolttoainesten biojalostamoiden tarvitseman kaasutettavan metsähakkeen optimikosteus on verrattain alhainen, noin 20-25 %, kun tyyppillisesti metsähake toimitetaan lämpölaitoksille noin 40-45 % kosteudessa /12/. Siksi varastoin-



timenetelmät nousevat tärkeään rooliin tulevaisuuden energiapuun hankinnassa. Biopolttoainejalosteet vaativat kuitenkin keinokuivausmenetelmän, jotta kosteus saadaan riittävän alas.

## **3.2 Polttoaineen hankintamenetelmät**

### **3.2.1 Palstahaketusjärjestelmä**

Palstahaketusjärjestelmässä haketus tapahtuu metsässä, eli hakkurin alustakoneen on oltava maastokelpoinen ja hakesäiliöllä varustettu. Haketus tapahtuu ajouran varteen kerätystä pienistä kasoista ja kuorman täytyttyä kuljetetaan hakekuorma palstahakkurilla tien varteen. Tien varressa hakekuorma tyhjenetään yleensä maahan lasketuille vaihtolavoille. Menetelmä sopii päätehakuuleimikoille ja erityisesti pienille työmaille. Järjestelmän etuna on konesiirtojen väheneminen. Menetelmä ei sovellu hyvin pitkille, yli 300-400 m metsäkuljetusmatkoille, tai huonosti kantavalle maalle, eikä talviolosuhteisiin. /29/ Palstahaketusmenetelmä on poistunut lähes kokonaan markkinoilta /12/.

### **3.2.2 Välivarastohaketusjärjestelmä**

Välivarastohaketusjärjestelmä on yleinen perusratkaisu metsähakkeen tuotannossa. Välivarastohaketusjärjestelmässä ("tienvarsihaketusjärjestelmä") kuljetetaan metsäbiomassa metsätraktorilla tien varteen, jossa risut kasataan n. 4-5 m korkeisiin kasoihin. Hakkuri on tien varressa ja haketta suoraan autoon (kuva 15). Auto ja hakkuri ovat siis haketuksen aikana molemmat paikalla. Jos hakkeen kuljetukseen käytettävän kaluston seisontaa halutaan välttää, voidaan käyttää hakkuriautoa, jolla sekä haketetaan että kuljetetaan hake eteenpäin. Hakkuriautojen suhteellisen pieni kuljetuskapasiteetti kuitenkin pienentää kannattavaa toimintasädettä. /29/



*Kuva 15. Kuorma-auton alustalle asennettu Giant -rumpuhakkuri hakettamassa suoraan autoon. /30/*

### **3.2.3 Käyttöpaikkahaketusjärjestelmä**

Käyttöpaikkahaketusjärjestelmässä kuljetetaan biomassa hakettamattomana käyttökohteelle. Hakkuri, tai useissa tapauksissa murskain, sijaitsee käyttöpaikalla ja voi olla kiinteärakenteinen. Kiinteärakenteiseen hakkuriin tai murskaimen perustuva menetelmä soveltuu suuren koon ja korkean hinnan vuoksi lähinnä suuriin laitoksiin. /29/

Kun haketus siirtyy käyttöpaikalle, hakkuri ja kaukokuljetus eivät ole enää toisistaan riippuvaisia. Hakkurin/murskaimen käyttöastetta voidaan kasvattaa. Käyttöpaikkamurskaimella voidaan käsitellä epäpuhtauksia sisältävää biomassaa, kuten kantoja. Käyttöpaikkahaketusjärjestelmän heikko lenkki on se, että kaukokuljetettavana irtotavarana on käsittelemätön biomassa, jonka energiatiheys on heikko. Lisäksi käyttöpaikkahaketusjärjestelmä vaatii suuret varastointialueet irtotavaralle käyttöpaikassa. /29/

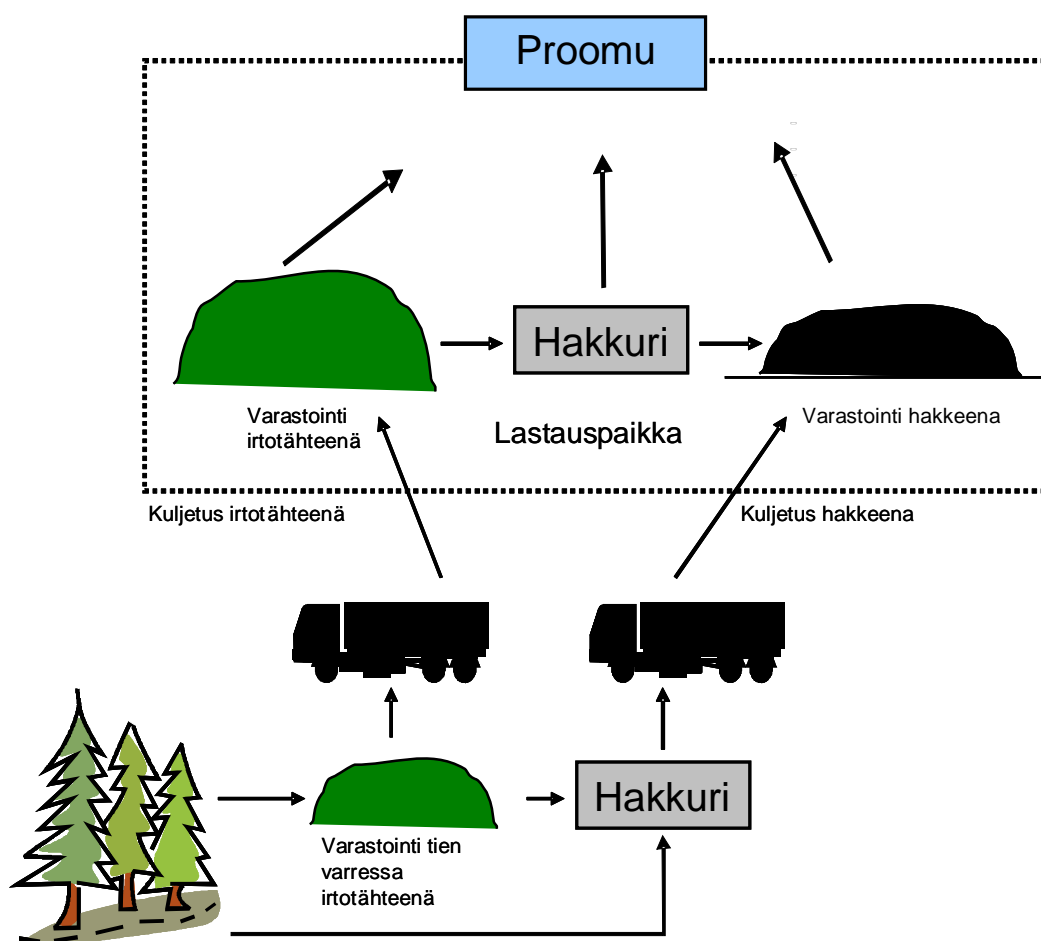
### **3.2.4 Terminaalihaketusjärjestelmä**

Terminaalihaketus on välivarastohaketuksen ja käyttöpaikkahaketuksen välimuoto. Irtotavara kerätään terminaalille usealta hakkuualalta. Alkukuljetus välivarastolta terminaaliin tapahtuu irtotavarana ja kaukokuljetus terminaalista käyttöpaikalle hakkeena. Terminaali saattaa usein merkitä kuitenkin paikkasidonnaisuutta, kuljetusmatkojen pidentymistä ja ylimääräistä kuormauskerää, jotka lisäävät kustannuksia. /29/

Vesitiekuljetukseen voisi soveltua lastauspaikalla välivarastointi ja haketus. Terminaalihaketusjärjestelmä soveltuisi hakkurille saavutettavan korkean käyttöasteen vuoksi hyvin aluskuljetusten kanssa yhdistettäväksi. Metsäbiomassan kuljettaminen irtotähteenä on kuitenkin alhaisen kuljetustiheyden vuoksi erityisesti pidemmillä kuljetusmatkoilla hakkeena kuljettamista kalliimpaa. Terminaalihaketusjärjestelmä on hyvä vaihtoehto, jos metsäpolttoaineiden saatavuus lähialueelta on hyvä, hakettavat määrät ovat suuria, ja tilaa on käytettävissä riittävästi. Terminaalissa voidaan varastoida tarvittaessa suuriakin määriä hakettamatonta biomassaa.

### 3.2.5 Metsähakkeen tuotanto proomukuljetuksiin

Metsäpolttoaineen matka metsästä alukseen ja lopulta voimalaitokselle sisältää seuraavia vaiheita: hakkuutähteen, kantojen tai pienpuun keruu, mahdollinen välivarastointi, autokuljetus, haketus, varastointi lastauspaikalla, lastaus alukseen ja lopulta aluskuljetus käyttöpaikalle. Logistisen ketjun tehokas toiminta siten, että kuljetus- ja haketuskaluston käyttöaste pysyy korkeana ja pitkiä odotusaikoja ei synny on ratkaisevaa aluskuljetusten taloudellisen toiminnan kannalta. Eri-laisia logistisia vaihtoehtoja ja työvaiheita ennen vesitiekuljetusta on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Metsäpolttoaineen kuljetusvaihtoehdot metsästä lastauspaikalle ja proomuun. Irtotähde tarkoittaa pätehakkuun hakkuutähteitä irtotavarana tai tiivistettyinä risutukkeina. /31/

Metsähakkeen tuotantomenetelmät rakentuvat hakkurin ympärille. Haketuksen sijainnin perusteella voidaan erotella neljä eri tuotantojärjestelmää: palstahaketus-, välivarastohaketus-, terminaalihaketus- ja käyttöpaikkahaketusjärjestelmä. Hakkuutähteen ja pienpuun tuotannossa voidaan käyttää kaikkia menetelmiä. Kantojen murskaukseen soveltuu terminaali- tai käyttöpaikkahaketusjärjestelmä.

Metsäpolttoaineiden proomukuljetusta edeltävään hakkeen tuotantoon soveltuu parhaiten välivarastohaketus- tai terminaalihaketusjärjestelmä. Välivarastohaketuksessa haketus tapahtuu tien varressa, josta hake kuljetetaan lastauspaikalla sijaitsevaan suurempaan välivarastoon. Tämän menetelmän etuna on tien varresta lastauspaikalle tapahtuvan kuljetuksen edullisuus hakkeen pienemmän tilantarpeen vuoksi. Terminaalihaketusjärjestelmässä biomassa tuodaan irtotähteenä lastauspaikalle ja haketetaan lastauspaikalla. Etuna on hakkurin vakiosijainti, mutta haittapuolella risujen kuljetuksen kustannukset haketta pienemmän tiheyden vuoksi. Irtotähteen varastoiminen vaatii myös haketta huomattavasti suuremman varastokentän. Lastauspaikalla hakettaessa tulee myös mahdolliset meluhaitat ottaa huomioon.

Haketus on kannattavinta suorittaa lastauspaikalla, mikäli varastokenttä on riittävän suuri ja terminaalikustannukset kohtuulliset. Näin voidaan materiaalia kerätä lastauspaikalle pienemmissä erissä pidemmän ajan kuluessa ja hakettaa suurikin proomulastillinen keskitetysti. Pitkäaikainen varastointi irtotähteenä on parempi vaihtoehto, kuin varastointi hakkeena.

Myös käyttöpaikkahaketusjärjestelmä saattaisi tulla kysymykseen vesitiekuljetuksen sisältämissä hankintaketjussa. Tämä saattaisi tulla kysymykseen etenkin tiivistetyn risutukin pitkän matkan kuljetuksessa tai saarikorjuukohteiden yhteydessä. Ongelmana on irtotavaran suurempi tilantarve sekä kuljetuksissa että varastoinnissa. Käyttöpaikkahaketusjärjestelmä voisi osaltaan lieventää vesitiekuljetuksen riippuvuutta sulanveden kauden kuljetuksista, mikäli irtotavaraa voitaisiin varastoida väliaikaisesti käyttöpaikalla.

### **3.3 Metsäpolttoaine-erät**

#### **3.3.1 Hakkuutähde**

Hakkuualalle jäävän hakkuutähteen määrään vaikuttavat puulaji, puuston koko, metsikön tiheys ja kehityshistoria, maantieteellinen sijainti sekä puuston terveyden tilanne /32/. Kuusikoilla hakkuutähteen määrä on yli kaksinkertainen männiköihin ja koivikoihin verrattuna. Kuusella syntyy keskimäärin 54 %, männyllä 21 % ja koivulla 18 % latvusmassaa suhteessa runkomassoihin.

Tyypilliselle kuusikon uudistushakkuualalle jää hakkuutähdettä Etelä-Suomessa noin 100 m<sup>3</sup>/ha, kun ainespuuta on korjattu 200-250 m<sup>3</sup>/ha. Hakkuutähteen korjuukertymä on tyypillisesti n. 60-70 % kokonaiskertymästä.

Metsäntutkimuslaitoksessa tehdyn selvityksen mukaan hukkarunkopuuta jäi Etelä-Suomen kuusikoiden uudistusaloille 12 m<sup>3</sup>/ha ja männiköiden 7 m<sup>3</sup>/ha /28/. Yli puolet oli peräisin latvoista ja muu osa lähinnä alamittaisista rungoista ja viallisista rungon osista, joiden kummankin määrä vaihteli leimikoittain suuresti. Kuusikoissa latvapuun osuus on noin 5,9 m<sup>3</sup>/ha ja männiköissä noin 3,6 m<sup>3</sup>/ha. Alakankaan ym. /32/ selvitysten mukaan tuoreessa hakkuutähdehakkeessa puuainetta on keskimäärin 40 %, kuorta 23 % ja neulasia 37 %. Kuivahtaneesta hakkuutähteestä tehdyn hakkeen vastaavat luvut ovat: puuainetta yli 60 %, kuorta alle 30 % ja neulasia alle 10 %.

Nurmen /27/ tutkimuksen mukaan neulasmassan osuus hakkuutähteestä on hyvin merkittävä. Uudistuskypsen kuusikon latvuksen kuivamassasta neulasten osuus on noin 35 % ja hakkuutähteen kuivamassasta 30 %. Männyllä vastaavat luvut ovat 23 % ja 20 %. Jos hakkuutähteen annetaan kuivahtaa palstalla pari kesäkuukautta, kosteus laskee 50-60 %:sta jopa 20-30 %:iin /25/. Kuivumisen myötä hakkuutähteen kuiva-ainepitoisuus nousee ja kosteus vähenee, mutta toisaalta korjattavissa olevan hakkuutähteen määrä pienenee jopa 20-30 % pääasiassa neulasten karisemisen takia ja talteensaanto on näin pienempi kuin tuoreella hakkuutähteellä /25,27/.

Alakankaan /25/ mukaan kuivahtaneen hakkuutähteen talteensaanto on 45 % hakkuutähteen kokonaismäärästä. Talteen saatavan hakkuutähteen määrät vastaavat kuusikoissa yleensä 25-30 % hakkuualalta korjattavan runkopuun määrästä. Nurmen /27/ tutkimuksen mukaan kaatotuoreen hakkuutähteen neulasosuus kuivamassasta oli 27,7 %, kosteuden ollessa 56 %. Vuoden kestäneessä palstavarastoinnissa hakkuutähteen neulasosuus oli laskenut 6,9 %:iin ja kosteus 28,5 %:iin. Mikäli hakkuut tehdään syksyllä tai talvella, tähteet eivät kuivu palstalla ennen seuraavaa kesää. Pikemminkin talviaikainen varastointi lisää niiden kosteutta pintajään ja lumen muodossa. Mikäli hakkuu on tehty keväällä tai kesällä, kuivuvat tähteet palstalla hakkuukoneen tekemissä kasoissa usein erittäin hyvin.

### **Risutukit**

Risutukkijärjestelmä sopii osaksi käyttöpaikkahaketukseen perustuvaan logistiikkaan. Risutukkijärjestelmässä paalitetaan jo hakkuualalla n. 60-70 cm paksu ja n. 3 m pitkä nippu, eli risutukki (kuva 17). Risutukki kuljetetaan kuormatraktorilla tien varteen ja siitä edelleen rekalla käyttö-

paikalle. Risutukkijärjestelmän etuina on varastoinnin helppous ja tilantarpeen supistuminen kuljetuksessa ja varastoinnissa sekä se, ettei kuljetus- ja tuotantoketjun eri koneet ole ajallisesti niin riippuvaisia toisistaan. Lisäksi risutukkien valmistus aiheuttaa haketukseen verrattuna vähän melua. Risutukkijärjestelmä sopii parhaiten suurimittakaavaiseen metsätähteen hankintaan. /29/



*Kuva 17. Risutukkeja tien varressa.*

### **3.3.2 Pienpuu**

Nuorten metsien pienpuun hakkuu voidaan tehdä joko koneellisesti tai manuaalisesti. Koneellisessa hakkuussa käytetään kaato-kasaus- ja joukkokäsittelylaitteita parantamaan hakkuun tuottavuutta. Manuaalisessa hakkuussa hakkuu tapahtuu siirtelykaatona kaatokahvoilla varustetulla moottorisahalla. Pienpuu voidaan hakata kokopuuna tai rankana. Rankana hakattaessa suurin osa lehti- ja neulasmassasta jää metsään, mikä vähentää korjuusta aiheutuvaa ravinnehävikkiä. Metsäenergiapotentiaali lisääntyy, jos energiapuuta voidaan korjata rankana alueilta, joilla korjuu kokopuuna ei ole mm. ravinnehävikistä aiheutuvan puuston kasvutappioriskin vuoksi mahdollista /34/. Toisaalta rankana hakkuu laskee hehtaarikohtaista hakkuukertymää verrattaessa kokopuuna korjuuseen. Pienpuun korjuu voidaan toteuttaa integroidusti ainespuuhakkuun yhteydessä. Tällöin ainespuun mitat täyttävät rungot valmistetaan ainespuuksi ja niiden latvat sekä ainespuumitat täyttämättömät rungot energiapuiksi.

Nuorten metsien energiapuu edellyttää aina riittävää hakkuukertymää (yli 40 m<sup>3</sup>/ha) ja riittävää rungon keskikokoja. Yksittäisistä olosuhdetekijöistä juuri rungon keskikokoissa olevat erot aiheuttavat suurimmat erot metsähakkeen korjuukustannuksissa. Pienpuulle maksettavat Kemera-tuet parantavat pienpuuhakkeen kilpailukykyä hakkuutähdehakkeeseen verrattuna. Ilman tukia pien-



puu ei pärjää hintavertailussa hakkuutähdehakkeen kanssa. Pienpuuhakkeen ero hakkuutähdehakkeen kustannuksiin syntyy kaato-kasausvaiheessa, joka maksaa 12-15 €/m<sup>3</sup> /35/. Siksi toiminnan tehostaminen tulisi kohdistua juuri tähän vaiheeseen. Muiden kustannustekijöiden osalta pienpuuhake on kilpailukykyistä hakkuutähdeeseen verrattuna. Hakkuun tuottavuus vaihtelee pääasiassa rungon koosta riippuen 2-11 m<sup>3</sup>/tehotunti välillä. Pienpuun korjuun kustannukset ovat keskimäärin noin 30 €/m<sup>3</sup>. Kustannukset voivat vaihdella olosuhteista ja tuotantoketjusta riippuen huomattavasti.

Erot miestyönä tai koneella tehdyn pienpuun kaato-kasauksen kustannusten välillä ovat pienet, mutta kun huomioidaan metsäkuljetuksen tehostuminen koneellisen kaadon jäljiltä, on koneellinen korjuu miestyötä edullisempaa /35/.

Joillakin alueilla on alettu maksamaan kantohintaa energiapuuharvennuskohdeista. Jos energiapuun käyttömäärät lisääntyvät nykyisestä ja sen kysyntä kasvaa tulee paineita yleisen kantohinnan saamiseksi myös nuoren metsän kunnostuksista saatavalle energiapuulle.

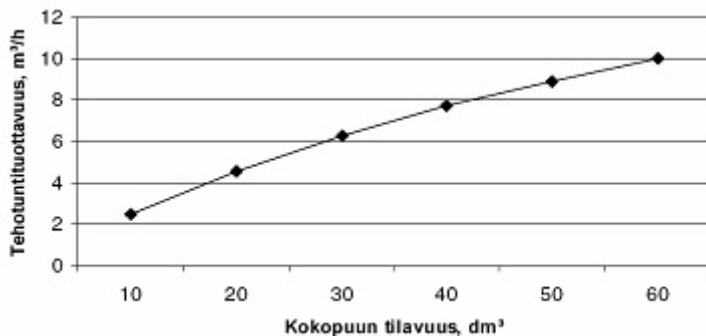
### **Koneellinen hakkuu**

Pienpuun koneellisesta hakkuusta ja siinä käytettävistä laitteista on tehty useita eri tutkimuksia. Laitilan ym. /35/ tekemässä tutkimuksessa selvitettiin Timberjack 720 keräävän energiapuukouran (kuva 18) tuottavuutta kokopuun hakkuussa. Tutkittu laite oli joukkokäsittelykoura, jolla voitiin tehdä puiden kaato, katkonta ja kasaus. Hakkuulaite oli asennettuna sekä Timberjack 870-että Valmet 901 -hakkuukoneissa.

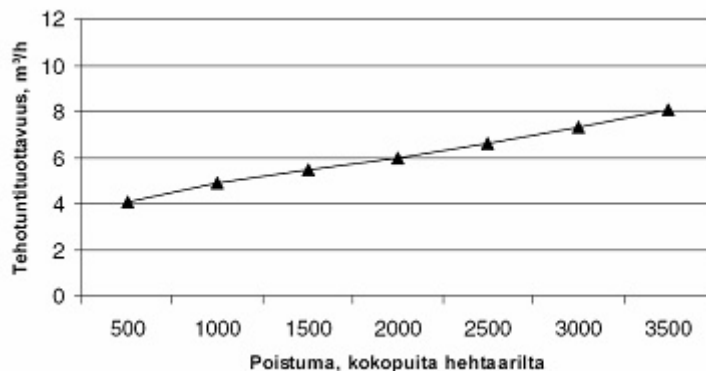


*Kuva 18. Timberjack 720 keräävä energiapuukoura nuoren männikön harvennuksella /35/.*

Hakkuussa kaato-kasaus-työvaiheeseen kului 62 % tehoajasta ja latvojen katkontaan, keräilyyn ja kasaukseen 21 % tehoajasta. Työpistesierrojen osuus tehoajanmenekistä oli 12 % ja runkojen katkontaan osuus 5 %. Hakkuun tuottavuuteen vaikuttaa selvimmin rungon koko. Laitilan ym. /35/ tutkimuksessa hakkuun tehotuntituottavuus kasvoi 2-10 m<sup>3</sup>:iin kokopuun tilavuuden kasvaessa 10-60 dm<sup>3</sup> (kuva 19). Myös poistuman määrän kasvaessa tuottavuus kasvoi. Poistuman kasvu 500:sta 3 500:een kokopuuhun hehtaarilla lisäsi kaato-kasauksen tuottavuutta 4:stä 8 m<sup>3</sup>:iin (kuva 20).



Kuva 19. Kokopuun tilavuuden vaikutus kaato-kasauskoneen tehotuntituottavuuteen /35/



Kuva 20. Poistuman tiheyden vaikutus kaato-kasauskoneen tuottavuuteen /35/.

Laitilan ym. /35/ tekemässä tutkimuksessa selvitettiin myös osapu- ja kokopuumenetelmän vaikutusta Timberjack 720:n tuottavuuteen. Puut korjattiin joko kuljetuspituuteen katkottuna kokopuuna tai kuljetuspituuteen katkottuna osapuuna, josta oli poistettu 1-3 metrin mittainen latvakappale. Osapuiksi katkomisella pyrittiin vähentämään metsämaan ravinnehävikkiä. Työtapa, jossa latvaosa jätettiin metsään, alensi kaato-kasauskoneen tuottavuutta keskimäärin 2 m<sup>3</sup>/tehotunnissa. Tuottavuuden lasku johtui ylimääräisestä työvaiheesta sekä pienentyneestä rungon keskikoosta ja kertymästä.

Integroidussa korjuussa ainespuiden latvakappaleiden karsinta energiapuiksi on tehokasta, sillä tuottavuus saadaan lähes kolminkertaiseksi verrattuna ainespuukokoa pienempien puiden hak-



kuuseen. Latvakappaleiden hakkuusta energiapuuksi aiheutui verraten vähän lisätyötä. Kokopuun hakkuun tuottavuus oli männiköissä ja koivikoissa samaa tasoa. /34/

Metsänomistajan kannattaa harkita kokopuukorjuuta ensiharvennuskohteissa, jos kuitupuukertymä jää alle 20 kuutiometriin hehtaarilla /36/. Jos myyntikelpoista kuitupuuta kertyy tätä enemmän, kannattava vaihtoehto on usein harvennuksen viivästyttäminen ja ainespuun korjuuseen tähtääminen. Eri puutavaralajien kantohinnat vaikuttavat vaihtoehtojen taloudelliseen kannattavuuteen. Kokopuukorjuun aiheuttamat kasvutappiot eivät ole taloudellinen este kokopuukorjuulle keski- tai hyväravinteisilla mäntyvaltaisilla kivennäismailla.

### **3.3.3 Kannot**

Kantojen nosto energiakäyttöön on viime vuosina lisääntynyt ja asia on herättänyt yhä laajempaa kiinnostusta 2000-luvulla. Kantojen nostolla on myös metsänhoidollinen hyöty, sillä samalla kerralla voidaan poistaa tehokkaasti juurikäpäsieni, joka on metsän kasvun kannalta haitallista. Kantojen noston yhteydessä voidaan toteuttaa myös istutusta helpottava laikkumätästys. Kantojen nosto vaatii hakkuutähteen keräämisen uudistusosalta, joten kannot ja hakkuutähte tulisivat nähdä toisiinsa kytkeytyvänä logistisena kokonaisuutena.

Parhaita nostokohteita ovat helpon nostettavuuden (vähäinen kivisyys, pintajuuristo) ja hyvän puunsaannon vuoksi rehevät kuusikot. Kantojen nosto tapahtuu ns. kantoharalla, joka on yleensä asennettu tela-alustaiselle kaivurille (kuva 21). Toinen vaihtoehto on ns. kantoharvesteri, jolla kannot myös pilkotaan. Päätehakkuukohteiden lisäksi kantoja nostetaan erilaisilta raivausaloilta, kuten tielinjoilta, pelloilta tai rakennustyömailta.



*Kuva 21. Kantojen nostoa. /37/*

Noston jälkeen kantojen annetaan kuivua palstalla, jolloin maa-aines varisee kuivuessaan ja saateen huuhtomana pois. Kuivumisaika on yleensä 1-3 vuotta. Kuivumisen jälkeen kannot ravistellaan ja kuljetetaan varastolle. Kannot, kuten muukin metsäpolttoaine pyritään varastoimaan teiden varteen siten, että lastaus autoon olisi mahdollisimman helppoa (kuva 22).



*Kuva 22. Kantoja tien varressa odottamassa kuljetusta. /38/*

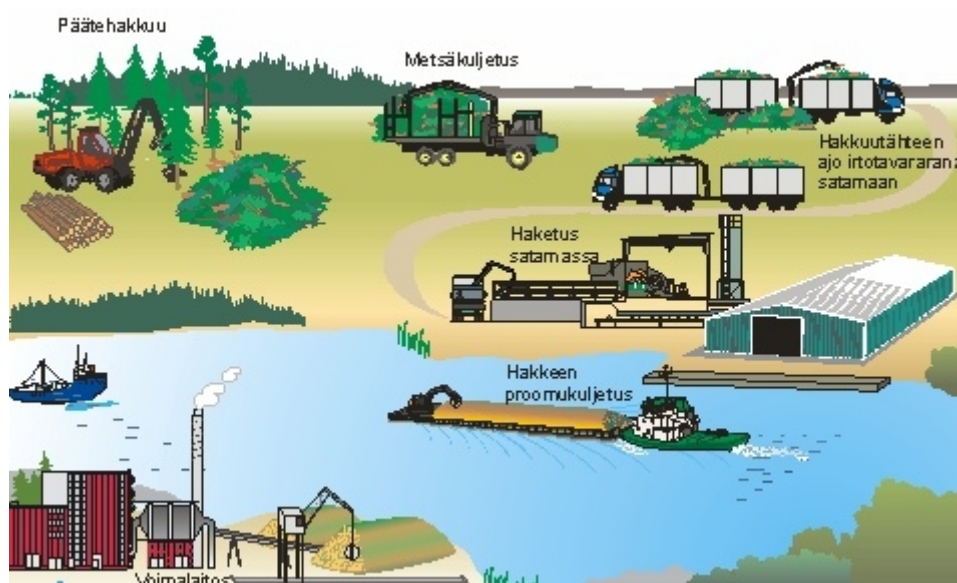
Kannot murskataan yleensä vasta käyttöpaikalla suurissa murskaimissa. Kantojen murskausta voidaan toteuttaa myös terminaaleissa mobiilimurskaimilla. Kantojen mukana tulevat kivet voi-

vat aiheuttaa ongelmia sekä murskaimissa että voimalaitoksen polttoprosessissa. Yleensä pyritään murskaamaan ylivuotisia kantoja, jolloin mahdollisimman suuri osa kivistä ja muusta maa-aineksesta on varissut ja huuhtoutunut sateen mukana pois. Kivistä tullut hiekka voi aiheuttaa ongelmia myös kattiloissa.

Kannot kuljetetaan pääsääntöisesti irtotavarana, eli murskaus tapahtuu vasta käyttöpaikalla tai terminaalissa. Koska kantojen tuottaminen murskeeksi vaatii terminaali- tai käyttöpaikkajärjestelmän mukaisen toiminnon, sopisi kantojen hankintalogistiikka myös osaksi vesitiekuljetusketjua. Proomuihin olisi järkevämpää lastata valmista mursketta, sillä kannot vievät epäsymmetrisen muotonsa vuoksi paljon kuljetustilaa.

#### 4 VESITIEKULJETUS OSANA TERMINAALIHAKETUSJÄRJESTELMÄÄ

Vesitiekuljetuksen sisältämä metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmä voidaan nähdä osana terminaalihaketuskäytännössä (kuva 23). Terminaalitoiminnot voisivat sijoittua vesitiekuljetuksen sisältämässä hankintalogistiikkajärjestelmässä joko lastaus- tai purkutermiinalin yhteyteen. Lastaustermiinalissa tapahtuvan terminaalihaketuskäytännön etuja metsäpolttoaineiden hankintalogistiikassa ovat metsäpolttoaine-erien (hakkuutähde, pienpuu ja kannot) vastaanottomahdollisuus, haketuksen/murskauksen keskitetty paikka, varmuusvarastointimahdollisuus sekä metsähakkeella saavutettava korkeampi tiiviysaste kaukokuljetuksessa.



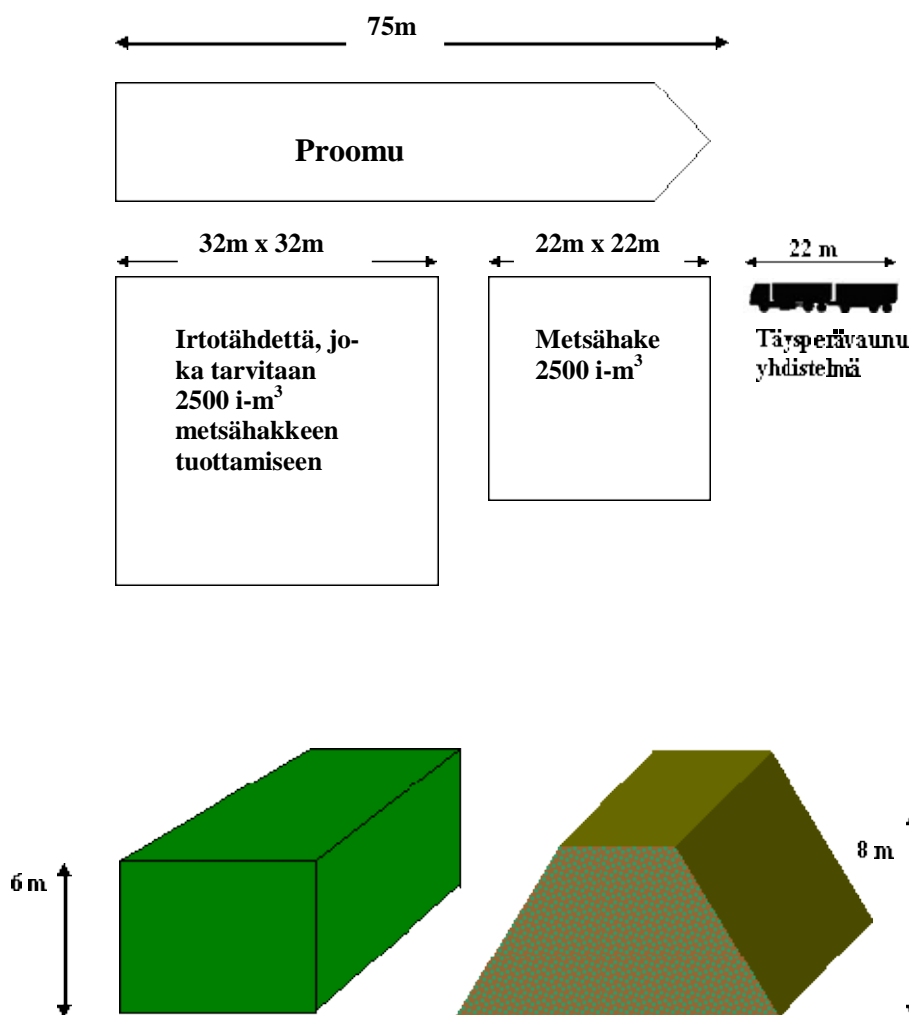
Kuva 23. Vesitiekuljetus osana metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmää. /39/

## 4.1 Lastaus- ja purkupaikkojen terminaalitoiminnot

Tilanteen ja käytettävissä olevan varastointikentän pinta-alan mukaan biomassa voidaan varastoida joko hakettuna tai hakettamattomana irtotavarana (risuina, pienpuuna tai kantoina). Hakekasa voi olla n. 8 m korkea, kun haketus tapahtuu paikan päällä ja hake puhalletaan hakkurista suoraan kasaan. Pyöräkuormaajalla voidaan tarvittaessa tehdä suurempia ja korkeampia hakeauomoja. Irtotähteenä sama määrä biomassaa vie yleisesti ottaen kaksinkertaisen varastointipinta-alan. Irtotähdekasat ovat tyypillisesti n. 6 m korkeita. /40/

Jos proomukuljetuksissa käytettäisiin raakapuun kuljetuksiin käytettävää suurinta saatavissa olevaa kalustoa, eli vetoisuudeltaan n. 2 500 i-m<sup>3</sup> pohja- eli ruumaproomua, mahtuisi yhteen proomuun n. 25 täysperävaunullista (n. 100 m<sup>3</sup>) haketta. Varastointikentällä 2 500 i-m<sup>3</sup> hakekasa (korkeus 8 m) vaatisi n. 500 m<sup>2</sup> pohjapinta-alan.

Irtotähteenä säilytys vie kaksinkertaisen varastointipinta-alan. Irtotähdekasa, josta saadaan 2 500 i-m<sup>3</sup> metsähaketta, vie n. 1 000 m<sup>2</sup> pinta-alan. Kuvassa 24 on havainnollistettu biomassan vaatima varastotila lastausalueella.



Kuva 24. Metsäpolttoaineen varastointi irtotähteenä vie noin kaksinkertaisen tilan verrattuna hakkeena varastointiin. /41/

Käytännössä irtotähdettä varastoidaan haketuksen helpottamiseksi yhden suuren kasan sijaan 6 m korkeisiin vierekkäisiin aumoihin, jolloin irtotähteenä varastoinnin tilantarve on kuvan 24 esimerkkiä suurempi.

Hakkeen varastointi lastauspaikalla tapahtuu suurissa aumoissa, eli kasoissa. Hakkeen pitkäaikainen varastointi ei kuitenkaan ole suositeltavaa. Pitkän varastoinnin aikana biomassa alkaa lahota, pieneliötoiminta lisääntyy ja puuaineksesta irtoaa haihtuvia hiilivetyjä. Hakekasat alkavat ajan myötä lämmetä ja lämpötila auman sisällä voi kohota huomattavan korkeiksi aiheuttaen mm. auman savuamista. Hakkeen kiintoaineen massa pienenee ja lämpöarvo heikentyy. Talvella haketettu aines kestää varastointia aumassa noin kaksi kuukautta ilman merkittäviä kuiva-ainetappioita. Kesällä biomassan hajoamisprosessi on nopeampaa. Proomukuljetukset tulisi sovitaa muuhun tuotantoketjuun siten, että hakkeen pidempiaikaiselta varastoinnilta vältyttäisiin.

Käytännössä proomukuljetusten pitäisi painottua loppusyksyyn, jolloin vesistöt eivät ole vielä jäätyneet, mutta voimalaitokset tarvitsisivat raaka-ainetta. Vaihtoehtoisesti syväväyliä pitkin myös talvikauden kuljetukset olisivat mahdollisia, mutta kuljetuskapasiteetti olisi rajallinen.

Sopiva menettelytapa olisi kerätä irtoainesta lastauspaikalle pidemmän ajan kuluessa ja aloittaa haketus ennen proomun saapumista. Näin meneteltäessä saavutettaisiin hakkurille korkea yhtäjaksoinen käyttöaste ja haketta ei tarvitsisi varastoida pitkiä aikoja. Toisaalta, jos haketus viivästyy esim. kaluston rikkoutumisen vuoksi, voi aluksen ja proomun odotusaika muodostua tarpeettoman pitkäksi. Pienempien proomujen tai aluksista riippumattomien proomuyksiköiden täyttäminen suoraan hakettamalla voisi olla myös mahdollista käyttäen sopivaa hihnakuljetinjärjestelmää.

Lastauksessa on tärkeää saada hakelasti mahdollisimman tiiviiksi, jotta kuorman kokoa saadaan kasvatettua. Saimaan alueella liikennöivien suurimpien Eurooppa II a-mallisten proomujen maksimi kantavuus on 2 540 tonnia, mutta tilavuutta on proomussa irtihakkeelle vain noin 2 500 m<sup>3</sup>. Tilavuus on rajoittavana tekijänä proomukalustolla, sillä kantavuuden perusteella voitaisiin kuljettaa yli kolminkertainen määrä haketta (polttohake 0,3 t/i-m<sup>3</sup>).

Metsähakelasti tiivistyy hieman oman painonsa ansiosta, mutta parhaan tiiviuden saavuttamiseksi tulee lasti tiivistää esim. ajamalla kuorman päällä kauhakuormaajalla, traktorilla tai pienemmällä ”bobcatilla” (kuva 25). YTI-tutkimuskeskuksessa suoritettujen laboratoriomittakaavaisten kokeiden mukaan voidaan metsähaketta tiivistää jopa 20 %. Realistinen tiivistysaste aluskuljetuksissa on noin 15 % -yksikköä, jolloin lastilla saavutetaan 0,85 MWh/i-m<sup>3</sup> energiasisällön sijaan 1 MWh/i-m<sup>3</sup> energiasisältö. Tämä merkitsee siis myös aluskuljetuskustannusten laskua lähes samassa suhteessa. Tiivistymiseen vaikuttaa myös hakkeen palakoko, esim. kantomurske vie energiasisältöä kohden enemmän tilaa kuin hienompijakoinen hakkuutähdehake. /1/





*Kuva 25. Hakelastia voidaan tarvittaessa tiivistää ajamalla sen päällä esim. bobcatilla.*

Jos käytetään proomukalustoa siten, että kolmesta proomusta aina yksi liikkuu, yksi on lastattavana ja yksi määräsatomassa purettavana, ei lastauksen kuluva aika ole yhtä kriittinen kustannustekijä. On myös mahdollista käyttää kahden proomun menetelmää, jolloin toinen proomu lastataan sillä välin, kun toinen proomu käy tyhjennettävänä määräsatomassa. Tämä edellyttää suhteellisen nopeaa lastin purkua määräsatomassa. Proomukalustoa käytettäessä voidaan siis kuljetusketju optimoida siten, että koko proomulastillista metsähaketta ei tarvitse olla satamassa valmiina odottamassa, jolloin varastointikentän koko voisi olla pienempi.

### **Haketukseen kuluva aika**

Nykyaikaisella mobiilihakkurilla (esim. Giant) voidaan haketta hakkuutähdettä n. 1 000 i-m<sup>3</sup> työvuorossa (8 h). Maksimissaan voidaan haketta n. 200 i-m<sup>3</sup> tunnissa. Erityisesti tienvarsihaketuksessa kuluu aikaa autojen siirtelyyn ja muihin haketusjärjestelyihin, joten hakkuri ei ole yhtä jaksoisessa käytössä. Tämän vuoksi on proomukuljetuksiin yhdistettynä kannattavaa kuljettaa metsäpolttoaine irtotähteenä lastauspaikalle ja suorittaa haketus keskitetysti. Irtotähteen kuljettaminen rekalla on energiasisältöä kohti kalliimpaa kuin hakkeen kuljettaminen, mutta haketusjärjestelyissä saavutettavat säästöt ja tuotanto- ja kuljetusketjun joustavuus puoltavat lastauspaikalla tapahtuvaa haketusta. /40/

#### **4.1.1 Lastauspaikat**

Järvi-Suomen Uittoyhdistyksen laatimassa selvityksessä on kartoitettu Vuoksen ja Kymijoen vesistöalueilta sellaiset paikat (satamat, lastauspaikat ja pudotuspaikat), jotka voisivat toimia lastauspaikkoina myös metsähakkeen vesitiekuljetuksille /42/.

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

#### 4.1.2 Lastausmenetelmät

Metsähakkeen lastauksessa voitaisiin käyttää kauhakuormaajaa, hihnakuuljetinta, aluksen omaa kauhaa tai nosturia, autonosturia tai materiaalinkäsittelykonetta. Metsäpolttoaine voitaisiin hakea myös suoraan proomuun. Edellä mainittujen menetelmien yhdistelmät ovat myös mahdollisia proomujen lastaamisessa. Lastausmenetelmien soveltuvuus riippuu käytettävästä proomukalustosta ja satamaolosuhteista. Seuraavaksi on esitelty eri lastausvaihtoehtojen etuja ja mahdollisia haaitapuolia.

##### **Kauhakuormaaja**

Kauhakuormaajan, eli pyöräkuormaajan, etuna ovat suhteellisen edulliset käyttökustannukset. Lisäksi kauhakuormaajalla pystytään toimimaan myös suhteellisen pienillä lastauspaikoilla. Kauhakuormaajan käyttäminen varsinaiseen lastaamiseen onnistuu vain, jos aluksessa on ajoramppi (kuva 26). Kauhakuormaajalla voidaan myös siirrellä ja järjestellä hakekasoja lastauspaikalla. Sitä tarvitaan myös apuna varsinaisen lastauksen tapahtuessa esim. autonosturilla, hihnakuuljettimella tai materiaalinkäsittelykoneella. Kauhakuormaajalla voidaan koneen ja kauhan koosta riippuen lastata ajorampilla varustettuun alukseen haketta n.  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ . /43/





*Kuva 26. Bulk -tuotteita (kuvassa hiekkaa) voidaan lastata alukseen kauhakuormaajalla, jos aluksessa on ajoramppi.*

### **Hihnakuljetin**

Hihnakuljettimen (kuva 27) etuina on sen nopeus ja ulottuvuus. Hihnakuljettimella voidaan tarvittaessa myös lastata alusta sellaisilta lastauspaikoilta, joissa ei alusta voida ajaa aivan laituriin kiinni. Hihnakuljettimelle hake voidaan siirtää kauhakuormaajalla. Hakkureissa ja murskaimissa on myös hihnakuljetin tai puhallinputki, jota voitaisiin mahdollisesti hyödyntää myös lastattaessa suoraan proomuun.



*Kuva 27. Pieni siirrettävä hihnakuljetin.*

### **Aluksen oma kone**

Aluksen oma kauha tai nosturi alentaa lastauskustannuksia, jos pystytään välttämään muiden kaltevien lastausmenetelmien käyttö. Hakkeen tulee kuitenkin olla aluksen oman kauhan ulottuvilla. Alusten omat lastauslaitteistot voivat olla myös kapasiteetiltaan huomattavasti pienempiä ja hitaampia kuin muut menetelmät (kuva 28).



*Kuva 28. Kivihiilen purkua proomussa mukana kulkevalla kaivinkoneella Akonniemen satamassa. /44/*

### **Autonosturi**

Kahmarikauhalla varustetulla autonosturilla voidaan lastaus suorittaa nopeasti, riippuen käytettävän kauhan ja nosturin koosta. Suuren autonosturin (40-60 t) tuntihinta on n. 145 €/h (sis. työn). Autonosturi vaatii pelkkää kauhakuormajaa suuremman tilan. Autonosturia käytettäessä tarvitaan lisäksi kauhakuormajaa hakkeen siirtelyyn lastauspaikalla. /43/

### **Materiaalinkäsittelykone**

Materiaalinkäsittelykone on hydraulinen nosturi (kuva 29), jolla lastaus pystytään suorittamaan nopeasti. Materiaalinkäsittelykoneita on suurimmissa sisävesialueen satamapaikoissa.



*Kuva 29. Telojen päällä liikkuva materiaalinkäsittelykone, nostokyky 6 tn, ulottuvuus 22 m ja kokonaispaino 60 t. /45/*

### 4.1.3 Purku- ja käyttöpaikat

Vesitiekuljetuksen sisältämän metsähakkeen hankintaketjun kannalta olisi oleellista, että purkupaikka sijaitisi lähellä voimalaitosta, sillä materiaalin kuljettaminen vesitiekuljetuksen jälkeen erikseen voimalaitokselle lisää kustannuksia. Vesiväylän läheisyydessä sijaitsevia metsähakkeen vesitiekuljetukseen mahdollisesti soveltuvia voimalaitoksia Vuoksen vesistöalueella on useita /Liite II/.

### 4.1.4 Purkumenetelmät

Proomulastin purkumenetelmät ja mahdollinen jatkokuljetustarve purkupaikalta käyttöpaikalle ovat tapauskohtaisia. Purkumenetelmät voivat olla osittain myös samoja kuin edellä esitellyt lastausmenetelmät. Seuraavaksi on esitelty pääpiirteet mahdollisista purkumenetelmistä, joiden lisäksi voitaisiin myös käyttää materiaalinkäsittelykoneita tai proomussa kulkevaa omaa konetta metsäpolttoaineiden purkamiseen. Bulk-lastin, kuten metsäpolttoaineen, purkamisessa sataman purkulaitteistoilla on olemassa kaksi eri pääsuuntausta: pneumaattinen ja mekaaninen purku.

Pneumaattisessa menetelmässä imetään ruumasta lasti suuren imutorven välityksellä (kuva 30). Pneumaattisella menetelmällä saadaan irtolastiruuma tyhjenettyä hyvin siististi, ja jälkisiivouksen tarve on usein melko pieni. Imusuuttimet mahtuvat myös tarvittaessa sisään pienistäkin lastiluukuista. Pneumaattiset lastinpurkulaitteet soveltuvat myös hyvin märille tai kosteille aineille, ja niiden tukkeutuminen/jumittuminen on mekaanisia menetelmiä vähäisempää. Haittapuolena on mekaanisiin menetelmiin verrattuna suuri energiankulutus. Karkeasti voidaan arvioida pneumaattisten menetelmien energiankulutuksen olevan luokkaa 0,6-1,0 kW/t purettua lastia ja mekaanisilla menetelmillä noin puolet tästä, eli 0,3-0,5 kW/t. /46/



Kuva 30. Pneumaattinen kiinteä purkulaitteisto (vasen). Pneumaattinen purku mobiililaitteella (oikea). /47/



Mekaanisesti voidaan lasti purkaa satamanosturissa olevan kahmarikauhan (kuva 31), siirreltävän ruuvikuljettimen, hihnakuljettimen tai kauhaelevaattorin avulla. Mekaanisen menetelmän etuina ovat pneumaattiseen purkuun verrattuna alhainen energiankulutus ja useissa tapauksissa pienemmät meluhaitat. Mekaanisesti ei lastiruumaa saada yhtä tarkasti tyhjennettyä kuin pneumaattisesti ja jälkisiivoukseen tarvittava työmäärä on huomattavasti suurempi. Lastin purkamiseen kuluva kokonaisaika voi muodostua ruuman siivouksen takia varsin pitkäksi.



*Kuva 31. Kiinteä, kiskoilla liikkuva satamanosturi (vasen) ja kahmarikauha (oikea). /48/*

Lastinkäsittely laiturilla voi tapahtua pyöräkuormaajalla ja hihnakuljettimilla tai lasti voidaan purkaa suoraan laivasta varastokentälle aumoihin. Yleinen menetelmä rannikolla sijaitsevilla hii-  
livoimalaitoksilla on purkaa lasti kahmarilla siilon kautta hihnakuljettimille, jotka siirtävät polttoaineen voimalaitoksen varastokentälle.

## **4.2 Kustannusten muodostuminen**

Seuraavaksi on tarkasteltu eri kustannustekijöitä metsäpolttoaineen tuotannossa ja vesitiekuljetuksen sisältämässä hankintaketjussa metsätähteen ja terminaalihaketusjärjestelmän osalta verrattuna muihin metsäpolttoaineisiin ja välivarastohaketusjärjestelmään. Kustannukset ovat ilmoitettu puun energia-arvoon perustuen, €/MWh.

### 4.2.1 Tienvarsihintaa

Metsäpolttoaine-erille muodostuu tienvarsihintaa korjuu- ja kantohintakustannusten ja Kemera-tukien erotuksena.

- Hakkuutähde: 3 (korjuu) + 0,5 (kantohinta) = 3,5 €/MWh
- Pienpuu: 8,5 (korjuu) + 1,5 (kantohinta) – 5,6 (Kemera) = 4,4 €/MWh
- Kannot: 5,7 (korjuu) + 0 (kantohinta = maanmuokkaus) = 5,7 €/MWh

Pienpuun hinta sisältää Kemera -tuet, jotka ovat 5,6 €/MWh. Kemera-tuet koostuvat seuraavasti (esimerkkikertymä 60 m<sup>3</sup>/ha = 120 MWh/ha) /49/:

Hehtaarituki: 210,5 €/ha	1,75 €/MWh
Toteutus selvitystuki: 42,10 + 4,21 €/ha	0,39 €/MWh
Energiapuun korjuu (kasaus ja kuljetus): 7 €/m <sup>3</sup>	3,5 €/MWh
Yhteensä:	5,64 €/MWh

Alkuperäiseksi koneellisen energiapuuharvennuksesta saatavan pienpuun tienvarsihinnaksi (korjuu 17 €/m<sup>3</sup> ja kantohinta 3 €/m<sup>3</sup> /50/) ilman Kemera-tukea arvioitiin 10 €/MWh.

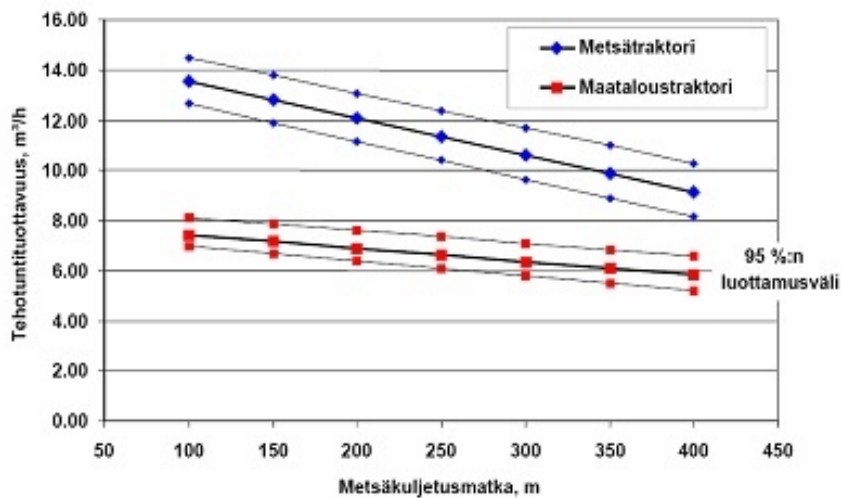
### Metsäkuljetus

Irtonaisen hakkuutähteen metsäkuljetus tehdään pääsääntöisesti normaaleilla kuormatraktoreilla. Kuorman kokoa voidaan kasvattaa jatkamalla tai muuten laajentamalla kuormatilaa. Riepon /51/ tutkimuksessa irtonaisen hakkuutähteen kuormakoot vaihtelivat keskimäärin 6-10 k-m<sup>3</sup>:n välillä. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus oli tutkimuksessa 200-300 metrin metsäkuljetusmatkalla 7-11 m<sup>3</sup>/käyttötunti. Tutkimuksessa havaittiin, että ruskean hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus oli n. 80 % tasolla vihreään hakkuutähteeseen verrattuna. Kuormatraktoreina tutkimuksessa oli kaksi Timberjack 1010 -kuormatraktoria sekä Valmet 860 - ja Valmet 838 -kuormatraktorit. Kuormatilan kehystilavuus oli peruskuormatilalla 17-19 kehys-m<sup>3</sup>. Jatko-osalla ja kukkuralle kasattuina kuormankoko oli noin 27-31 kehys-m<sup>3</sup>.

Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuuteen vaikuttavat metsäkuljetusmatka, kuormakoko ja ajouranvarsi tiheys m<sup>3</sup>/100 m ajouraa. Korpilahden /52/ tutkimuksessa hakkuutähteen metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus oli 9,3 m<sup>3</sup>, kun kuorman koko oli 10,3 m<sup>3</sup> ja metsäkuljetusmatka 300 metriä. Riepon /53/ tutkimuksessa vastaava määrä oli noin 9,8 m<sup>3</sup>.

Asikaisen ym. /54/ tutkimuksessa saadut hakkuutähteen metsäkuljetuksen tehotuntituottavuudet on esitetty kuvassa 32. Tutkimuksessa keskiraskaan kuormatraktorin kuormakooksi määritettiin

noin 4-5 m<sup>3</sup> tuoreella hakkuutähteellä. Laajennetulla kuormatilalla varustetun kuormatraktorin kuormakoko oli 8-10 m<sup>3</sup>.



Kuva 32. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tehotuntuottavuus, m<sup>3</sup>/h lineaarisella regressiomallilla laskettuna, kuormakoko 5 m<sup>3</sup> ja ajouranvarsitiheys 10 m<sup>3</sup>/100 m. /54/

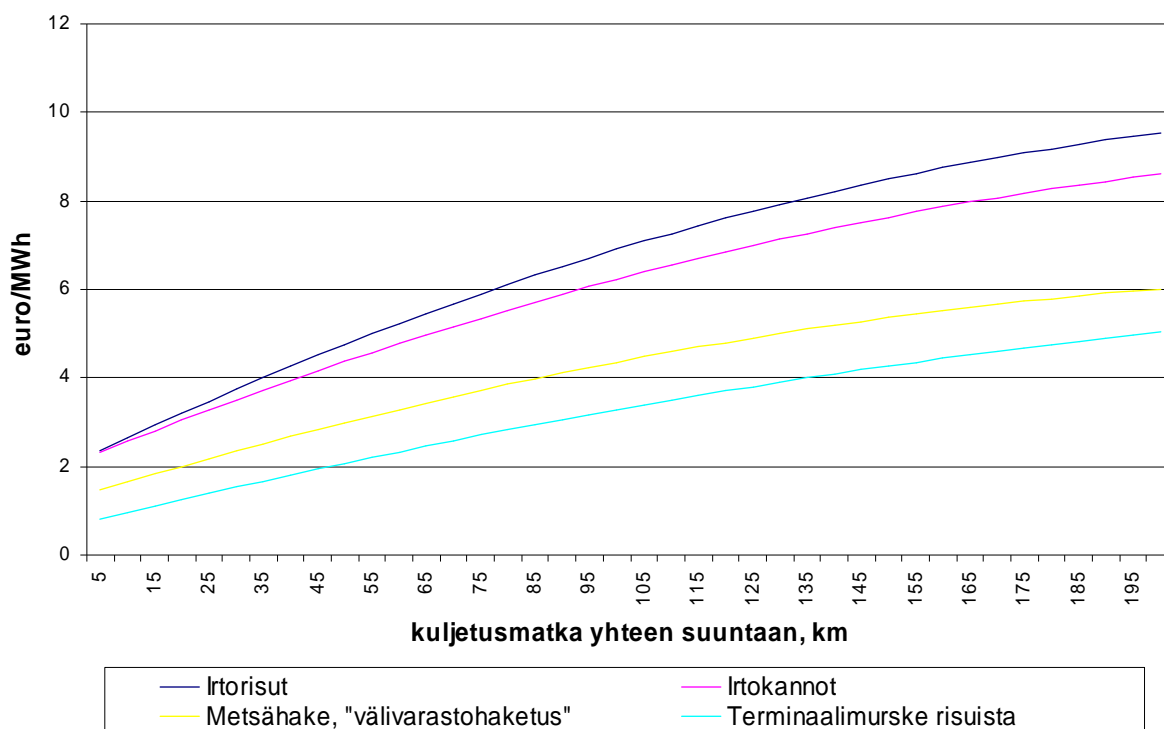
Riepon /51/ selvityksessä hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuntikustannus oli n. 52 € Vuosittaisena käyttötuntimääränä oli käytetty 2 465 tuntia. Selvityksessä vihreän hakkuutähteen metsäkuljetuskustannus oli 5,55 €/m<sup>3</sup> (5-7 €/m<sup>3</sup>) metsäkuljetusmatkan ollessa 250 metriä. Samassa selvityksessä on esitetty myös vihreän ja ruskean hakkuutähteen suhteelliset metsäkuljetuskustannukset hakkuutähteen kosteuden suhteen. Hakkuutähteen palstalla kuivauksen tulisi pienentää hakkuutähteen kosteutta 20 %, jotta näin saatu lisäenergia kattaisi sen muuten korkeammat metsäkuljetuskustannukset.

Asikaisen ym. /54/ tutkimuksessa metsätraktorin käyttötuntikustannus oli 51 €, risutraktorin 53 €, hakkuutähdepaalaimen 67 €, hakkuukoneen 69 €, palstahakkurin 88 € ja välivarastohakkurin 122 €. Hakkuutähdeauton ajotuntikustannus oli 75 € ja kuorma- ja purkukustannus 53 €. Puutavara-autolla vastaavat kustannukset olivat 70 € ja 47 €, vaihtolava-autolla 76 € ja 53 € sekä hakeautolla 77 € ja 54 €.

#### 4.2.2 Alkukuljetus

Kuljetuskustannus tienvarresta terminaaliin tai käyttöpaikalle on merkittävä kustannustekijä metsäpolttoaineen kokonaishinnasta. Keskimääräisen ajomatkan pidentyminen 20 km:stä 40 km:iin lisää irtorisuina kuljetettavan hakkuutähteen hintaa noin 1 €/MWh (kuva 33) /55/. Ajomatkan lyhentäminen ja kuljetusten optimointi on yksi tehokkaimmista keinoista vähentää metsäpolttoai-

neen tuotantoketjun kokonaiskustannuksia. Hankinta-alueen kokonaispinta-alaan perustuen voidaan keskimääräisen ajomatkan olettaa olevan n. 2/3 pisimmästä ajomatkasta /1/.



Kuva 33. Metsäpolttoaineiden rekkakuljetuksen hinta ajomatkan funktiona. /55/

Irtorisujen ja kantojen kuljetukseen käytettävän kuorma-auton kuormatilauksen kehystilavuus on suurimmissa käytettävissä olevissa autoissa n. 140 m<sup>3</sup> /13,55/.

Peitetyistä kasoista kuormatessa ajanmenekki oli ollut keskimäärin 1,6 min/m<sup>3</sup>, josta taakan jättämiseen, tiivistämiseen ja kuorman siistimiseen kului tutkimuskohteella keskimäärin 47 % /56/.

Purkamisen ajanmenekki oli keskimäärin 0,43 min/m<sup>3</sup>.

Toimitettaessa hakkuutähdettä suurille voimalaitoksille, joissa materiaalin murskaaminen on mahdollista myös käyttöpaikalla, on havaittu, että lyhyillä kuljetusmatkoilla irtorisujen toimittaminen käyttöpaikalle on ollut edullisempaa hakkeeseen verrattuna /57/. Tutkimuksesta riippuen rajaetäisyys on ollut 55-65 km. Tätä pidemmällä matkoilla tienvarsihaketuksen perustuva ketju on tullut edullisemmaksi.

### 4.2.3 Haketus

Haketuksen kustannukset vaihtelevat riippuen haketettavasta materiaalista ja haketusmenetelmästä. Esimerkki kustannuksista ilman Kemera-tukia /55/:

	Terminaalihaketus/murskaus	Välivarastohaketus
• Hakkuutähde:	2,41 €/MWh	3,58 €/MWh
• Pienpuu:	2,41 €/MWh	3,31 €/MWh
• Kanto:	3,80 €/MWh	

Korjatun energiapuun haketukseen saa rahoituslain mukaan tukea nuoren metsän hoidossa 1,70 € hakettua irto-m<sup>3</sup>:iä kohti. Tuen saa metsänomistaja, lämpöyrittäjä, haketusurakoitsija tai muu haketta välittävä yhteisö. Haketuksen toteutusselvityksen tuki 0,09 €/hakettu irto-m<sup>3</sup>. /49/

Tuki haetaan, kun energiapuun käyttäjä on vastaanottanut hakkeen. Hakemukseen on liitettävä ostajan todistus vastaanotetun hakkeen määrästä. Haketuksen Kemera-tuet /49/:

• Haketus 1,70 €/i-m <sup>3</sup> (= 4,13 €/m <sup>3</sup> )	2,07 €/MWh
• Haketuksen toteutusselvitys 0,09 €/i-m <sup>3</sup>	0,11 €/MWh
• Yhteensä:	2,18 €/MWh

Suomessa on käytössä sekä hakkureita että murskaimia. Haketus voidaan tehdä palstalla, tienvarressa, terminaalissa tai käyttöpaikalla. Hakkurit jaotellaan toimintaperiaatteensa mukaan laikka-, rumpu- ja ruuvihakkureihin. Murskaimia ovat vasaramurskaimet, levymurskaimet ja liikkuvilla paloitteluterillä toimivat ”kattila- ja kaukalomurskaimet” sekä hydraulisesti toimivat paloittelumurskaimet. Parhaiten hakkuutähteiden ja muun metsäenergian haketukseen soveltuvat rumpuhakkurit tai murskaimet. Murskaimet sietävät hakkureita paremmin epäpuhtauksia, joten ne soveltuvat hyvin esimerkiksi kantojen murskaukseen.

Suurimmilla autoalustaisilla rumpuhakkureilla päästään yli 60 m<sup>3</sup>:n tuntituotoksiin (yli 150 i-m<sup>3</sup>/h). Siirrettävien mobiilimurskainten tuottavuus on noin 100 m<sup>3</sup>/h (250 i-m<sup>3</sup>/h).

Haketettava materiaali ja sen kosteus vaikuttavat haketuksen tuottavuuteen. Kokopuun haketuksen tuottavuus on suurempi kuin hakkuutähteen. Kokopuun haketus on noin 35-37 prosenttisykköä nopeampaa kuin hakkuutähteen. Kuivan materiaalin haketuksen tuottavuus oli noin 30



prosenttiyksikköä alhaisempi kuin tuoreen. Myös puulajilla on vaikutusta haketuksen tuottavuuteen. Kuusihakkuutähteen haketuksen tuottavuus on noin 5 prosenttiyksikköä parempi kuin mäntyhakkuutähteen. Kuitenkaan kuivan ja tuoreen hakkuutähteen käyttöpaikkamurskauksessa ei ollut mitään eroja. Vuodenaika vaikuttaa myös hieman haketuksen tuottavuuteen. Talvella tuottavuus on hieman parempi kuin kesällä. /54,58,59/

Hämäläinen /58/ selvitti tutkimuksessaan FutureGiant- ja LT 57 R-hakkurien sekä Lokomo MS 9 -murskaimen tuottavuutta. Molempien hakkurien tuottavuudet olivat jääneet selvästi alhaisemmiksi ruskealla (kuivalla) kuin vihreällä hakkuutähteellä. FutureGiant-hakkurin tehoaikatuottavuus oli ollut 72,8-108 i-m<sup>3</sup>/h, LT 57 R -hakkurin 58,5-81,4 i-m<sup>3</sup>/h ja Lokomo MS 9 -murskaimen 79,4-83,7 i-m<sup>3</sup>/h. Selvin tuottavuuserojen selittäjä oli kourataakan koko. Keskimääräisellä kourataakan kuivamassalla oli pystytty selvittämään yli 75 % tutkimuksessa ilmenneistä tuotantoeroista eri työkoneiden ja materiaalien välillä.

Suoraan hakkurista torven läpi puhallettu hake tuottaa tiiviimmän kuorman kuin esimerkiksi kauhakuormaajalla tai kuljettimella lastattu kuorma. Tulos riippuu kuitenkin hakkurin puhallusvoimasta sekä hakkeen lentokaaresta ja -etäisyydestä /60/. Painuminen on tuntuvaa heti matkan alussa, mutta tasaantuu jo 0-20 km:n kuluttua. Milloin kuorman koon rajoitteena on pikemmin hakkeen tilavuus kuin massa. Lähtötiiviuden merkitys on kuljetustalouden kannalta tärkeämpi kuin lopputiiviuden. Yleensä polttihakkeen tiiviys on 0,37-0,45.

Rannan ym. /61/ tutkimuksessa mekaanisella heittimellä varustettu hihnakuuljetinta käytettäessä saatiin haketta kuormattua eniten, energiassa mitattuna, noin 15 %:a enemmän kuin puhaltavalla heittimellä. Pelkällä hihnakuuljettimella kuormatussa kuormassa oli ollut energiaa noin 10 % enemmän kuin puhaltamalla tehdyissä kuormissa. Kuormaimella kuormatuissa kuormissa päästiin pelkän hihnakuuljetin tasoon.

Korpilahden ja Örnin /62/ selvityksessä oli arvioitu, että suurten autoalustaisten mobiilihakkurien tuotantokustannus voisi olla noin 2,40 €/m<sup>3</sup>, jos kerralla haketettaisiin noin 200 m<sup>3</sup> ja vuosisuorite olisi noin 120 000 m<sup>3</sup>. Välivarastohaketuksen vuosisuoritteeksi samassa selvityksessä arvioitiin 35 000-40 000 m<sup>3</sup>. Tuotantokustannukseksi arvioitiin noin 5 €/m<sup>3</sup>.

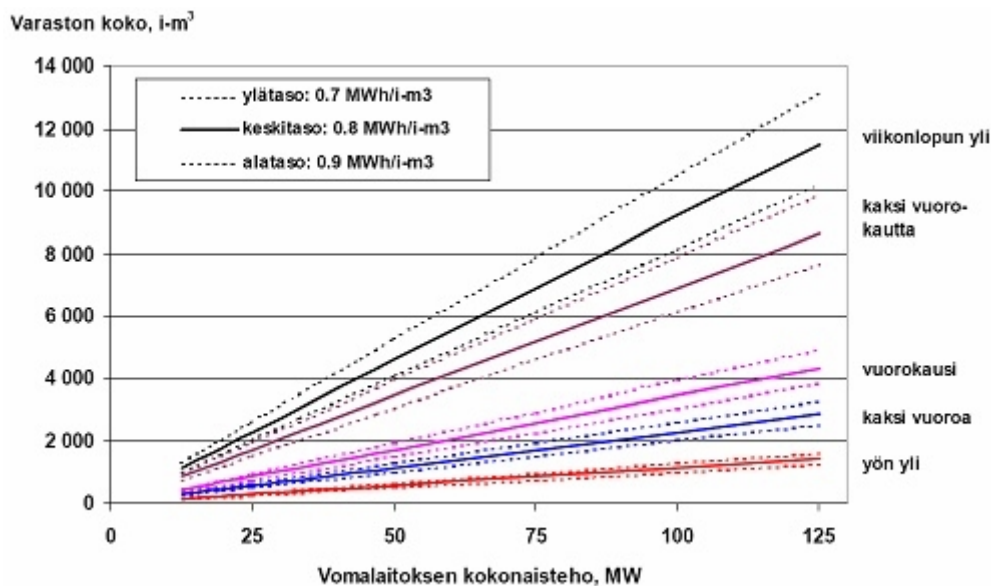
Hämäläisen /58/ selvityksessä vertailtiin haketuksen vaikutuksia metsähakkeen tuotantoketjun kokonaiskustannuksista. Välivarastohaketusketjussa haketuksen osuus ketjun kokonaiskustannuksista oli 23-27 %, kun se keskitetyn haketuksen ketjuissa (irtorisu/hakkuutähdepaali) oli

9-14 %. Asikaisen ym. /54/ selvityksen mukaan haketuksen osuus ketjun kustannuksista oli väli-varastohaketusketjussa 34 % ja käyttöpaikkahaetusketjussa 12 %.

#### 4.2.4 Terminaali-, varastointi- ja organisaatiokustannukset

Terminaalikustannuksiin satama-alueilla kuuluu tavaran käsittelystä ja varastoinnista perittävät kustannukset, jotka ovat satamakohtaisia. Laivaan lastattuun hintaan eli ns. FOB-hintaan (Free On Board) kuuluvat kaikki satamamaksut säilytyksen osalta, mutta ei alusmaksua. Alusmaksu, joka määräytyy aluksen koon mukaan, on useimmiten mukana aluskuljetuksen kokonaishinnassa. Savonrannan Vihtakannan sataman satamamaksu esimerkiksi on 0,6 €/t eli 0,2 €/MWh. (Metsähakkeen tiheys ilman tiivistämistä on  $300 \text{ kg/i-m}^3$  ja energiasisältö  $0,85 \text{ MWh/i-m}^3$ ) /1/.

Hakkuutähteen ja pienpuun talteenoton yksi vaikeimmin hallittavissa olevista tekijöistä on sen kuivaus ja varastointi. Suomen pitkä lämmityskausi edellyttää suurienkin puskurivarastojen ylläpitoa (kuva 34) /63/. Haketun puun pitkäaikainen varastointi voi kuitenkin johtaa huomattaviin kuiva-ainetappioihin ja aiheuttaa jopa terveyshaittoja hakkeen käsittelijöille.



Kuva 34. Välivaraston koon mitoitus voimalaitoksen tehon, polttoaineen (turve, puupolttoaine) riittävyyden ja lämpöarvon mukaan. /63/

Varastointikustannukset voivat muodostua huomattavaksi kustannusosuudeksi, joka usein jätetään huomioimatta metsähakkeen hankinnan kustannuslaskelmissa. Varastointikustannuksiin vaikuttavat sitoutuneen pääoman kustannukset ja energiasisällön muutokset kiintoainetappioiden ja lämpöarvon muutosten johdosta. Pääomakustannuksiin vaikuttavat varastointiaika ja raaka-aineen sen hetkinen arvo (kustannuskertymä). Mitä myöhäisemmässä vaiheessa hankintaketjua

varastointi tapahtuu, sitä suurempi on varastoinnin pääomakustannus aikayksikköä kohden. Varaston perustamisen ja ylläpidon kustannukset sekä hakkuutähdekasojen peittämiseen liittyvät kustannukset on myös sisällytettävä varastointikustannuksiin. Varastointikustannus voi kompensoida polttoaineen laadun parantumisella. Samoin voi syntyä huomattavia korvaavan polttoaineen hankinnasta aiheutuvia lisäkustannuksia, mikäli puupolttoainetta joudutaan puutteellisen toimintavarmuuden vuoksi korvaamaan kalliimmalla polttoaineella, kuten öljyllä. /63/

Varastotilan tarve eri polttoaineilla vaihtelee energiatihedysten (MWh/t tai MWh/i-m<sup>3</sup>) perusteella /46/. Metsähakkeen tilantarve on esimerkiksi 7-kertainen vastaavan energiamäärän sisältävään kivihiilenmäärään. Metsäpolttoaineiden raaka-ainetta varastoidaan käsittelemättömänä irtomateriaalina. Paalaamalla tiiveydeltään 15-20 % irtotähde risutukeiksi, joiden tiiviys on noin 40 %, saadaan raaka-ainevaraston tilantarve ainakin puolitettua.

Hillebrand ja Nurmi /64/ selvittivät eri varastointitekniikoiden vaikutusta kuusivaltaisten uudistusalojen hakkuutähteiden kuivumiseen ja laadun hallintaan. Kuivattaessa hakkuutähteitä palstalla kesäaikana ennen tienvarsivarastokasan tekoa, optimiskuivatusaika oli yhdestä kolmeen viikkoa sääoloista riippuen. Tänä aikana hakkuutähteet kuivuivat 25-30 %:iin. Kuivaneet kasat tulee siirtää mahdollisimman pian välivarastokasaan, jossa säilyvyyttä voidaan parantaa kasojen peittämisellä. Peitetyissä kasoissa kosteus pysyy 10-15 %-yksikköä alhaisempana kuin peittämättömissä. Syksyllä ja talvella hakkuutähteet kannattaa kuitenkin siirtää mahdollisimman pian välivarastoon eikä jättää niitä palstalle. Peittäminen on taloudellisesti kannattavaa, jos peittämisellä saadaan aikaan vähintään 10 %-yksikköä kuivempaa metsähaketta. Peittämisen kustannukseksi on arvioitu noin 0,3 €/MWh /65/.

### **Metsähake**

Hake, erityisesti tuoreena, luo hyvät edellytykset bakteerien ja sienten hajotustoiminnalle. Hakekasan lämpötila voi nousta nopeasti jo ensimmäisen varastointiviikon aikana ja saavuttaa pian 50-70 °C:n lämpötilan. Hajoaminen voi muuttua kemialliseksi, jolloin lämpötila saattaa nousta jopa yli 200 °C:een. Korkea lämpötila merkitsee suuria kuiva-ainetappioita, jotka voivat nousta 10 %:iin kuukaudessa. Hajotustoiminnasta johtuen myös hakkeen kosteus lisääntyy.

Hakkeen pitkäaikainen varastointi ei ole suositeltavaa suurien kosteus- ja kuiva-ainetappioiden vuoksi. Lyhytaikaisessa varastoinnissa (varastointiaika 2 vk) kuiva-ainetappiot ja kosteuden muutokset ovat vähäisiä. Lyhytaikaisessa varastoinnissa auman peittäminen ei ole tarpeellista, mikäli auma on riittävän kookas, yli 500 i-m<sup>3</sup> ja yli 3 metriä korkea. /63/

## Organisaatiokustannus

Tuotanto- ja kuljetusketjun organisaatiokustannus arvioitiin 0,7-0,9 €/MWh riippuen käsiteltävästä irtotavarasta.

### 4.2.5 Lastaus ja purku

Lastauksen ja purun kustannus on laskettu lastaus- ja purkupaikalle, jossa metsähakkeen käsittely tapahtuu materiaalinkäsittelykoneella /1/. Kalusto on oletettu olevan valmiiksi satamissa. Lastauksen kustannus on satama- ja tapauskohtainen.

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| • Koneen hinta (8 h x 170 €/h)  | 1 360 €                       |
| [Traktori tai bobcat lastin tiivistämiseen (8 h x 35 €/h) (15 % hyöty)                          | 280 €                         |
| • Yhteensä lastaus- ja purkukustannukset<br>(suurproomu, n. 2 500 i-m <sup>3</sup> = 2 000 MWh) | 2 720€/proomu<br>(1,36 €/MWh) |

### 4.2.6 Proomukuljetus

Metsähakkeen kuljettamiseen olemassa olevia alus- ja proomutyyppejä hyödyntäen on esitetty seuraavanlainen kustannusrakennelaskelma perustuen aikaisempiin selvityksiin /66,67/. Ajanmenekki ja kustannukset 150 km kaukokuljetusmatkalla:

- |   |                               |
|---|-------------------------------|
| • Ajanmenekki ja kustannus lastaus, kiinteät kustannukset (8 h)         | 410€/proomu<br>(0,21 €/MWh)   |
| • Ajanmenekki ja kustannus vesitiekuljetus meno-paluu (16,7 h)          | 2 849€/proomu<br>(1,42 €/MWh) |
| • Yhteensä kuljetuskustannukset<br>(2 500 i-m <sup>3</sup> = 2 000 MWh) | 3 259€/proomu<br>(1,63 €/MWh) |

Kuljetus täytenä ja tyhjänä keskimäärin 150 km matkalla (18 km/h = yht. 16,7 h). Uusi kalusto voisi muodostua noin 1 000 hevosvoiman työntäjästä ja kahdesta Eurooppa II a tyyppisestä ruumaproomusta. Työntäjän teho voi olla vähän pienempikin, mutta kuitenkin vähintään 600-700 hevosvoimaa. Työntäjän teholla on vaikutus kuljetusnopeuteen sekä mahdollisesta ympärivuotisessa liikennöinnissä yhdistelmän jäissäkulkuun. Eurooppa II a -proomu on mitoiltaan 76,5 met-

riä pitkiä, 11,4 metriä leveitä ja maksimi syväys 3,7 metriä. Proomun tilavuus on 2 500 m<sup>3</sup> ja maksimi syvyyksellä siihen mahtuu 2 540 tonnin kuorma. Hakkeen kuljetuksessa proomuun saadaan kerrallaan sopimaan n. 800 tonnia haketta (kauhakuormaajalla lastaten ja tiivistäen jopa 1 100 tonnia haketta eli n. 3 400 i-m<sup>3</sup>). Maksimikuorman kanssa (1 100 t haketta) proomun syväys olisi noin 2,2 metriä. Tyhjän proomun syväys on vain 70 cm. /66,67/

Noin 1 000 hevosvoiman, eli 735 kW:n työntäjän, joka kuluttaa polttoainetta noin 160 litraa tunnissa, hinnaksi on arvioitu noin 800 000 euroa ja siitä ylöspäin työntäjän varusteista riippuen. Proomujen kappalehinnaksi on arvioitu noin 600 000 euroa. Kalustoa on saatavilla Saksasta ja Venäjältä. /66,67/

Kyseisellä kalustolla on oletettu liikennöitävän vain yhtä proomua kerrallaan työntämällä. Kun toista proomuista ollaan kuljettamassa käyttöpaikalle, on toinen proomuista kuormattavana tai purettavana. Yhdistelmän ajonopeus kuormattuna on 8-10 solmua, eli 15-18,5 km/h. Tyhjänä ajettaessa nopeus on 1-2 solmua enemmän, jolloin nopeus on noin 16,5-22 km/h. Talvella liikennöitäessä yhdistelmän ajonopeus kuormattuna on 5-6 solmua, eli 9-11 km/h. Kaluston kuljetuskapasiteetiksi on arvioitu noin 350 000 m<sup>3</sup> vuodessa avovesikaudella liikennöitäessä. /66,67/

Myös talvella tapahtuva liikennöinti on mahdollista, mutta silloin jäänmurtajan apua tarvittaisiin lähestulkoon aina. Kyseinen kalusto pystyy kyllä liikennöimään itsenäisesti ohuessa jääpeitteessä, mutta yhdistelmän ohjailtavuus on jäissä ajettaessa huono. Yhdistelmä menee kyllä suoraan, mutta se ei enää käänny. /66,67/

Vesiliikenteessä on kaksi miestä kerrallaan vahdissa, eli ohjaamassa alusta. Työajat muodostuvat kuuden tunnin työjaksosta ja kuuden tunnin lepojaksosta, eli vähintään neljä miestä on kerralla aluksella töissä sekä heidän lisäksi kokki. Työtä tehdään yleensä kaksi viikkoa yhtäjaksoisesti aluksella, jonka jälkeen on viikon vapaajakso kesäisin, talvella vapaajakso on kaksi viikkoa. /66,67/

Laskelmassa oletetaan, että on käytettävissä kaksi proomua, joista toisen voi jättää purettavaksi tai kuormattavaksi. Tällöin lastauksesta tai purkamisesta aiheutuvat aluskuljetusta koskevat kiinteät kustannukset lasketaan vain yhden kerran.

Proomukuljetuksen tuntikustannuksiksi on saatu edellä esiteltyä kalustoa käyttäen 170,57 €/h. Kiinteät kustannukset ovat esimerkin mukaan 51,25 €/h. Aluskuljetuskustannus esimerkkilas-

kelman perusteella olisi kuljetuksen osalta 3 259 € ja lastauksen ja purun osalta 2 720 € eli yht. 5 979 € (150 km). Esitettyä kustannusrakennelaskelmaa ei ole päivitetty. Aluskuljetuksen yksikkökustannus oli vuonna 2005 keskimäärin 6,03 €/m<sup>3</sup> (2004: 6,21 €/m<sup>3</sup>) keskilähtömatkan ollessa 212 km (2004: 223 km) /7,9/. Kuljetussuoritteena aluskuljetuskustannus oli 2,8 c/m<sup>3</sup>/km, joten 150 km metsähakkeen kuljetuskustannus Eurooppa II -mallin proomulla olisi n. 10 500 € (yht. 2 500 k-m<sup>3</sup>). Metsähakkeen vastaava yksikkökustannus olisi siten 5,25 €/MWh (yht. 2 500 i-m<sup>3</sup> = 1 000 k-m<sup>3</sup> = 2 000 MWh). Aluskuljetuskustannus pitää sisällään lastauksen, mutta ei purun kustannuksia. Kustannusrakenteen pohjalta laskettuihin kustannusten ja todellisten kustannusten välisiä eroja selittää kilpailutilanne, alusrakenne ja mahdolliset piilokustannukset. Raakapuun kuljetuskustannusten johtaminen suoraan metsähakkeen yksikkökuljetuskustannuksiksi ei ole täysin vertailukelpoinen.

#### 4.2.7 Yhteenveto kustannuksista

Kustannusten muodostuminen eri polttoainelajeille metsästä proomuun lastattuna, eli FOB – hinta (taulukko 4). Keskimääräisen irtotavaran alkukuljetusmatkan on oletettu olevan 20 km (2/3 todellisesta hankintaetäisyydestä).

*Taulukko 4. Kustannusten muodostuminen metsähakkeelle ja murskeelle proomuun lastattuna. Hakkuutähteen osalta terminaalihaketus- vs. välivarastohaketusjärjestelmä. Kanto ja pienpuu terminaalihaketusjärjestelmän mukaisin kustannuksin. (Haketuksen Kemera-tukea ei ole otettu huomioon yht. 2,18 €/MWh).*

[€/MWh]	Hakkuutähteen terminaali	Hakkuutähteen välivarasto	Pienpuu	Kanto
<b>Tienvarsihint</b>	3,5	3,5	4,4	5,7
<b>Kuljetus*</b>	3,2	2	3	3
<b>Haketus/murskaus</b>	2,41	3,58	2,41	3,8
<b>Lastaus</b>	0,68	0,68	0,68	0,68
<b>Satamamaksut</b>	0,2	0,1	0,2	0,2
<b>Organisointi</b>	0,7	0,8	0,9	0,8
<b>Yhteensä FOB</b>	<b>10,7</b>	<b>10,7</b>	<b>11,6</b>	<b>14,2</b>

\* Keskimääräinen kuljetusmatka 20 km

FOB -hintarakenteen päälle tulee vielä laivakuljetuksen kustannus, purku ja mahdollinen kuljetuskustannus voimalaitoksen polttoainevastaanottoon (taulukko 5). Lastauspaikaksi kannattaa valita sellainen, jossa metsäpolttoaineen kuljetusmatka on mahdollisimman lyhyt, sillä irtotava-

rana kuljetettuna alkukuljetuskustannuksen osuus metsähakkeen kokonaiskustannuksista on merkittävä ja käytännössä ainoa, johon lastauspaikan valinnalla on merkitystä (mahdollisten satamamaksujen ohella). Saatavuuteen vaikuttaa hakkuutähteiden ja kantojen osalta alueen kuusi-valtaisten päätehakkuiden määrä sekä pienpuun osalta nuorten kasvatusmetsien teknistaloudellinen potentiaali.

*Taulukko 5. Käyttöpaikkakustannusten muodostuminen vesitiekuljetuksen sisältämälle hankintaketjulle metsätähdehakkeen osalta. Vertailuna kustannusrakenteen mukainen tarkastelu ja raakapuun todellisista keskimääräisistä aluskustannuksista johdetut kustannukset.*

[€/MWh]	Metsähake terminaali, kustannusrakenteen aluskustannukset	Metsähake terminaali, keskimääräiset aluskustannukset
<b>FOB -hinta</b>	10,7	10,7
<b>Proomukustannus</b>	1,63	$(5,25 - 0,68) = 4,57$
<b>Purku</b>	0,68	0,68
<b>Yhteensä käyttöpaikkahinta</b>	<b>13,01</b>	<b>15,95</b>

#### 4.2.8 Metsäpolttoaineiden rajakuljetusetäisyys

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. Tietyn hankintaetäisyyden ja kustannusrajan ylittyttyä on kannattavampaa hankkia nuorten metsien pienpuuta tai kantoja lähempää voimalaitosta sen sijaan, että hakkuutähteiden hankinta-aluetta laajennettaisiin. Vesitiekuljetuksen avulla voitaisiin mahdollisesti kasvattaa kustannustehokkaasti hankintaetäisyyksiä kauempaa tuotaville metsäpolttoaineille. Metsäpolttoaineen käyttöpaikkahinnan tulee kuitenkin olla kilpailukykyinen vaihtoehtoisten polttoaineiden suhteen.

Rajakuljetusetäisyys tarkoittaa metsäpolttoaineiden hankinnassa kannattavuuden rajoissa olevaa maksimietäisyyttä käyttöpaikalle, kun käyttöpaikkahinta on vakio ja käytetään tiettyä hankintalogistiikkajärjestelmää (taulukko 6). Keskimääräisen irtotavaran alkukuljetusmatkan on oletettu olevan terminaalihaketusjärjestelmässä 20 km. Keskimääräinen hankintaetäisyys on n. 2/3 maksimietäisyydestä. Käyttöpaikkahintana on käytetty vuoden 2006 keskimääräistä hintaa metsähakkeelle  $12,8 \text{ euroa/MWh}$  (Joulukuu 2006 =  $13,6 \text{ euroa/MWh}$ ) /68/.

Taulukko 6. Rajakuljetusetäisyyden muodostuminen metsähakkeelle käyttöpaikkahintatason ollessa vakio (12,8 euroa/MWh). Hakkuutähteen osalta terminaalihaketus-, välivarasto ja käyttöpaikkahaketusjärjestelmän vertailu. Pienpuun osalta välivarastohaketusjärjestelmä.

[€/MWh]	Hakkuutähte terminaali	Hakkuutähte välivarasto	Hakkuutähte käyttöpaikka	Pienpuu välivarasto
<b>Tienvarsihint</b>	3,5	3,5	3,5	4,4
<b>Kuljetus irtotavara</b>	3,2	-	<b>80 km**</b>	-
<b>Haketus/murskaus</b>	2,41	3,58	2,41	3,31
<b>Kuljetus metsähake*</b>	<b>75 km</b>	<b>125 km</b>	-	<b>90 km</b>
<b>Terminaalimaksut</b>	0,2	-	-	-
<b>Organisointi</b>	0,7	0,8	0,8	0,9
<b>Käyttöpaikkahinta</b>	12,8	12,8	12,8	12,8

\* Keskimääräinen rajakuljetusetäisyys kaukokuljetuksille maanteitse käyttöpaikkahintatason ollessa vuoden 2006 keskimääräinen hinta metsähakkeelle 12,8 euroa/MWh /68/.

\*\* Keskimääräinen rajakuljetusetäisyys suoraan irtotavarana toimitetulle käyttöpaikkahaketuksen perustuvalla hankintaketjulle.

## 5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Vesitiekuljetuksen sisältämä metsäpolttoaineen hankintaketju on mahdollista toteuttaa usealla eri tavalla riippuen kuljetetaanko vesiteitse valmiiksi hakettua metsähaketta tai hakettamatonta irtotavaraa. Metsäpolttoaineen vesitiekuljetuksen sisältämä hankintaketju voidaan toteuttaa palsta-, välivarasto-, terminaali-, tai käyttöpaikkahaketusjärjestelmän mukaisesti. Terminaalihaketusjärjestelmä soveltuisi vesitiekuljetuksen sisältämään hankintalogistiikkaan siten, että haketus tapahtuisi lastauspaikalla mobiilihakkurilla tai -murskaimella. Terminaalihaketusjärjestelmä ennen varsinaista proomukalustolla suoritettavaa kaukokuljetusta mahdollistaisi hakkurin ja kuljetuskaluston kustannustehokkaan käytön ja mahdollistaisi eri metsäpolttoaine-erien keskitetyn terminaalivastaanoton ja -varastoinnin lastauspaikalla.

Metsäpolttoaineen proomukuljetuksissa lastin kokoa rajoittaa lastiruuman tilavuus. Kuljetuskustannusten minimoimiseksi tulisi metsäpolttoainelastia pyrkiä tiivistämään tai kuormakokoa kasvattamaan. Lastin tiivistymisellä on arvioitu saatavan lisättyä metsähakekuormaa n. 15 % /1/. Tiivistäminen voitaisiin toteuttaa ajamalla pienellä koneella proomussa hakekasan päällä. Kuormakoon kasvattaminen olisi mahdollista asentamalla erillisiä nostettavia laitoja tai verkkoja proomuissa oleviin sivutolppiin. Näin voitaisiin päästä olemassa olevalla kalustolla ainakin samoihin kehys-tilavuuksiin kuin raakapuun kuljetuksissa. Proomujen vakavuuteen tulisi kiinnittää kuitenkin erityistä huomiota.



Metsähaketta voitaisiin kuljettaa parhaiten pohjaproomuilla. Metsähakekuljetuksiin soveltuvatkin tilavuutensa vuoksi suurimmat Saimaalla liikennöivät proomukalustot (Eurooppa II a-malli). Suurimpien proomujen vetoisuus metsähakkeelle olisi luokkaa 2500 i-m<sup>3</sup> ja modifioimalla proomuja voitaisiin päästä yli 3500 i-m<sup>3</sup>. Metsähakkeen kustannustehokkaaseen kuljetukseen soveltuvan proomukaluston vetoisuuden tulisi olla aikaisempien selvitysten mukaan yli 5000 i- m<sup>3</sup> ja kuljetusten pitäisi olla ympärivuotisia /22/. Tällaisiin määriin päästäisiin vain kuljettamalla kahta proomua yhtä aikaa tai kehittämällä kevyelle bulkkivaralle sopivampaa uudentyyppistä proomukalustoa. Kuljetuskaluston modifiointi ja tiivistäminen saattavat parantaa hakkeen kuljetusedellytyksiä huomattavasti. Ympärivuotiset kuljetukset olisivat mahdollisia syväväyläverkostossa tapahtuvien kuljetusten välillä.

Metsäpolttoaineen alhaisen tiiviyyden ja energiatihedyn vuoksi on riittävän suuri lastikoko ratkaisevaa aluskuljetusten taloudellisuuden kannalta. Suurimman Saimaalla operoivan kokoluokan proomuja ei kuitenkaan ole rajoittamattomasti saatavissa kyseiseen käyttöön ja aluskuljetuksen hinta voi olla esteenä metsäpolttoaineen aluskuljetusten alkamiselle. Meno-paluu kuljetuksien käyttömahdollisuus osana raakapuun kuljetuksia voisi täydentää ja mahdollistaa metsäpolttoaineiden kustannustehokkaat vesitiekuljetukset.

Metsäpolttoaineen kuljettaminen ja väliaikainen varastointi irtotähteenä lastauspaikalla vaatii suuren varastointikentän. Lastauspaikalla varastoitaessa 2500 i-m<sup>3</sup> (Eurooppa II a-malli) vastaava hakemäärä vie irtotähteenä tilaa vähintään n. 1000 m<sup>2</sup>. Haketettuna on tilantarve noin puolet irtotähdettä pienempi, n. 500 m<sup>2</sup>. Proomukuljetusta edeltävä maantiekuljetus irtotähteenä vaatii lastauspaikalle kuljetettuna n. 35 täysperävaunukuormaa.

Haketettaessa lastauspaikalla, tulee varastointikentän koon lisäksi ottaa huomioon hakettamisesta aiheutuva melu, joka voi rajoittaa lähellä asutusta sijaitsevien lastauspaikkojen käyttöä. Hakkeen pitkäaikaista varastointia tulee välttää hakkeen laadun heikentymisen vuoksi, joten haketus on järkevintä ajoittaa loppumaan vasta aluksen saapumista edeltäville päiville.

Lastaus ja purku voidaan suorittaa lastaus- ja purkupaikasta, aluksesta ja kuljetettavasta materiaalista riippuen materiaalinkäsittelykoneella, kauhakuormaajalla, kurottajalla tai aluksen omalla lastausjärjestelmällä. Metsähakkeen lastaukseen ja purkuun voitaisiin mahdollisesti soveltaa myös pneumaattista järjestelmää, joita on saatavilla useissa kokoluokissa. Menetelmän soveltavuutta metsähakkeelle ja -murskeelle pitäisi kuitenkin tutkia.

Metsätähdehakkeen hinta terminaalihaketusjärjestelmän ja vesitiekuljetuksen sisältämälle hankintaketjulle muodostuu seuraavista kustannustekijöistä: tienvarsihintaa irtoainekselle (27 %), autokuljetus lastauspaikalle (20 km) (24,5%), haketus (18,5%), lastaus, vesitiekuljetus (150 km) ja purku (23%), satama- ja organisointikulut (7%). Hankintaketjun kustannukseksi hakkuutähdehakkeelle muodostui tämän selvityksen mukaan 13,01 €/MWh. Kantomurskeen vertailukustannukseksi muodostui 16,51 €/MWh ja pienpuusta tehdylle hakkeelle 13,91 €/MWh.

Kantojen ja pienpuun tienvarsihintaa on hakkuutähdettä korkeampi, mutta maantiekuljetuskustannukset hieman pienemmät. Aluskuljetuksen hinta riippuu käytettävästä kalustosta ja kuljetusmatkan pituudesta. Tässä selvityksessä aluskuljetuksen kustannus johdettiin aikaisempien selvitysten alusten kustannusrakenteesta ja kuljetusetäisyytenä käytettiin 150 km. Aluskustannuksen hinnaksi muodostui 1,63 €/MWh ja lastaus ja purkukustannukseksi 1,36 €/MWh. Vesitiekuljetuksen kustannus lastauksineen ja purkuineen oli yhteensä 2,99 €/MWh. Vesitiekuljetuksen sisältämä terminaalihaketusjärjestelmän mukainen hankintaketju olisi kilpailukykyinen verrattuna välivarastohaketusketjuun, kun kuljetusetäisyys voimalaitokselle olisi suurempi kuin 130 km. Hankintaympyrän kasvattaminen johtaa siihen, että eri voimalaitosten hankintasäteet menevät osittain päällekkäin. Myös organisointikulut saattavat kasvaa suhteessa enemmän hankintasäteen kasvaessa. Tällöin metsäpolttoaineiden kustannustehokasta hankintaa täytyy ulottaa uusille alueille tai eri polttoaine-erien hankintamenetelmien kustannustehokkuutta on parannettava (pienpuu, kannot), jotta polttoaineen saatavuus voidaan turvata.

Keskimääräinen aluskuljetuskustannus raakapuulle oli vuonna 2005 6,03 €/m<sup>3</sup>, keskikuljetusmatkan ollessa 212 km /6/. Raakapuun aluskustannuksista johdettu metsähakkeen vastaava yksikkökustannus 150 km kaukokuljetusmatkalla olisi 4,57 €/MWh (ilman lastaus- ja purkukustannusta). Tällöin vesitiekuljetuksen sisältämän hakkuutähteistä tuotetun metsähakkeen kuljetusketjun kustannukset olisivat yht. 15,95 €/MWh. Kustannusrakenteen pohjalta laskettuihin kustannusten ja todellisten kustannusten välisiä eroja selittää kilpailutilanne, alusrakenne sekä mahdolliset piilokustannukset. Raakapuun kuljetuskustannusten johtaminen suoraan metsähakkeen yksikkökuljetuskustannuksiksi ei ole myöskään täysin vertailukelpoinen. Vesitiekuljetukseen saattaa kuitenkin sisältyä metsäpolttoaineen ylimääräistä käsittelyä lastaus- tai määräsatamassa sekä loppukuljetuksena voimalaitokselle. Tällaiset ylimääräiset käsittelyt saattavat tehdä vesitiekuljetuksen kannattamattomaksi verrattuna muihin metsäpolttoaineiden toimitusketjuihin. Sen tähden toimintoja tulee tutkia, suunnitella ja testata hyvin ennen mahdollisia investointeja ja käyttöönottoa.

Vesitiekuljetuksen mahdollisuuksia osana metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmää voidaan pitää lupaavina, sillä kuljetusetäisyydet tulevat väistämättä kasvamaan käyttömäärien kasvaessa ja hankinta-alueiden laajentumisen seurauksena. Teknisten ja liiketaloudellisten ongelmien ratkaiseminen mahdollistaneekin aluskuljetusten käyttöönottamisen osana metsäpolttoaineiden suurimittakaavaista hankintalogistiikkaa.

## LÄHDELUETTELO

- /1/ Jäppinen, E., Heinimö, J., Orava, H. & Mäkelä, L. 2006. Metsäpolttoaineen saatavuus, tuotanto ja laivakuljetusmahdollisuudet Saimaan alueella. Mikkelin Ammattikorkeakoulu, Tutkimuksia ja raportteja 11.
- /2/ Maa- ja metsätalousministeriö. 2006. Metsäsektorin tulevaisuuskatsaus – Metsäneuvoston linjaukset metsäsektorin painopisteiksi ja tavoitteiksi. Saatavissa: [http://wwwb.mmm.fi/metso/ASIAKIRJAT/Metsaneuvoston\\_tulevaisuuskatsaus](http://wwwb.mmm.fi/metso/ASIAKIRJAT/Metsaneuvoston_tulevaisuuskatsaus)
- /3/ Asplund, D., Korppi-Tommola, J. & Helynen, S. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. Saatavissa: [http://ktm.elinar.fi/ktm\\_jur/](http://ktm.elinar.fi/ktm_jur/)
- /4/ Eurooppalainen liikennepolitiikka vuoteen 2010: valintojen aika. KOM (2001) 370. Syyskuu 2001.
- /5/ Metsätilastollinen vuosikirja 2005. Metsäntutkimuslaitos.
- /6/ Metsätilastollinen vuosikirja 2006. Metsäntutkimuslaitos. 438 s.
- /7/ Kariniemi, A. 2006. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2005. Metsätehon katsaus nro 19. Saatavissa: [http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus\\_19.pdf](http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_19.pdf)
- /8/ Kuva 1. Suomen metsätase (puuston kasvu ja poistuma) 1960-2005. Saatavissa: <http://www.forestindustries.fi/tilastot/tilastot.html?pic=mtase>
- /9/ Väkevä, J. & Örn, J. 2005. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2004. Metsätehon katsaus nro 12 4/2005. Saatavissa: <http://www.metsateho.fi/uploads/3lwv87kxre68i59.pdf>
- /10/ Piironen, Seppo. 2006. Merenkululaitos, Järvi-Suomen väyläyksikkö. Henkilökohtaiset tiedonannot: Sähköpostikeskustelu.24. ja 25.8.2006 sekä puhelinkeskustelut 21.8. ja 19.9.2006.
- /11/ Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa 2005. 2006. Esa Ylitalo (toim.). Metsätilastotiedote 820. 8 s.
- /12/ Asikainen, A. 2007. Biomassan hankinnan haasteet. Kariniemi, A (toim.). Kehittyvä puu-huolto 2007 –seminarijulkaisu. Metsäteho Oy.
- /13/ Ranta, T. & Rinne S. 2004. Transportation options and profitability for logging residues in Finland. Conference article. Presented at 2<sup>nd</sup> World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection Rome, Italy 10-14 May 2004.
- /14/ Tiihonen, I., Rinne S. & Kaipainen, H. Hakkuutähteen autokuljetuksen kehittäminen tiivistävällä kuormatilaratkaisulla – PUUT40. VTT Prosessit.
- /15/ Kuva 4. 2007. Perävaunun liukuva sisälava mahdollistaa suuremman kuljetuskertymän ja helpottaa lastausta ja purkua. Antti Ala-Fossi.
- /16/ Halonen, P. & Vesisenaho, A. 2002. Hakeautoseuranta. VTT Prosessit.

- /17/ Kuva 5. Vuoksen vesistöalue kattaa lähes koko Itä-Suomen. Saatavissa: <http://gamma.nic.fi/~venev/saimaasuomi.htm>
- /18/ Kuvat 6, 8 ja 9. Saatavissa: [http://www.uittokalusto.fi/perkaus\\_tilastot.php](http://www.uittokalusto.fi/perkaus_tilastot.php)
- /19/ Metsäteho Oy. 2004. Puun laadun säilyttäminen. Opasmateriaali. Viitattu 1.9.2006. Saatavissa: [www.metsateho.fi/uploads/xhpl9fvkqx.pdf](http://www.metsateho.fi/uploads/xhpl9fvkqx.pdf)
- /20/ Kuva 10. Mopro Oy:n työntäjä Arppe ja Eurooppa II a-mallin proomu Rissanen. Saatavissa: [www.mopro.fi](http://www.mopro.fi)
- /21/ Tyrsky, Olavi. 2006. Mopro Oy. Henkilökohtainen tiedonanto: puhelimitse 18.9.2006.
- /22/ Rautala, A ja Pulkkanen, A. 2006. Metsähakkeen kuljetuslogistiikan kehittäminen sisävesillä osana EU:n pohjoista ulottuvuutta. Saatavissa: <http://www.kouvolaregion.fi/files/download/Vesitieselvitys-Raportti18.01.2006.pdf>
- /23/ Proomukalustotoimikunnan mietintö. 1978. Komitean mietintö 1978:25. Helsinki.
- /24/ Lepikko, Pekka. 2006. UPM-Kymmene, Metsä. Henkilökohtainen tiedonanto: sähköpostikeskustelu 11.9.2006.
- /25/ Alakangas, E., Kanervirta, M-L. & Kallio, M. 1987. Kotimaisten polttoaineiden ominaisuudet. Käsikirja. Espoo. VTT tiedotteita 762. 125 s.
- /26/ Alakangas, E (toim.). 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. 172 s. + liitt. 17 s.
- /27/ Nurmi, J. 1999. Hakkuutähteen ominaisuuksista. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 722. Kannuksen tutkimusasema. 32.s.
- /28/ Hakkila, P., Nurmi, J. & Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähte energialähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684. 68 s.
- /29/ Hakkila, P (toim.). 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia. Loppuraportti. Tekes. 135 s.
- /30/ Kuva 15. Kuorma-auton alustalle asennettu Giant -rumpuhakkuri hakettamassa suoraan autoon. Tapio Ranta.
- /31/ Kuva 16. Metsäpolttoaineen kuljetusvaihtoehdot metsästä lastauspaikalle ja proomuun. Eero Jäppinen ja Kalle Karttunen. Alkuperäinen kuva /1/.
- /32/ Hakkila, P. (toim). 1992. Metsäenergia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. 51 s.
- /33/ Alakangas, E., Sauranen, T. & Vesisenaho, T. 1999. Hakkuutähteestä polttohakkeeksi. Koulutusmateriaali. Jyväskylä, VTT Energia. 82 s.
- /34/ Heikkilä, J., Laitila, J., Tanttu, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K. T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp010.htm>

- /35/ Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K. & Nuutinen, Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm>
- /36/ Heikkilä, J & Sirén, M. 2006. Energiapuuharvennus kannattaa osassa nuoria kasvatusmetsiä. Työtehoseuran metsätiedote 695. 4 s.
- /37/ Kuva 21. Kantojen nostoa. Antti Ala-Fossi 2006.
- /38/ Kuva 22. Kantoja tien varressa odottamassa kuljetusta. Eero Jäppinen 2006.
- /39/ Kuva 23. Vesitiekuljetus osana metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmää. Eija Alakangas (VTT) ja Kalle Karttunen (LTY) 2007.
- /40/ Tommi Lahti, (LHM Hakkuri) henkilökohtaiset tiedonannot v. 2004-2005.
- /41/ Kuva 24. Metsäpolttoaineen varastointi irtotähteenä vie noin kaksinkertaisen tilan verrattuna hakkeena varastointiin. . Eero Jäppinen ja Kalle Karttunen. Alkuperäinen kuva /1/.
- /42/ Purhonen, I. 2004. Metsähakkeen kuljetuslogistiikan kehittäminen sisävesillä –projekti. Selvitys: Vuoksen ja kymijoen vesistöalueiden lastauspaikat metsähakkeen vesitiekuljetuksille. Järvi-Suomen Uittoyhdistys.
- /43/ Auvo Muraja, henkilökohtaiset tiedonannot v. 2004-2005.
- /44/ Kuva 28. Kivihiilen purkua proomussa mukana kulkevalla kaivinkoneella Akonniemen satamassa. Eero Jäppinen 2006.
- /45/ Kuva 29. Telojen päällä liikkuva materiaalinkäsittelykone, nostokyky 6 tn, ulottuvuus 22 m ja kokonaispaino 60 t. [www.mantsinen.com](http://www.mantsinen.com).
- /46/ Dry Cargo International, May 2003, s.67-70
- /47/ Kuva 30. Pneumaattinen kiinteä purkulaitteisto (vasen). Pneumaattinen purku mobiililaitteella (oikea). [www.vigan.com](http://www.vigan.com).
- /48/ Kuva 31. Kiinteä, kiskoilla liikkuva satamanosturi (vasen) ja kahmarikauha (oikea). Hanne Orava 2006.
- /49/ Kemeraopas. 2005. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja Metsäkeskus Pirkanmaa 2002-2004. 5.10.2005. 50 s.
- /50/ Karttunen, K. 2006. Nuoren metsän hoito (bioenergia) hiilipolitiikan kohteena. s. 40-45. Teoksessa: 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>
- /51/ Rieppo, K. 2003. Työsuorituksen määrittäminen hakkuutähteen metsäkuljetuksessa. Teoksessa puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. s. 77-81.

- /52/ Korpilahti, A. 2001. Käyttöpäikällä haketukseen perustuva puupolttoaineiden tuotanto. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. VTT Symposium 216. s. 137–152.
- /53/ Rieppo, K. 2002. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen ajanmenekki, tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 136. 47 s.
- /54/ Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan tiedonantoja 131. 108 s.
- /55/ Rinne, S. 2005. Puupolttoaineen hankintamenetelmien kustannustarkastelu. VTT Prosessit.
- /56/ Paananen, S & Rinne, S. 2001. Hakkuutähteen käyttöpäikkamurskaukseen perustuva tuotantomenetelmä. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001. VTT Symposium 216. s.159-164.
- /57/ Asikainen, A., Vesisenaho, A. & Ranta, T. 2000. Metsähakkeen autokuljetuksen tuottavuus ja kuljetuslogistiikan ja terminaalivaiheiden tehostaminen. VTT Energian raportteja 21/2000.
- /58/ Hämäläinen, J. 2000. Hakkuutähteen varastoinnin kustannusvaikutukset metsähakkeen suurimittakaavaisessa tuotannossa. Joensuu yliopisto. Metsätieteellinen tiedekunta. Metsäteknologian ja puutalouden pro gradu. 43 s. + liite 1.
- /59/ Oijala, T., Saksa, t. & Sauranen, T. 1999. Hakkuutähteen korjuumenetelmien vertailu ja vaikutus metsänuudistamiseen. Bioenergian tutkimusohjelma. Jyväskylän teknologiakeskus Oy. 84 s.
- /60/ Hakkila, P. 2000. Metsähakkeen energiatiheys. Puuenergia 1/2000. s. 24-25.
- /61/ Ranta, T., Asikainen, A., Lehikoinen, M., Väätäinen, K., Halonen, P. & Frilander, P. 2002. Metsähakkeen autokuljetuksen logistiikka. VTT Prosessit, Energian tuotanto. 31 s.
- /62/ Korpilahti, A. & Örn, J. 2002. Energiapuun hankinta nuorista metsistä. Metsätehon raportti 141. 34 s.
- /63/ Ranta, T. 2003. Puupolttoaineen varmuus- ja puskurivarastointi. Projektiraportti VTT Prosessit.
- /64/ Hillebrand, K. & Nurmi, J. Puupolttoaineiden laadunhallinta - PUUT09 In: VTT Symposium 205. Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2000. Puuenergian teknologiaohjelma vuosiseminaari. Jyväskylä, 29. - 30.8.2000. Alakangas, E. (toim.). VTT Energia. Espoo (2000), 205 – 216.
- /65/ Impola, R. 2002. Metsähakkeen laatukartoitus. VTT Prosessit, Energian tuotanto. PRO21/T6505/02. 42 s.
- /66/ Sikanen, W. 2005. Kymijoen vesistöalueen vesitiekuljetusten kehittämismahdollisuudet. Opinnäyte. Mikkelin ammattikorkeakoulu.

- /67/ Lallukka, H. 2006. Metsähakkeen vesitiekuljetuksen kannattavuus. Järvi-Suomen Uittoyhdistyksen selvitys. Saatavissa: <http://www.kouvolaregion.fi/files/download/Vesitieselvitys-Metsahakkeenproomukuljetus selvitys160505.pdf>
- /68/ Bioenergia- lehti. 2007. Polttoaineiden hintataso, s. 48. Nro 1/2007.
- /69/ Energiatilastot. 1998. Suomen virallinen tilasto XLII. Helsinki, kauppa- ja teollisuusministeriö. 126 s.
- /70/ Hakkila, P. 2006. Selvitys energiapuun mittauksen järjestämisestä ja kehittämisestä. Maa- ja metsätalousministeriön työryhmämuistio 2006:8. Saatavissa: [http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiot/2006/trm2006\\_8.pdf](http://wwwb.mmm.fi/julkaisut/tyoryhmuistiot/2006/trm2006_8.pdf)



**Alusyrittäjien  
yhteystietoja:**

**Mopro Oy**

Olavi Tyrsky  
015 – 532 122  
mopro@mopro.fi  
www.mopro.fi  
Savonlinna

**Pielis-Laivat Oy**

Kari Ryttyläinen  
0400 142 819  
info@pielis-laivat.fi  
Nurmes

**Saarisavotta Oy**

Arto Pekkinen  
050 593 2308  
arto.pekkinen@dnainternet.net  
Kerimäki

**UPM-Kymmene Oyj Metsä**

Pekka Lepikko  
02041 64704  
pekka.lepikko@upm-kymmene.com  
Valkeakoski

**Vesitiekuljetus Korhola Oy**

Erkki Korhola  
0500 596 545  
Joutseno

**Lempiäinen V&J Metsäurakointi**

Väinö Lempiäinen  
0500 155 036  
Puumala

**Tapani Kankkunen**

0400 341 426  
Rantasalmi

**Järvikuljetus M Papunen Oy**

Matti Papunen  
0500 157 181  
Savonlinna

**Vesistöurakointi Säynävä Ay**

0400 307 224  
Lappeenranta  
(kalusto on olemassa, mutta tällä hetkellä ei vakituista liikennettä)

**Potentiaalisia metsähakkeen käyttäjiä Vuoksen vesistöalueen läheisyydessä:**

**Etelä-Savon Energia Oy**

- Pursialan lämpövoimalaitos (laitos rannassa)

**Fortum Espoo Oyj**

- Joensuun voimalaitos

**Juankosken Biolämpö Oy**

- Juankosken biolämpökeskus

**Järvi-Suomen Voima Oy**

- Savonlinnan voimalaitos (laitos rannassa)
- Ristiinan lämpökeskus (laitos rannassa)

**Kuopion Energia Oy**

- Haapaniemen voimalaitos (laitos rannassa)

**Lapinlahden Ekolämpö Oy**

- Lapinlahden biolämpökeskus

**Lieksan Lämpö Oy**

- Lieksan lämpökeskus

**Powerflute Ltd**

- Kuopion tehdas (entinen Savon Sellu)

**Punkavoima Oy**

- Punkaharjun kattilalaitos

**Savon Voima Oy**

- Iisalmen voimalaitos
- Pieksämäen voimalaitos

**Stora-Enso Oyj**

- Imatran tehtaot
- Varkauden tehtaot
- Uimaharjun tehtaot

**UPM-Kymmene Oyj**

- Kaukaan tehtaot
- Kymin tehtaot (Kymin Voima Oy)
- Joensuun vaneritehdas

**Vapo Oy**

- Kevätniemen voimalaitos (laitos rannassa)
- Muut pienemmät lämpölaitokset

## **Varkauden aluelämpö Oy**

- Lämpökeskukset

## **Suunnitelmissa:**

### **Lappeenrannan Energia Oy**

- Mertaniemen voimalaitoksen muutostyöt bioenergian käyttöön LRE suunnittelee yhdessä UPM:n kanssa Kaukaalle investoitavaa voimalaitosta, joka tuottaisi myös Lappeenrannan kaukolämmön

### **Oy Metsä-Botnia Ab**

- Joutsenon tehtaan viereen pelletöinti ja kaasutuslaitos

### **Kuopion Energia Oy**

- Haapaniemen voimalaitoksen investointi

### **Stora Enso Oyj.**

- Kiteen sahan yhteyteen lämpövoimalaitos

**Tyypillisiä polttoaineiden tehollisia lämpöarvoja ja tiheyksiä /69/.**

Polttoaine	Mittayksikkö	GJ	MWh	toe	t/m <sup>3</sup> (tai t/i-m <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup>	36,00	10,00	0,860	0,732
Mustalipeä	t <sub>ka</sub>	11,70	3,250	0,279	1,415
Koivupilke (halko)	p-m <sup>3</sup>	5,40	1,50	0,129	0,400
Sekapilke (halko)	p-m <sup>3</sup>	4,51	1,25	0,107	0,350
<b>Polttohake</b>	<b>i-m<sup>3</sup></b>	<b>2,88</b>	<b>0,80</b>	<b>0,069</b>	<b>0,300</b>
Sahanpuru	i-m <sup>3</sup>	2,16	0,60	0,052	0,300
Kutterin lastu	i-m <sup>3</sup>	1,80	0,50	0,043	0,100
Havupuun kuori	i-m <sup>3</sup>	2,16	0,60	0,052	0,300
Koivun kuori	i-m <sup>3</sup>	2,52	0,70	0,060	0,350
Puupelletit	tonni	16,92	4,70	0,404	0,690
Palaturve	i-m <sup>3</sup>	5,04	1,40	0,120	0,380
Jyrsinturve	i-m <sup>3</sup>	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

Tiiviykskertoimina alustavissa aluslaskelmissa käytetty seuraavia arvoja /60,70/:

	m <sup>3</sup> /i-m <sup>3</sup>
Kehys-m <sup>3</sup>	1
Tukkipuu	0,8
Kuitupuu	0,7
Metsähake	0,4
Risutukki	0,35
Pienpuu	0,3
Kannot	0,3
Hakkuutähde	0,2