



Juha Laitila, Arvo Leinonen, Martti Flyktman, Matti Virkkunen  
& Antti Asikainen

## Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet



# **Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet**

Juha Laitila, Arvo Leinonen, Martti Flyktman, Matti Virkkunen &  
Antti Asikainen



ISBN 978-951-38-7677-7 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 978-951-38-7678-4 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2010

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT

puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT

tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4374

Juha Laitila, Arvo Leinonen, Martti Flyktman, Matti Virkkunen & Antti Asikainen. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. Espoo 2010. VTT Tiedotteita – Research Notes 2564. 143 s.

**Avainsanat** forest chips, young forests, stumps, logging residues, wood energy

## Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli luoda katsaus metsähakkeen käyttö- ja korjuumahdollisuuksiin vuonna 2020 ja selvittää asiantuntijakyselyn avulla metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan kehittämistarpeet, jotta metsähakkeen 13,5 milj. m<sup>3</sup>:n käyttötavoite voidaan saavuttaa vuonna 2020. Lisäksi perehdyttiin metsähakkeen korjuuketjuihin ja metsähakkeen hankinnan kustannusrakenteeseen, viljellyn energiapuun korjuuteknologiaan ja talouteen sekä pellettien ja torrefioidun puun tuotantoteknologiaan ja -kustannuksiin. Työ tehtiin VTT:n ja Metlan yhteistyönä vuonna 2010.

Metsäntutkimuslaitoksen MELA-laskelman mukaan metsähakkeen korjuumahdollisuudet vuonna 2020 ovat 40,4 TWh eli 20,2 milj. m<sup>3</sup>, kun ainespuun korjuumäärä ja hakkuupoistuman rakenne ovat samat kuin vuosien 2004–2008 hakkuissa keskimäärin. Toteutuneiden hakkuiden mukaisessa skenaariossa nuorten metsien harvennuksilta korjattavissa olevan energiapuun määrä on 10,7 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Päätehakkuilta on puolestaan korjattavissa latvusmassaa 4,8 milj. m<sup>3</sup> vuodessa ja kantoja 4,7 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Skenaariotarkastelun tuloksia tarkastellessa pitää muistaa, että käytännössä puunostajat ja metsänomistajat ratkaisevat puumarkkinoilla, miten metsiä vuonna 2020 hakataan ja hoidetaan. Metsien hyvän kasvun ansiosta metsähakkeelle asetettu 13,5 milj. m<sup>3</sup>:n käyttötavoite on mahdollista saavuttaa.

Metsähakkeelle asetettu 25 TWh:n suuruinen käyttötavoite voidaan saavuttaa yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä erillisessä lämmöntuotannossa, sillä tässä tarkastelussa metsähakkeen käyttömääräksi arvioitiin 25,4 TWh vuonna 2020. Eniten metsähakkeen käyttöä voidaan lisätä yhdyskuntien CHP-laitoksissa (5,8 TWh) ja kivihiiltä käyttävissä CHP-laitoksissa (4,1 TWh). Lisäksi Suomeen on suunnitteilla kolme biojalostamo, joiden kokonaistuotantokapasiteetti on noin 7 TWh liikenteen biopolttoainetta. Polttoainemäärän valmistamiseen tarvitaan 12 TWh metsähaketta, jos biopolttoaine tuotetaan pelkästään met-

sähäkkeellä. Biopolttoaineiden tuotannossa syntyy paljon lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää biojalostamoon integroituneen teollisuuden prosesseissa ja parantaa biopolttoaineiden tuotannon hyötysuhdetta.

Asiantuntijakyselyn mukaan metsähakkeen hankinnan tärkeimmät kehitystarpeet liittyvät harvennuspuulla korjuukustannusten alentamiseen, kuljettajien ammattitaidon edistämiseen, ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden turvaamiseen ja korjuun integrointiin. Kannoilla tärkeimmät kehitystarpeet liittyvät kantomurskeen laadun ja käytettävyyden parantamiseen ja kaukokuljetustehokkuuden lisäämiseen kuormakoon kasvun ja kuormankäsittelyn tehostumisen kautta. Latvusmassalla kehitystarvetta on materiaalin varastoitavuuden parantamisessa ja kuljetustehokkuuden lisäämisessä. Metsänomistajien aktivoiminen energiapuukauppaan, samoin kuin kestävyys ja seurannaisvaikutusten huomioiminen energiapuun korjuussa, nousi korostetusti esille kaikilla metsähakelajeilla. Pitkän kuljetusmatkan kuljetusmuotoja, samoin kuin yhdistettyjä kuljetusmuotoja, on kehitettävä ja metsähakkeen puutteellista toimitusvarmuutta ja laatua on parannettava.

## Alkusanat

Tämän työn tavoitteena oli luoda katsaus metsähakkeen käyttö- ja korjuumahdollisuuksiin vuonna 2020 ja selvittää metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan kehittämistarpeet. Lisäksi perehdyttiin viljelyn energiapuun korjuuteknologiaan ja talouteen sekä pellettien ja torrefioidun puun tuotantoteknologiaan ja -kustannuksiin. Työ tehtiin VTT:n ja Metsäntutkimuslaitoksen tiiviinä yhteistyönä 1.8.–31.11.2010. Työnjaossa Metsäntutkimuslaitos vastasi metsähakkeen kertymiin, korjuuketjuihin, korjuukustannuksiin, kehittämispotentiaaliin ja kehittämistarpeisiin liittyvistä asioista. VTT puolestaan tutki metsähakkeen käyttöä ja käyttökohteita vuonna 2020 ja selvitti puun lyhytkiertoviljelyä sekä puupoltto-ainejalosteisiin liittyviä kysymyksiä.

Tutkimuksessa tehtiin asiantuntijakysely, jolla arvioitiin metsähakkeen vuoden 2020 käyttötavoitteiden saavuttamista rajoittavien tekijöiden merkitystä, käytönkasvun ongelmakohtien ratkaisumahdollisuuksia ja T&K-tarpeita. Kiitokset asiantuntijakyselyyn osallistuneille henkilöille vastauksista ja rakentavista kommentteista.

Tutkimushankkeen ohjausryhmään kuuluivat Marjatta Aarniala Tekesistä, Sixten Sunabacka ja Aimo Aalto työ- ja elinkeinoministeriöstä, Leena Paavilainen ja Antti Asikainen Metsäntutkimuslaitoksesta sekä Satu Helynen ja Arvo Leinonen VTT:stä. Arvo Leinonen toimi projektissa projektipäällikkönä.

Tekijät

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä .....	3
Alkusanat .....	5
1. Johdanto .....	9
2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020.....	11
2.1 Metsähakkeen käytön tavoitteet vuodelle 2020.....	11
2.2 Metsähakkeen käytön kehittyminen 2000-luvulla .....	13
2.3 Metsähakkeen käyttökohteet vuonna 2020 .....	14
2.3.1 Metsähakkeen käyttö lämpölaitoksissa.....	15
2.3.2 Metsähakkeen käyttö biomassaa käyttävissä CHP-laitoksissa.....	16
2.3.3 Metsähakkeen käyttö kivihiiltä käyttävissä CHP-laitoksissa .....	17
2.3.4 Metsähakkeen käyttö Haapaveden voimalaitoksessa .....	18
2.3.5 Metsähakkeen käyttö eri käyttökohteissa vuonna 2020.....	19
2.3.6 Metsähakkeen käytön kehittyminen maakunnittain 2020 asti .....	21
2.3.7 Metsähakkeen käyttö liikenteen biopolttonesteiden valmistuksessa .....	23
2.4 Yhteenveto.....	24
3. Metsähakkeen raaka-aineet.....	26
3.1 Metsähakkeen ja puupolttoaineiden nykykäyttö .....	26
3.2 Metsähakkeen korjuupotentiaalit vuonna 2020 .....	28
4. Metsäenergian korjuuketjut.....	34
4.1 Haketustavat.....	34
4.2 Autokuljetus .....	40
4.3 Alus- ja junakuljetukset .....	41
4.4 Materiaalin vastaanotto.....	43
4.5 Metsähakkeen korjuun toiminnan ohjaus .....	43
4.6 Latvusmassan korjuu .....	44
4.7 Kantojen korjuu .....	48
4.8 Nuorten metsien energiapuun erilliskorjuu.....	50
4.9 Aines- ja energiapuun integroitu korjuu .....	55
5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne .....	59
5.1 Koneiden käyttötuntilaskennan laskentaperusteet .....	60
5.2 Korjuukustannusten laskentaperusteet.....	63
5.3 Metsähakkeen kustannusrakenne ja korjuukustannus käyttöpaikalla .....	65
6. Energiapuun lyhytkiertoviljely.....	69
6.1 Lyhytkiertoviljely Euroopassa.....	69
6.2 Lyhytkiertoviljely Suomessa.....	70
6.3 Pajun korjuuteknologia.....	70
6.4 Pajun poltto-ominaisuudet .....	71
6.5 Lyhytkiertoviljelyn talous .....	72
6.6 Yhteenveto.....	73



7.	Pellettien tuotantoteknologia ja -kustannukset .....	74
7.1	Tausta .....	74
7.2	Pellettien käyttö nyt ja vuonna 2020 .....	74
7.3	Raaka-aineet.....	76
7.4	Prosessikuvaus.....	76
7.5	Tuotantokustannukset.....	78
7.6	Hinta käyttöpaikalla.....	81
7.7	Yhteenveto.....	82
8.	Biohiilen valmistus metsähakkeesta .....	84
8.1	Tausta .....	84
8.2	Raaka-aineet.....	85
8.3	TOP-prosessikuvaus.....	85
8.4	Tuotantokustannukset.....	88
8.5	Milloin kaupallisen mittakaavan teknologia saatavilla ? .....	89
8.6	Yhteenveto.....	89
9.	Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali .....	91
9.1	Korjuu.....	91
9.1.1	Puun tilavuus ja hakkuutapa .....	91
9.1.2	Kantoläpimitta ja nostokoneen massa.....	93
9.1.3	Kantojen paloittelu ja puhdistus.....	94
9.2	Metsäkuljetus .....	95
9.3	Työvaiheiden ajanmenekki ja työvaiheiden integrointi.....	97
9.4	Kaukokuljetus.....	100
9.4.1	Kuormankäsittely ja kuormakoko .....	100
9.5	Toimintaympäristö.....	101
9.5.1	Hankinnan mittakaava.....	101
9.5.2	Materiaalin toimitus ja vastaanotto .....	102
9.5.3	Työvoiman ja kaluston tarve.....	104
9.5.4	Raaka-aineen osto ja saatavuus.....	104
9.6	Liiketoimintamallit.....	106
9.7	Yhteenveto.....	108
10.	Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen.....	111
10.1	Asiantuntijakysely .....	111
10.2	Asiantuntijakyselyn tulokset.....	113
10.2.1	Arviointitaulukon tulokset.....	113
10.2.2	Avoimet kysymykset.....	119
10.3	Yhteenveto asiantuntijakyselyn tuloksista .....	121
11.	Kehitystyön toteutus ja organisointi .....	122
12.	Yhteenveto .....	126
	Lähdeluettelo.....	134



# 1. Johdanto

Metsähaketta ja muita puupolttoaineita polttoaineenaan käyttävien laitosten määrä on noussut kymmenessä vuodessa lähes tuhanteen vuosituhannen alun 250 laitoksesta (Asikainen ja Anttila 2009). Lisäksi uusia puuta käyttäviä laitoksia on rakenteilla ja puun käyttö kivihiilikattiloissa on mahdollisesti lisääntymässä. Suomi on sitoutunut osana EU:n ilmastopolitiikkaa kasvattamaan uusiutuvien energialähteiden osuutta loppukulutuksessa nykyisestä noin 28,5 %:sta 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä (Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008). Puupohjaisella energialla, etenkin metsähakkeella on seuraavan vuosikymmenen aikana suuri rooli uusiutuvan energian käytön lisäämisessä. Puunjalostusteollisuuden sivutuotteet (kuori ja puru) hyödynnetään jo nyt täysimääräisesti, joten lisää puuta on käytännössä mahdollista saada ainoastaan metsähakkeena. Oman haasteensa käyttötavoitteiden saavuttamiselle tuo lisäksi se, että teollisuuden sivutuotepuuvirta on merkittävästi supistunut 2000-luvulla tuotannon supistusten ja tuotantolaitosten sulkemisten takia (Ylitalo 2010).

Suomen kansallisen uusiutuvan energian toimintasuunnitelman mukaan metsähakkeen käyttö yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä erillisessä lämmöntuotannossa on 13,5 milj. m<sup>3</sup> vuoteen 2020 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010, Pekkarinen 2010). Tavoitteena on myös kasvattaa metsähakkeen käyttöä liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa merkittävästi, kun liikennebiopolttoaineiden kokonaistuotantotavoite on 7 TWh vuoteen 2020 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010, Pekkarinen 2010). Jotta kaikkiin metsähakkeen käytön tavoitteisiin päästään vuonna 2020, on metsähakkeen tuotantokustannuksia alennettava sekä toimitusvarmuutta ja laatua parannettava. Tämä on mahdollista metsähakkeen tuotantoteknologiaa, liiketoimintamalleja sekä logistisia ratkaisuja kehittämällä. Tavoite merkitsee huomattavia investointeja ja sitä myötä kasvavia markkinoita laitetoimittajille, samoin kuin välillisiä ja välittömiä työllisyysvaikutuksia korjuussa, kuljetuksessa ja laitevalmistuksessa. Metsävarojen puolesta käyttötavoitteisiin voidaan yltää ja raaka-ainetta riittää sekä puunja-

## 1. Johdanto

lostusteollisuuden että energiateollisuuden tarpeisiin. Suurimmat epäilyt kohdistuvat siihen, että miten tuo puusuma saadaan markkinoille ja toimitettua loppukäyttäjille kohtuullisin kustannuksin.

Pääosa Suomen bioenergiasta syntyy nykyisin metsäteollisuuden sivuvirroista (Tilastokeskus 2009). Merkittävin yksittäinen energianlähde on sellutehtaassa syntyvä ja soodakattiloissa poltettava mustalipeä. Kiinteistä puupolttoaineista merkittävin on puunkuori. Tiukka kytkös teollisuuteen tuo ajoittain ongelmia puu- ja metsäenergian käyttäjille. Jos puunkäyttö ja hakkuut vähenevät, vähenee sivutuotepuun ohella myös päätehakuilta korjattavan latvusmassan ja kantojen määrä. Vireä puunkäyttö ja puukauppa ovatkin eräs edellytys sille, että metsähakkeen käyttötavoitteisiin ylletään.

Harvennuspuuhakkeen hankinta ei ole sidoksissa metsäteollisuuden puun kysyntään, mikä lähtökohtaisesti parantaa mahdollisuuksia lisätä tämän resurssin käyttöä. Harvennuspuun korjuukustannukset nousevat kuitenkin korkeiksi, koska hakkuukoneen tuottavuus on suoraan kytköksissä poistettavan puuston tilavuuteen. Näin pieniläpimittaiselle energiapuulle muodostuu huomattavasti suurempi kuutiokohtainen korjuukustannus kuin järeämmälle kuitu- tai tukkipuulle. Ainespuusta maksettava korkeampi kantohinta kompensoi tilannetta ja vähentää energiapuun korjuutukien ohella järeän puun ohjautumista polttoaineeksi. Energiapuulla on monia ottajia ja se voi olla paikoin jopa kilpailluin puutavaralaji. Jatkossa energiapuun hankintahinnan yläraja voi olla myös kuitupuun hinnan alaraja. Molemmat vaikuttavat toisiinsa.

Tämä selvitystyö tehtiin VTT:n ja Metsäntutkimuslaitoksen yhteistyönä. Selvityksen perimmäisenä tavoitteena oli kartoittaa ne metsähakkeen hankinnan kompastuskivet, jotka voivat estää metsähakkeen käyttötavoitteiden toteutumisen vuoteen 2020 mennessä ja löytää keinoja näiden karikoiden kiertämiseksi ja ongelman ratkaisemiseksi. Metsähakkeen ohella selvitystyössä tarkasteltiin puubiomassan lyhytkiertoviljelyä sekä pellettien ja torrefioidun puun tuotantotekniikkaa ja taloutta. Selvityksen osatavoitteet olivat:

- Tunnistaa metsähakkeen käyttökohteet, joissa metsähakkeen käytön lisäystavoite saavutetaan vuoteen 2020 mennessä.
- Tunnistaa vaihtoehtoiset metsähakkeen lähteet ja niihin parhaiten soveltuvat toimitusketjut.
- Tunnistaa ne metsähakkeen hankinnan pullonkaulat, joissa on suurin strateginen kehittämispotentiaali ja määrittellä niiden kehittämistarpeet sekä asettaa niiden kehittämistavoitteet.

## **2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020**

### **2.1 Metsähakkeen käytön tavoitteet vuodelle 2020**

Keväällä 2010 työ- ja elinkeinoministeri Pekkarinen esitti uusiutuvan energian velvoitepaketissa tavoitteen uusiutuvan energian käytöstä Suomessa vuoteen 2020 mennessä (Pekkarinen 2010). Suunnitelmassa asetetun tavoitteen mukaan metsähakkeen nykykäyttö (10,8 TWh) on yli kaksinkertaistettava noin 13,5 miljoonaan kiintokuutiometriin (25 TWh) vuoteen 2020 mennessä (taulukko 1).

Metsähakkeen käyttöä on tarkoitus lisätä niin lämmön, sähkön kuin myös liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa. Energian tuotannossa tavoitteena on lisätä metsähakkeen käyttöä kivihiiltä käyttävissä CHP-laitoksissa 7–8 TWh ja biomassaa käyttävissä lämpö- ja voimalaitoksissa 6–7 TWh. Liikenteen biopolttoaineen tuotantotavoite vuodelle 2020 on 7 TWh. Liikenteen biopolttoaineen tuotannon raaka-aineita on useita. Mikäli biopolttoaine tuotetaan metsähakkeella, niin metsähaketta tarvitaan noin 12 TWh.

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

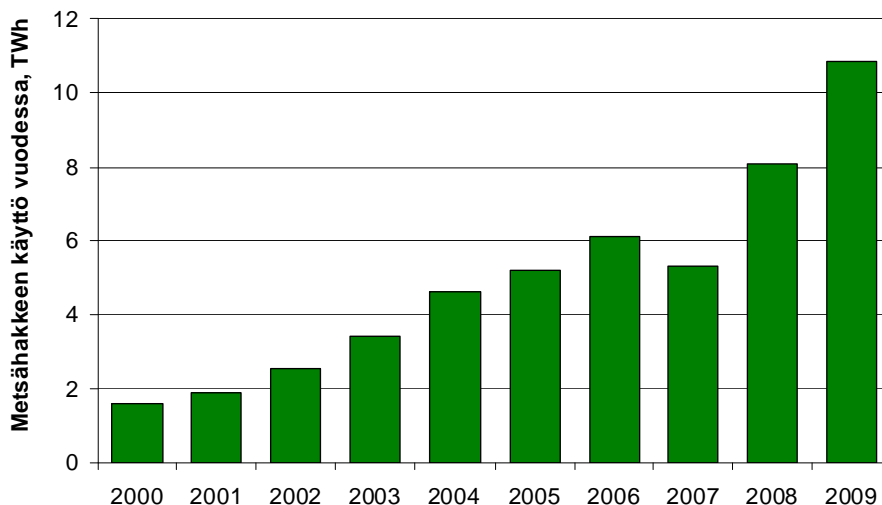
Taulukko 1. Uusiutuvalle energialle asetetut tavoitteet (Pekkarinen 2010).

<b>UUSIUTUVAT ENEGIALÄHTEET, TWh</b>		
<b>Primäärienergiana</b>	<b>2005</b>	<b>2020</b>
<b>Teollisuuden tuotannosta riippuvat polttoaineet</b>		
- Jäteliemet	<b>37</b>	<b>38</b>
- Teollisuuden tähdepuu	<b>20</b>	<b>19</b>
<b>Yhteensä</b>	<b>57</b>	<b>57</b>
<b>Politiikkatoimien kohteena olevat<sup>(1)</sup></b>		
- Vesivoima (normalisoitu)	<b>13,6</b>	<b>14</b>
- Vesivoima, toteutunut	<b>13,4</b>	
- Tuulivoima	<b>0</b>	<b>6</b>
- Metsähake	<b>6</b>	<b>25</b>
- Puun pienkäyttö	<b>13</b>	<b>12</b>
- Lämpöpumput	<b>2</b>	<b>8</b>
- Liikenteen biopolttoaine	<b>0</b>	<b>7</b>
- Biokaasu	<b>0</b>	<b>1</b>
- Pelletit	<b>0</b>	<b>2</b>
- Kierrätyspolttoaineet, RES-osuus	<b>2</b>	<b>2</b>
- Muu uusiutuva, mm. aurinkolämpö, - sähkö, ym.	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
<b>Yhteensä</b>	<b>37</b>	<b>77</b>
Uusiutuva energia primäärienergiana, yhteensä <sup>(2)</sup>	<b>94</b>	<b>134</b>
Uusiutuva energia loppukulutuksessa <sup>(3)</sup>	<b>97</b>	<b>124</b>
Energian loppukulutus	<b>303</b>	<b>327</b>
Uusiutuvan osuus loppukulutuksesta, toteutunut/arvio	<b>28,5 %</b>	<b>38 %</b>
<sup>(1)</sup> Primäärienergiana		
<sup>(2)</sup> Vesivoima normalisoitu 2005–2009		
<sup>(3)</sup> Päivitetty laskelma 30.3.2010; paperin ja kartongin tuotanto 13,7 Mt/v ja sähkönkulutus 98 TWh/v; uusiutuvat energiat IE-strategian mukaan; metsähakkeella 38 % tavoite kiinni.		

## 2.2 Metsähakkeen käytön kehittyminen 2000-luvulla

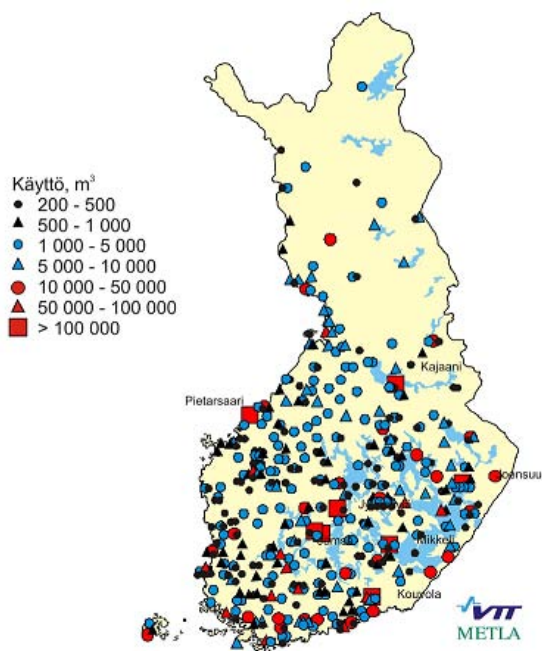
Metsähakkeen käyttö vuonna 2009 oli noin 10,8 TWh. Metsähakkeen käyttö on kasvanut tasaisesti 2000-luvulla noin 1 TWh vuodessa (kuva 1). Alkuvuosina metsähakkeen käytön kasvun veturina toimi metsäteollisuus. Viime vuosina yhdyskuntien lämpöä ja sähköä tuottavat voimalat ovat lisänneet merkittävästi metsähakkeen käyttöä. Näissä isoissa CHP-laitoksissa pääpolttoaineena on turve. Pienissä, pelkästään lämpöä, tuottavissa kattiloissa metsähake on ollut yleensä pääpolttoaine.

Metsähaketta käyttäviä laitoksia Suomessa on kaikkiaan lähes 1000 kappaletta (kuva 2). Näistä yli 1 MW:n laitoksia on noin 350. Yli 20 MW:n CHP-laitoksia on noin 50. Tällä hetkellä suurin metsähakkeen käyttäjä on Pietarsaarella toimiva Oy Alholmens Kraft Ab, jonka metsähakkeen käyttö on noin 600 GWh. Laitos tuottaa sähköä, prosessihöyryä ja kaukolämpöä. Oulun Energia on myös merkittävä metsähakkeen käyttäjä. Vuonna 2009 Oulun Energia käytti Toppilan kattiloissa 520 GWh metsähaketta (Oulun Energia 2010). Merkittäviä metsähakkeen käyttäjiä ovat myös Jämsänjokilaaksossa sijaitsevat UPM:n Kaipolan ja Jämsänkosken paperitehtaat, jotka vuonna 2008 yhdessä käyttivät metsähaketta noin 1,0 TWh (Raitila 2009).



Kuva 1. Metsähakkeen käytön kehittyminen lämpö- ja voimalaitoksissa 2000-luvulla (Ylitalo 2010).

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020



Kuva 2. Metsähaketta käyttävät laitokset ja niiden sijainti Suomessa vuonna 2009.

### 2.3 Metsähakkeen käyttökohteet vuonna 2020

Metsähakkeen käytön kasvun arvioinnissa hyödynnettiin VTT:n laitostietokantaa, joka kattaa voima- ja lämpölaitosten perustiedot runsaasta 350 laitoksesta. Rekisterin perustietoja ovat kattilan tehot, polttotapa, rakenus/käyttöönottovuosi sekä polttoaineen käyttömäärät. Laitostiedot kattavat käyttökohteet, joiden biopolttoaineen kattilan teho on yli 1 MW.

Tarkastelussa on myös hyödynnetty VTT:n muissa julkisissa hankkeissa saatuja tietoja. Lisäksi tarkastelussa on huomioitu suunnitellut vanhojen voimalaitosten saneeraukset ja uudet laitokset.

Metsähakkeen käyttöä vuonna 2020 tarkasteltiin energian ja liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa. Energian tuotannossa on tarkasteltu metsähakkeen käyttöä:

- lämpölaitoksissa
- teollisuuden ja yhdyskuntien omistamissa biomassaa käyttävissä CHP-laitoksissa



- kivihiiltä käytävissä CHP-laitoksissa
- Haapaveden voimalaitoksessa.

Liikenteen biopolttoaineiden tuotannossa käytiin läpi eri yritysten suunnitteilla olevat laitokset.

### 2.3.1 Metsähakkeen käyttö lämpölaitoksissa

Metsähakkeen käyttö lämmöntuotannossa voidaan jakaa lämpöyrittäjien hoitamiin lämpölaitoksiin, yhdyskuntien lämpölaitoksiin ja teollisuuden lämpölaitoksiin.

Lämpöyrittäjätoiminta alkoi 1990-luvulla. Kasvu on ollut vauhdikasta, sillä nykyään Suomessa on jo noin 350 lämpöyrittäjien hoitamaa lämpölaitosta, joista lämpöä toimitetaan kuntien lämpöverkkoihin tai kiinteistöihin. Lämpöyrittäjien hoitamat laitokset ovat pääasiassa kiinteistökokoluokan kattiloita, joiden teho on alle 1 MW. Tyypillisesti yrittäjä hoitaa raaka-aineen hankinnan ja lämmitystyön. Puupolttoaineen yrittäjät hankkivat omista ja lähiseudun metsistä sekä lähialueen sahoilta. Lämpöyrittäjätoiminnassa osakeyhtiöiden, osuuskuntien ja yrittäjärenkaiden osuus on selvästi suurempi kuin muissa metsäalan yrittäjärühmissä. Kiinteistöjen, esimerkiksi koulujen ja vanhainkotien, omat lämpökeskukset ovat tyypillisiä yrittäjien tai yrittäjärenkaiden hoitamia laitoksia.

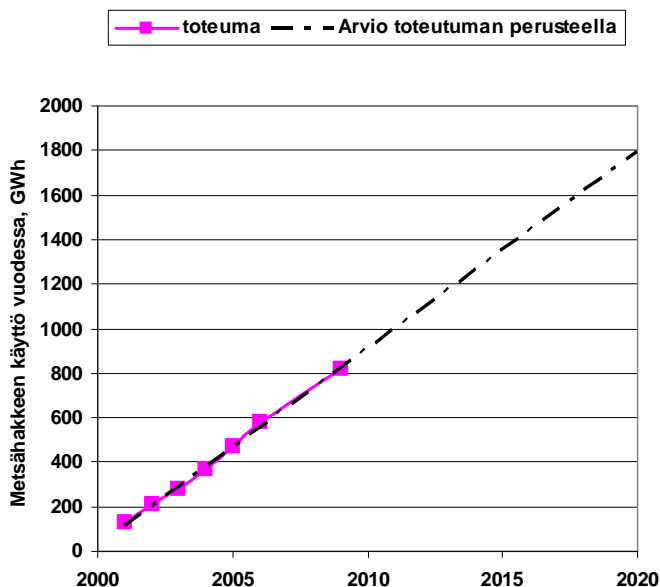
Lämpöyrittäjien hoitamissa lämpölaitoksissa metsähakkeen käyttö on kasvanut tasaisesti 2000-luvulla ollen vuonna 2009 noin 0,8 TWh. Käytön kasvun pohjalta arvioituna metsähakkeen käyttö lämpöyrittäjien hoitamissa laitoksissa kasvaa noin 1,8 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä (kuva 3). Tässä tarkastelussa käytettiin hieman alhaisempaa eli 1,5 TWh:n käyttöarviota.

Yhdyskuntien lämpölaitoskohteissa kattilateho on keskimäärin 1–10 MW. Vuonna 2009 metsähakkeen käyttö yhdyskuntien lämpölaitoksissa oli noin 1,4 TWh. Metsähaketta käytettäviä lämpölaitoksia ei tule enää kovin paljon lisää, mutta metsähakkeen käyttö olemassa olevissa laitoksissa tulee kasvamaan vuoteen 2020 mennessä. Metsähakkeen käytön on arvioitu kasvavan vuoteen 2020 mennessä noin 2,1 TWh:iin.

Metsähaketta käytetään myös teollisuuslaitosten yhteydessä olevissa lämpölaitoksissa. Näitä on mm. meijereissä ja sementtitehtaissa ja niiden teho on 1–20 MW. Metsähakkeen käyttö näissä lämpölaitoksissa oli vuonna 2009 0,2 TWh. Metsähakkeen käytön on arvioitu kasvavan vuoteen 2020 mennessä noin 0,4 TWh:iin.

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

Näin metsähakkeen käyttö kasvasi lämpöyrittäjien hoitamisessa, yhdyskuntien ja teollisuuden lämpölaitoksissa nykyisestä 2,4 TWh:sta yhteensä 4,0 TWh:iin vuonna 2020.



Kuva 3. Arvioitu metsähakkeen käytön kasvu lämpöyrittäjien hoitamisessa lämpölaitoksissa vuoteen 2020 mennessä.

### 2.3.2 Metsähakkeen käyttö biomassaa käyttävissä CHP-laitoksissa

Vuonna 2009 metsähake käytettiin pääosin (78 %) isoissa teollisuuden ja yhdyskuntien erilaista biomassaa käyttävissä CHP-laitoksissa, missä se oli yhteensä noin 8,4 TWh. Metsähakkeen käyttö yhdyskuntien teollisuuden voimalaitoksissa jakaantuu tasan ollen molemmissa noin 4,2 TWh. Teollisuuden CHP-laitokset ovat pääsääntöisesti metsäteollisuudessa sijaitsevia laitoksia. Laitoskoko voi vaihdella 20 MW:sta jopa 550 MW:iin.

Biomassaa käyttävissä yhdyskuntien CHP-voimalaitoksissa pääpolttoaineena on useassa laitoksessa turve, jota metsähake tulee jossain määrin tulevaisuudessa korvaamaan. Metsähakkeen käyttötavoitteen saavuttaminen CHP-laitoksissa edellyttää, että metsähakkeen käyttö otetaan huomioon mahdollisuuksien mukaan myös kaikissa uusissa voimalahankkeissa. Tarkastelussa on uusista/saneerattavista suurista kohteista otettu huomioon seuraavat laitokset:

- Järvenpää
- Kuopio, joka on rakenteilla
- Rovaniemi
- Hämeenkyrö
- Tampere ja
- Turkuun rakennettava biokattila. Tälle korvaava vaihtoehto on Fortumin Naantalın voimalahanke.

Lämpöä ja sähköä tuottavia voimaloita ei suoraan voi jaotella teollisuuden tai yhdyskuntien voimalaitoksiin, koska jo nyt huomattava osa voimaloista tuottaa energiaa sekä teollisuudelle että yhdyskunnille. Näitä ovat mm. Oy Alholmens Kraft Ab Pietarsaassa, joka tuottaa sähköä, prosessihöyryä ja kaukolämpöä Pietarsaaren kaupungille ja UPM:n Pietarsaaren tehtaille. Myös Kaukaan Voima Oy:n CHP-laitos on tällainen. Se on Lappeenrannan Energian ja UPM:n yhteishankkeena rakennettu biovoimalaitos, joka tuottaa prosessihöyryä ja sähköä UPM:n Kaukaan tehtaille sekä kaukolämpöä ja sähköä Lappeenrannan Energialle. Voimalaitoksen lämpöteho on 385 megawattia ja sähköteho 125 megawattia. Voimalaitoksen polttoaineita ovat kuori, metsähake ja turve. Noin 80 prosenttia voimalaitoksen polttoainetarpeesta katetaan puupolttoaineilla.

Tässä tarkastelussa yhdyskuntien voimalaitoksissa metsähakkeen käytön arvioidaan kasvavan 4,2 TWh:sta 10 TWh:iin. Teollisuuden CHP-laitoksissa käytön arvioidaan kasvavan 4,2 TWh:sta 6,8 TWh:iin. Näin yhdyskuntien ja teollisuuden CHP-laitoksissa metsähakkeen käytön arvioidaan kasvavan nykyisestä 8,4 TWh:sta 16,8 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä.

### 2.3.3 Metsähakkeen käyttö kivihiiltä käyttävissä CHP-laitoksissa

Suomessa on kaikkiaan kuusi kivihiiltä käyttävää CHP-laitosta, jotka sijaitsevat Espoossa (2 kpl), Naantalissa, Helsingissä, Vantaalla, Lahdessa ja Vaasassa (taulukko 2). Näissä laitoksissa käytettiin kivihiiltä noin 12 430 GWh vuonna 2008.

Kivihiiilen korvaamiseen metsähakkeella on useita mahdollisuuksia:

- Metsähakkeen hienomurskaus ja sekoitus kivihiiileen ja seoksen syöttö kattilaan
- Metsähakkeen hienomurskaus ja erillinen syöttö kattilaan
- Metsähakkeen kaasutus, kaasun puhdistus ja kaasun syöttö kattilaan

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

- Pellettien valmistus metsähakkeesta ja käyttö eri tavoilla
- Metsähakkeen jalostus biohiileksi ja syöttö erillislinjaa myöten kattilaan.

Metsähakkeen erilaiset käyttötavat kivihiilikattiloissa vaikuttavat kivihiilimylyjen kapasiteettiin ja kattilan suoritusarvoihin, jotka asettavat tietyn rajan biomassan käytölle. Biomassan kaasutus ja kaasun syöttö kattilaan mahdollistavat metsähakkeen huomattavan jatkuvan käytön kivihiilikattilassa. Metsähakkeen osuus voi tällä menetelmällä olla jopa 50 % polttoainevirrasta.

Jotta kivihiiltä käyttävissä laitoksissa päästään tavoitteena olevaan 7–8 TWh:iin, metsähakkeen osuus kivihiiltä käyttävissä laitoksissa tulisi olla yli 50 %. Mikäli kivihiilen käytöstä (12,4 TWh) puolet korvataan puupolttoaineella, päädytään 6,2 TWh:iin (taulukko 2). Tarkastelussa olivat mukana myös Lahden ja Naantalin kivihiiltä käyttävät CHP-laitokset, joissa on suunnitteilla jo tällä hetkellä kivihiiltä korvaavia investointeja.

Näillä näkymin kivihiiltä käyttävät laitokset olisivat vuonna 2020 Espoon, Helsingin, Vantaan ja Vaasan laitokset. Näiden metsähakkeen käyttö vuonna 2020 olisi 4,1 TWh, jos kivihiiltä korvataan näissä laitoksissa 50 %.

Taulukko 2. Kivihiiltä käyttävät CHP-voimalat (Energiateollisuus 2008) ja niiden mahdollinen metsähakkeen käyttö.

Lämmöntuottaja	Hiilen käyttö yhteensä vuonna 2008, TWh	Puun käyttö yhteensä, jos puun osuus polttoainekäytöstä on 50 %, TWh	Puun käyttö valituissa laitoksissa – osassa laitoksia korvaavia investointeja suunnitteilla, TWh
<b>Kaikki laitokset</b>	12,4	6,2	4,1

### 2.3.4 Metsähakkeen käyttö Haapaveden voimalaitoksessa

Kanteleen Voima Oy omistaa Haapavedellä sijaitsevan voimalaitoksen, joka käyttää tällä hetkellä polttoaineena pääasiassa turvetta (kuva 4). Kanteleen Voima Oy on hankkinut vuonna 2009 hakejauhimen, joka hienontaa metsähakkeen voimalaitoksen polttoprosessiin soveltuvaksi pölyksi. Lisäksi Kanteleen Voima Oy:llä on suunnitelmissa hankkia toinen hakejauhin Haapavedelle. Tässä tarkas-

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

telussa on arvioitiin, että Haapaveden laitoksessa käytetään metsähaketta sekä vuonna 2015 että vuonna 2020 noin 0,5 TWh (Ollila 2010).



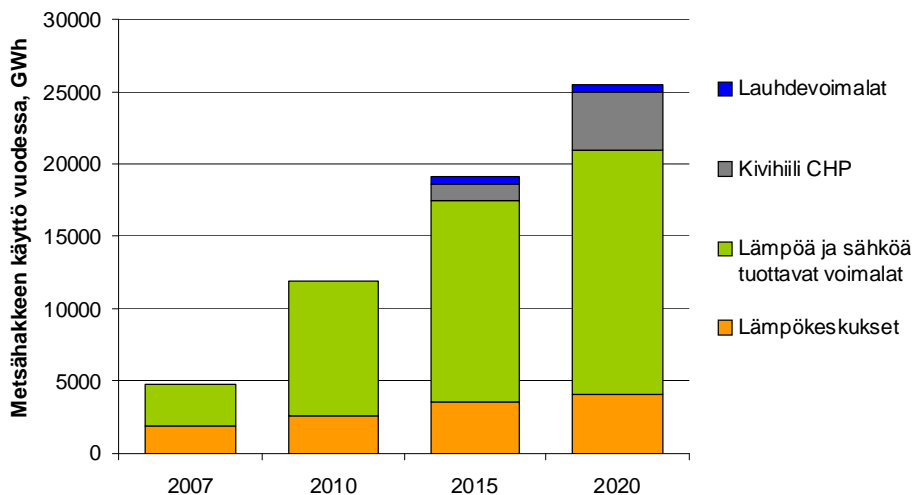
Kuva 4. Kantelen Voima Oy:n Haapaveden voimalaitos (J. Laitila, Metla).

### 2.3.5 Metsähakkeen käyttö eri käyttökohteissa vuonna 2020

Metsähakkeen käytössä voidaan päästä vuoden 2020 25 TWh:n käyttötavoitteen (kuva 5). Metsähakkeen kokonaiskäyttö olisi tämän tarkastelun mukaan 25,4 TWh (taulukko 3).

Pääosa lämpö- ja voimalaitosten metsähakkeesta (kuva 6) käytetään suurissa kohteissa, joita on runsaat 30 ja joiden käyttämä metsähakkeen määrä on noin 13,8 TWh. Vastaavasti lukumääräisesti suurin joukko käyttäjistä, runsaat puolet, käyttää alle 20 GWh/a ja näiden pienten käyttäjien metsähakkeen käyttö yhteensä on noin 1 TWh (kuva 6).

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

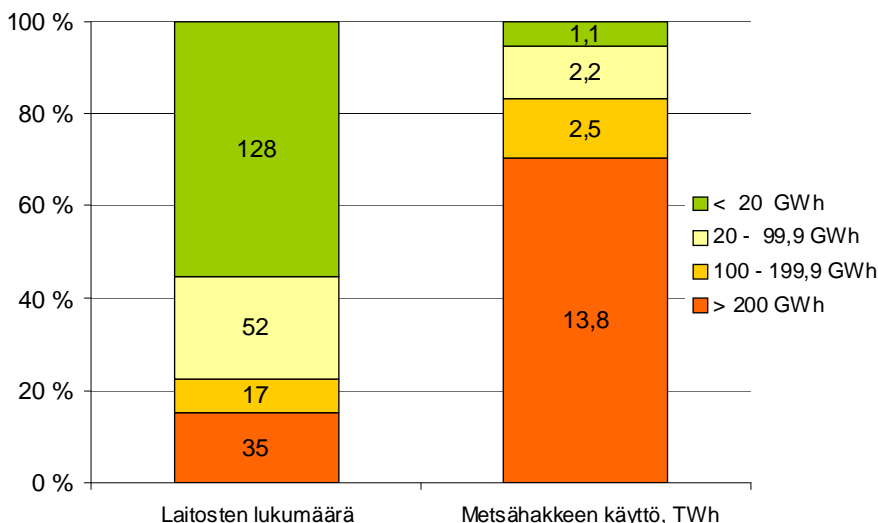


Kuva 5. Metsähakkeen ennustettu käyttö vuoteen 2020 mennessä lämpökeskuksissa, biomassaa ja kivihiiltä käyttävissä CHP-voimaloissa sekä Haapaveden voimalaitoksessa.

Taulukko 3. Metsähakkeen käytön kehittyminen vuodesta 2009 vuoteen 2020.

Käyttökohteet	2009	2020
<b>Lämpölaitokset</b>		
- Lämpöyrittäjien lämpölaitokset, TWh	0,8	1,5
- Yhdyskuntien lämpölaitokset, TWh	1,4	2,1
- Teollisuuden lämpölaitokset, TWh	0,2	0,4
<b>CHP-laitokset</b>		
- Yhdyskuntien CHP-laitokset, TWh	4,2	10
- Teollisuuden CHP-laitokset, TWh	4,2	6,8
<b>Kivihiiltä käyttävät CHP-laitokset, TWh</b>	0	4,1
<b>Haapaveden voimalaitos, TWh</b>	0	0,5
<b>Käyttökohteet yhteensä, TWh</b>	10,8	25,4

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020



Kuva 6. Metsähaketta käyttävät laitokset ja niiden arvioitu metsähakkeen käyttö vuonna 2020. Mukana eivät ole kivihiiltä käyttävät CHP-laitokset eikä Haapaveden voimalaitos.

### 2.3.6 Metsähakkeen käytön kehittyminen maakunnittain 2020 asti

Kuvassa 7 esitetään arvio metsähakkeen käytön kehityksestä eri maakunnissa vuosina 2010, 2015 ja 2020. Kuvassa 7 ei ole otettu huomioon kivihiiltä käyttäviä CHP-laitoksia eikä liikenteen biopolttoaineiden tuotantoa.

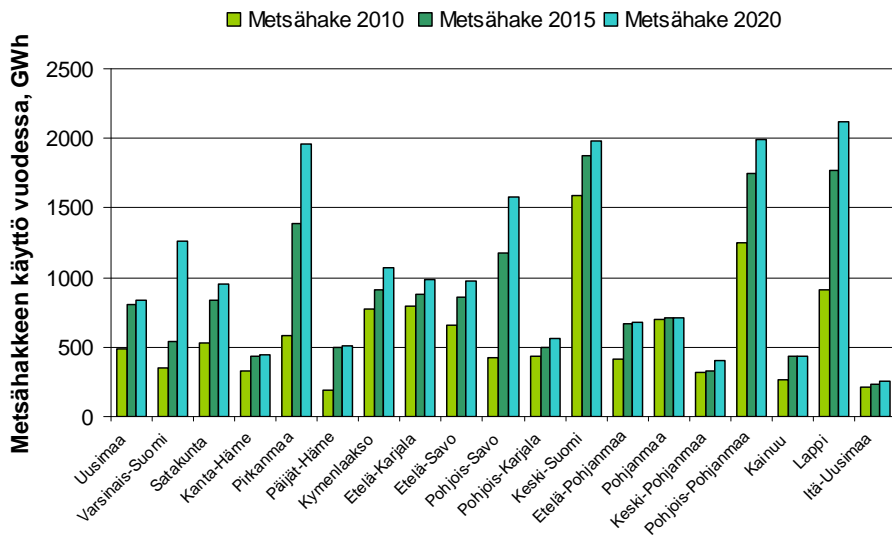
Suurimmat käyttöpotentiaalit ovat seuraavissa maakunnissa:

- Lappi
- Pohjois-Pohjanmaa
- Keski-Suomi
- Pirkanmaa
- Pohjois-Savo.

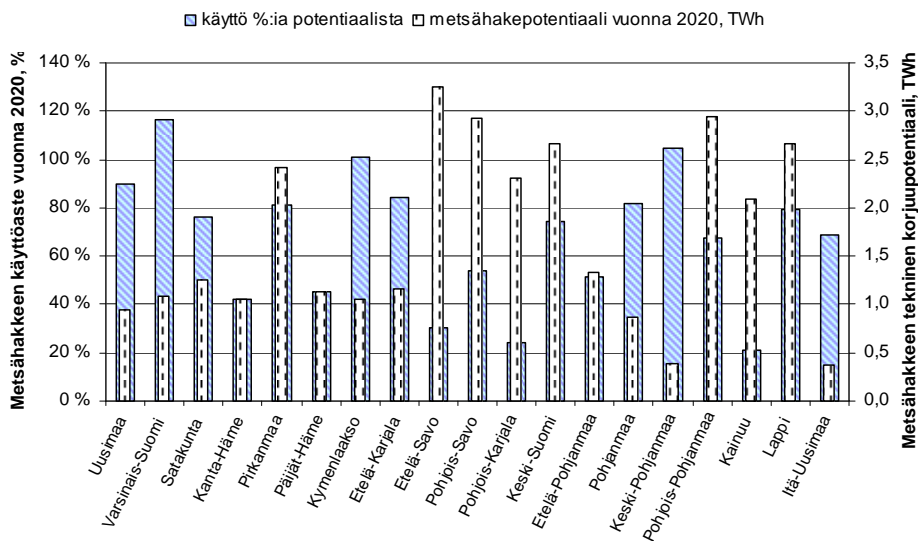
Kuvassa 8 on esitetty metsähakkeen käytön osuus vuonna 2020 metsähakkeen tuotantopotentiaalista eri maakunnissa. Maakuntakohtaisena tuotantopotentiaalina on käytetty Helysen ym. 2007 esittämiä arvoja. Tämän arvion mukaan metsähakkeen tekninen korjuupotentiaali Suomessa on 15,9 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Metsähakkeen käytön suurin ongelma on siinä, että huomattava osa suurista käyttöpaikoista sijaitsee kaukana metsäenergiapotentiaalista. Maakuntia, joissa on huo-

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

mattava metsäenergiapotentiaali mutta vähän käyttöä, ovat Etelä-Savo, Kainuu ja Pohjois-Karjala (kuva 8).



Kuva 7. Metsähakkeen käyttöarvot eri maakunnissa vuosina 2010, 2015 ja 2020.



Kuva 8. Metsähakkeen vuoden 2020 käytön osuus (%) metsähakkeen teknisestä korjuupotentiaalista eri maakunnissa.



### **2.3.7 Metsähakkeen käyttö liikenteen biopolttonesteiden valmistuksessa**

Vuoden 2020 biopolttoaineen käyttötavoite on 7 TWh. Suomessa on kolme yrittäjäkonsortiota, jotka suunnittelevat liikenteen biopolttoaineiden valmistusta (taulukko 4). Suunnitellut biojalostamot tulisivat olemassa olevien tehdasintegraattien yhteyteen. Suunniteltujen biojalostamoiden tyypillinen biopolttoaineiden tuotantokapasiteetti on 200 000 tonnia biopolttoainetta vuodessa. Täydellä kapasiteetilla yksittäinen biopolttonestelaitos käyttää vuosittain noin 4,1 TWh biomassaa. Prosessin tuottama energia (höyry, lämpö ja sähkö) käytetään osana tehdasintegraatin energiantuotantoa ja prosessin omiin tarpeisiin (Vapo Oy 2010).

Suomessa UPM on kaavaillut biojalostamoita Kouvolaan, Raumalle tai Lappeenrantaan. UPM:n suunnitteleman biojalostamon kapasiteetti on YVA-hakemuksen mukaan 50 000–300 000 tonnia vuodessa. (UPM-Kymmene Oyj 2009).

Vapo Oy ja Metsäliitto ovat selvittäneet biodieseljalostamon mahdollisuuksia Äänekoskella ja Kemissä. Vapon ja Metsäliiton biojalostamon maksimikapasiteetiksi on suunniteltu 200 000 tonnia vuodessa (Metsäliitto ja Vapo Oy 2009).

Stora Enson ja Neste Oilin yhteisyritys, NSE Biofuels on aloittanut biojalostamon ympäristövaikutusten arvioinnin (YVA) Imatralla ja Porvoossa. NSE Biofuels-yrityksellä on biodieseliä valmistava koelaitos Varkaudessa.

Mikäli liikenteen biopolttoainehankkeita toteutettaisiin 7 TWh:n edestä, metsähaketta tarvittaisiin raaka-aineena noin 12 TWh. Biopolttoaineiden tuotannossa syntyy myös runsaasti lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää tehdasintegraatissa tai prosessissa.

Oleellinen osa hankkeita on turvata raaka-aineen saatavuus, sillä biojalostamo kilpailee samoista metsähake-eristä lämpö- ja voimalaitosten kanssa.

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

Taulukko 4. Suomen YVA-vaiheessa olevat biojalostamohankkeet (Reini & Törmä 2010 & Kaleva 2010).

Yritys	Paikkakunta	Raaka-aineet	Raaka-ainetarve	Tuotteet	Tuotantokapasiteetti	YVA
UPM	Kouvola	Energiapuu	4 TWh	Biodiesel, nafta, kerosiini	300 000 tn	8/2009
UPM	Rauma	Energiapuu	4 TWh	Biodiesel, nafta, kerosiini	300 000 tn	8/2009
UPM	Lappeenranta	Energiapuu		Biodiesel, nafta kerosiini, biobensiini	50 000 – 200 000 tn	5/2010
Vapo & Metsäliitto	Äänekoski	Metsähake, turve, pelto-biomassa	4,1 TWh	Biodiesel, nafta	200 000 tonnia	12/2009
Vapo & Metsäliitto	Kemi	Metsähake, turve, pelto-biomassa	4,1 TWh	Biodiesel, nafta	200 000 tn	12/2009
Stora Enso & Neste Oil	Varkaus	Puuperäinen biomassa		Raaka biodiesel		Koe-laitos 6/2009
Stora Enso & Neste Oil	Imatra	Puuperäinen biomassa	2,0 milj. m <sup>3</sup>	Biodiesel	200 000 tn	2010
Stora Enso & Neste Oil	Porvoo	Puuperäinen biomassa	2,0 milj. m <sup>3</sup>	Biodiesel	200 000 tn	2010

### 2.4 Yhteenveto

Metsähakkeen käyttö lämmön ja sähkön tuotannossa on kasvanut 2000-luvulla merkittävästi ja vuonna 2009 ylitettiin 10 TWh:n käyttö. Metsähakkeen käytön tavoite 25 TWh voidaan saavuttaa, mutta se edellyttää, että metsähake otetaan huomioon kaikissa uusissa suurissa voimalahankkeissa yhtenä polttoainevaihtoehtoista. Tässä tarkastelussa metsähakkeen käyttömääräksi arvioitiin 25,4 TWh vuonna 2020.

Nykyisissä lämpö- ja voimalaitoksissa metsähakkeen käyttö tulee jatkossakin keskittymään suuriin voimalaitoksiin. Vuonna 2020 viitisenkymmentä suurinta käyttää yli 80 % kaikesta metsähakkeesta. Toinen merkittävä käyttäjäjoukko ovat pienet lämpölaitokset ja lämpöyrittäjät, joiden lukumäärä on muihin käyttäjiin nähden ylivertainen.

## 2. Metsähakkeen käyttö ja käyttökohteet vuonna 2020

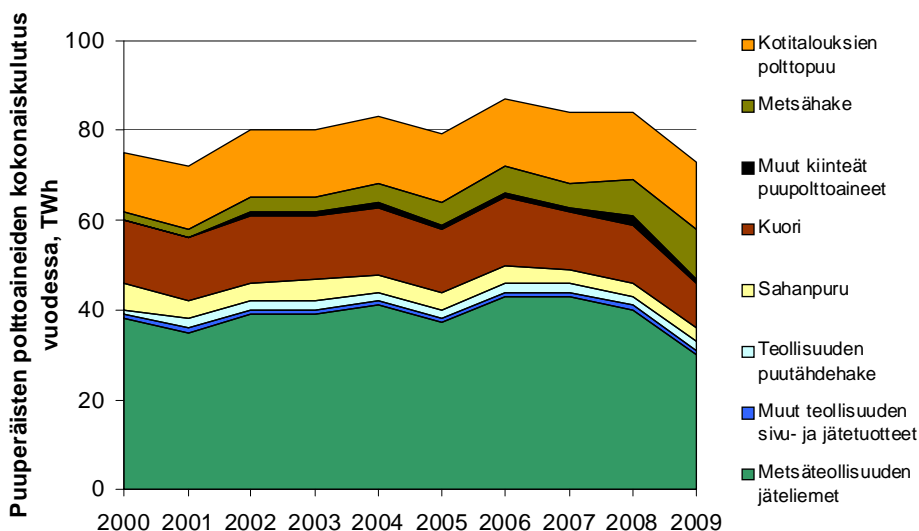
Vuoden 2020 biopolttoaineen käyttötavoite on 7 TWh. Suomessa on kolme yrityskonsortiota, jotka suunnittelevat liikenteen biopolttoaineiden valmistusta. Nämä ovat UPM, Vapo Oy ja Metsäliitto sekä Stora Enso ja Neste Oil. Mikäli liikenteen biopolttoainehankkeita toteutettaisiin 7 TWh:iin saakka, metsähaketta tai muuta materiaalia tarvittaisiin raaka-aineena noin 12 TWh. Biopolttoaineiden tuotannossa syntyy myös runsaasti lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää tehdasintegraatissa tai jalostusprosessissa. Näin liikenteen biopolttoaineiden tuotanto ei lisäisi täysimääräisesti 12 TWh metsähakkeen käyttöä.

Merkittävän haasteen metsähakkeen tai biomassan yleensä käytölle tarjoavat kivihiilen korvaaminen CHP-laitoksissa ja biodieselin valmistaminen. Molemmissa tapauksissa, yksittäinen voimala tai jalostuslaitos, muodostavat suureen käyttökohteen, jolloin merkittävä ongelmana voi olla raaka-aineena tai polttoaineena käytettävän metsähakkeen saatavuus.

## 3. Metsähakkeen raaka-aineet

### 3.1 Metsähakkeen ja puupolttoaineiden nykykäyttö

Vuonna 2009 lämpö- ja voimalaitoksissa käytettiin metsähaketta 5,4 miljoonaa kiintokuutiometriä ja pientalokiinteistöissä arviolta 0,7 miljoonaa kiintokuutiometriä (Ylitalo 2010). Edelliseen vuoteen verrattuna metsähakkeen käyttö kasvoi kolmanneksella. Kasvua vauhdittivat alkuvuoden polttoturvepula ja metsäteollisuuden tuotannon supistumisen aiheuttama niukkuus puunjalostusteollisuuden sivutuotteista, kuten kuoresta ja purusta. Energiantuotannossa hyödynnetty metsähake koostui latvusmassahakkeesta (1,9 milj. m<sup>3</sup>), kokopuusta (1,4 milj. m<sup>3</sup>), kannoista (0,8 milj. m<sup>3</sup>) ja rangoista (0,16 milj. m<sup>3</sup>). Lisäksi lämpö- ja voimalaitokset käyttivät järeää runkopuuta 1,1 milj. m<sup>3</sup>. Pääosa energiantuotannossa käytetystä runkopuusta oli tuontipuuta ja järeän puun käyttö kasvoi edellisvuodesta peräti kuusinkertaiseksi, kun Venäjältä virtasi ylivuotista, varastopiinoissa pilaantunutta ainespuuta. Pientalokiinteistöissä käytetty hake oli enimmäkseen runkopuuhaketta, joka oli tehty esim. pieniläpimittaisesta harvennuspuesta tai hukkarunkopuusta.



Kuva 9. Puuperäisten polttoaineiden kulutus energiantuotannossa 2000–2009 (www.metinfo.fi 2010, Ylitalo 2001–2009).

Puuperäisten polttoaineiden käyttö energiantuotannossa on lisääntynyt koko 2000-luvun (kuva 9). Kasvu on tosin ollut lähes pelkästään metsähakkeen varassa, sillä muiden puupolttoaineiden saatavuus on pienentynyt 2000-luvulla puunjalostusteollisuuden tuotantoyksiköiden sulkemisten takia. Teollisuuden puunkäytön merkitystä lämpö- ja voimalaitosten puupolttoainehuollossa lisää myös se, että päätehakkuilta korjattavan latvusmassan ja kantopuun korjuupotentiaalit ovat suoraan sidoksissa teollisuuden ainespuun, etenkin päätehakkuukuusikoiden, korjuumääriin. Suhdannetaantumasta johtuen latvusmassahakkeen käyttö notkahti 17 % vuonna 2009 edelliseen vuoteen verrattuna (Ylitalo 2010). Kannoilla sama notkahdus tulee korjuu- ja haketusykyistä johtuen vuoden viiveellä. Vuonna 2009 kantojen käyttö lisääntyi 45 % edelliseen vuoteen verrattuna. Harvennuksilta energiakäyttöön korjattavan kokopuun ja rangan hakkuumäärät eivät ole suoraan kytköksissä teollisuuden puunkäyttömääriin ja niinpä vuonna 2009 rankahakkeen käyttö lisääntyi 26 % ja kokopuuhakkeen peräti 71 %. Järeällä runkopuulla 508 %:n käytön kasvu selittyy ainespuumittaisen polttopuun tuonin lisääntymisenä (Ylitalo 2010).

Päätehakkuilta korjattavan latvusmassahakkeen korjuukustannukset ovat pienimmät ja harvennuksilta korjattavan kokopuuhakkeen korjuukustannukset ovat suurimmat (Hakkila 2004, Ryymin ym. 2008). Harvennuksilta korjattavan metsähakkeen kompastuskivenä on ollut sen latvusmassahaketta lähes kaksi kertaa

### 3. Metsähakkeen raaka-aineet

korkeampi tuotantokustannus, joka aiheutuu lähinnä pienpuun kalliista kaadosta ja kasauksesta. Latvusmassahakkeella tätä kustannusta ei juuri ole, koska latvusmassan kasaus voidaan hakkuukoneen työtapaa muuttamalla integroida ainespuun korjuuseen. Muissa työvaiheissa kustannuserot latvusmassahakkeen ja kokopuuhakkeen välillä ovat vähäiset. Kannoilla korjuukustannusta lisää kantojen nosto, puhdistus ja pilkonta. Latvusmassahakkeen ja harvennuspuuhakkeen kustannuseroa on kavennettu maksamalla harvennusmetsien energiapuulle korjuutukea (Ryymin ym. 2008).

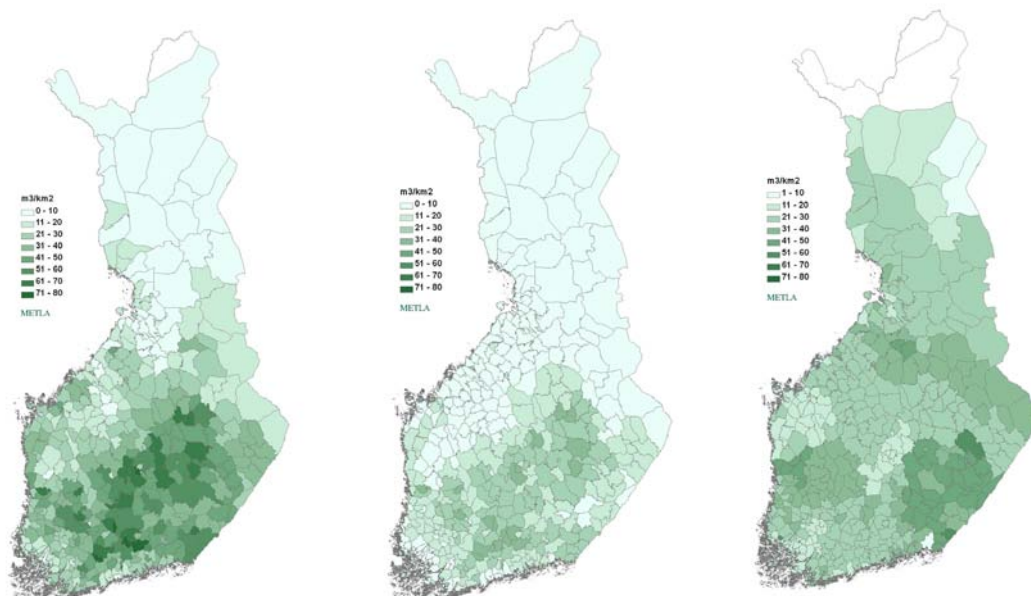
## 3.2 Metsähakkeen korjuupotentiaalit vuonna 2020

VMI-aineistojen ja vuoden 2004 markkinahakkuutilastojen pohjalta metsähakkeen vuotuiseksi tekniseksi korjuupotentiaaliksi arvioitiin 15,9 miljoonaa kiintokuutiometriä (31,8 TWh) (Helynen ym. 2007, Laitila ym. 2008a). Päätehakkuiden latvusmassan tekninen korjuupotentiaali oli laskelmien perusteella 6,5 miljoonaa kiintokuutiometriä ja kuusen kantobiomassan 2,5 miljoonaa kiintokuutiometriä vuodessa. Harvennuksilta kokopuuna korjattavan energiapuun tekninen korjuupotentiaali oli puolestaan 6,9 miljoonaa kiintokuutiometriä vuodessa. Puunhankinta ja metsäenergian hankinta ovat voimakkaasti kytköksissä toisiinsa. Vuonna 2004 tilastoitu ainespuun markkinahakkuumäärä oli 55 milj. m<sup>3</sup>.

Pöyryn ja Metsätehon selvityksessä arvioitiin vuoden 2020 metsähakepotentiaalia MELA-laskennan hakkuuskenaarioiden avulla (Kärhä ym. 2009b). Perusskenaariossa kotimaan markkinahakkuiden taso oli 56,6 milj. m<sup>3</sup> ja maksimiskenaariossa se oli 67,9 milj. m<sup>3</sup>. MELA-laskelman skenaarioissa vuoden 2020 hakkuukertymä vastasi Metsäteho Oy:n suurimpien osakkaiden hakkuiden puutavaralajijakaumaa vuosina 2006 ja 2007. Pöyryn ja Metsätehon laskennassa määriteltiin metsähakkeen kertymälle teoreettinen, teknis-ekologinen ja teknis-taloudellinen korjuupotentiaali. Perusskenaariossa metsähakkeen teoreettinen korjuupotentiaali oli 104,5 TWh ja teknis-ekologinen korjuupotentiaali oli 42,9 TWh. Maksimiskenaariossa metsähakkeen teoreettinen korjuupotentiaali oli 114,8 TWh ja teknis-ekologinen korjuupotentiaali oli puolestaan 48,3 TWh. Teknis-taloudellinen korjuupotentiaali oli perusskenaariossa 27,0 TWh ja maksimiskenaariossa se oli 29,3 TWh (Kärhä ym. 2009b). Metsähakelajeittain jaoteltuna teknis-taloudellinen korjuupotentiaali oli perusskenaariossa pienpuulla 7,4 TWh, latvusmassalla 10,3 TWh ja kannoilla 9,2 TWh. Maksimiskenaariossa teknis-taloudellinen korjuupotentiaali oli pienpuulla 6,4 TWh, latvusmassalla 12,8 TWh ja kannoilla 10,1 TWh vuodessa.

Molempien laskelmien tulokset (Helynen ym. 2007, Laitila ym. 2008a, Kärhä ym. 2009b) olivat hyvin samansuuntaiset ja merkittävin ero kertymissä koski korjattavissa olevan kantopuun määrää. Pöyryn ja Metsätehon selvityksessä korjuupotentiaaliin luettiin sekä kuusen, männyn että koivun kannot, kun taas Metlan ja VTT:n selvityksessä korjuupotentiaalissa oli mukana pelkästään kuusen kannot. Em. syystä johtuen Metlan ja VTT:n tuloksissa harvennusten pienpuulla on merkittävämpi rooli kuin Metsätehon ja Pöyryn tuloksissa. Molemmissa em. laskelmissa oli rajoitteena, että ainespuumittaista puutavaraa (rinnankorkeusläpimitta yli 10 cm) ohjautui nuorten metsien harvennuksilta energiantuotantoon enintään 20–25 m<sup>3</sup>/ha.

Päätähakkuilta korjattavan latvusmassan ja kantojen tekninen korjuupotentiaali oli suurin ns. Järvi-Suomen alueella (kuva 10). Vastaavasti nuorten metsien energiapuun suhteellinen osuus metsähakkeen teknisestä korjuupotentiaalista kasvoi siirryttäessä etelästä pohjoiseen ja idästä Pohjanmaalle päin. Kuvan 10 kuntakohtaiset kertymät laskettiin Helynen ym. 2007 ja Laitila ym. 2008a tulosten mukaan.



Kuva 10. Latvusmassan, kuuseen kantojen ja nuorten metsien energiapuun tekninen korjuupotentiaali kunnittain (Helynen ym. 2007, Laitila ym. 2008a). Karttakuvat: P. Anttila, Metla.

### 3. Metsähakkeen raaka-aineet

Anttila ym. (2009) VMI-laskelman mukaan varttuneista taimikoista ja nuorista kasvatusmetsistä olisi korjattavissa kokopuumenetelmällä aines- ja energiapuuta peräti 22,5 milj. m<sup>3</sup> vuodessa, jos kokopuun vähimmäiskertymä on 25 m<sup>3</sup>/ha ja ainespuumittaiselle puutavaralle ei aseteta hehtaarikohtaista enimmäiskertymärajoitetta. Jos varttuneiden taimikoiden ja nuorten kasvatusmetsien kokopuukertymälle asetetaan 25 m<sup>3</sup>/ha minimikertymärajoite ja ainespuumittaiselle puutavaralle 25 m<sup>3</sup>/ha enimmäiskertymärajoite, niin tekninen korjuupotentiaali on 6,9 milj. m<sup>3</sup> vuodessa eli sama kuin Helynen ym. 2007 ja Laitila ym. 2008a tuloksissa.

Tuoreimmissa Metlan MELA-laskelmissa arvioitiin aines- ja energiapuun hakkuumahdollisuuksia vuosille 2007–2016, 2017–2026 ja 2027–2036 (Salminen 2010). Em. laskelmassa harvennusten energiapuu korjattiin joko erilliskorjuuna tai yhdistettynä ainespuun korjuuseen ensiharvennuksilla. Latvusmassaa korjattiin pelkästään kuusikoiden päätehakuilta. Kantoja puolestaan nostettiin sekä kuusikoiden että männiköiden päätehakuualoilta että männiköiden siemenpuualoilta. Laskelmat tehtiin MELAlla suurimmalle kestäväälle (SK) hakkuumäärälle ja vuosina 2004–2008 toteutuneelle keskimääräiselle hakkuumäärälle (TH). Suurimman kestävän hakkuukertymän mukaisessa laskelmassa ei rajoitettu kasvun ja poistuman suhdetta, metsien ikäluokkarakennetta, uudistushakkuiden määrää, eikä edellytetty puulajeittaista kestävyyttä. Toteutuneiden hakkuiden mukainen skenaario kuvasi metsävarojen kehittymistä, jos hakkuita jatketaan viime vuosien keskimääräisellä tasolla ja hakkuupoistuma mukailee toteutunutta puutavaralajeittaista hakkuupoistumaa metsäkeskustasolla ([www.metinfo.fi](http://www.metinfo.fi) 2010).

Suurimman kestävän (SK) hakkuukertymän mukaisessa skenaariossa ainespuukertymä oli skenaariovuosina 2007–2016 70,3 milj. m<sup>3</sup>/vuosi, 2017–2026 78,4 milj. m<sup>3</sup>/vuosi ja 2027–2036 79,9 milj. m<sup>3</sup>/vuosi. Toteutuneiden hakkuiden (TH) mukainen hakkuukertymä oli 56,1 milj. m<sup>3</sup>/vuosi. Taulukkoon 5 on koottu metsähakkeen vuotuiset kertymät (milj. m<sup>3</sup>/vuosi) skenaariovuosille 2007–2016, 2017–2026 ja 2027–2036 (Salminen 2010). Skenaariotarkastelun tuloksia tarkastellessa pitää muistaa, että käytännössä puunostajat ja metsäomistajat ratkaisevat puumarkkinoilla, miten metsiä tarkastelujaksoilla hakataan ja hoidetaan. Tuloksia ei siis pidä tulkita todennäköisesti toteutuvan tulevaisuuden ennusteina tai toteutettavaksi tarkoitettuina suunnitteina (Salminen 2010). Toteutuneiden hakkuiden mukaisessa skenaariossa ainespuuhakkuiden taso oli hakkuupotentiaaliin nähden niin alhaisella tasolla, että harvennuspuuta ohjautui ainespuun sijasta energiapuuksi. Toinen vaihtoehto nykyisillä hakkuumäärillä ja hakkuupoistuman



rakenteella on, että luonnonpoistuma hoitaa osan harvennuksista ja puut pökkelöityvät harvennuksen puutteessa pystyyn.

Suurimman kestävän hakkuukertymän (SK) mukaisessa skenaariossa metsähakkeen kertymä pienenee (taulukko 5), mutta on muistettava, että merkittävä osa jalostuskäyttöön ohjautuneesta raakapuusta hyödynnetään sen toisasteisessa käytössä energian tuotannossa. Polttoaineena hyödynnettäviä prosessitähteitä syntyy sekä saha- että vaneriteollisuudessa kuin myös mekaanisessa ja kemiallisessa puumassateollisuudessa. Prosessitähteitä ovat esimerkiksi kuorintatähde, sahanpuru, seulontatähde, hiontapöly sekä mustalipeä, joka on peräisin puusta sellunkeitossa liuenneista ligniineistä, hiilihydraateista ja uuteaineista. Jopa 60 % selluteollisuuden puuraaka-aineen lämpöarvosta hyödynnetään puupolttoaineena (Hakkila 2004).

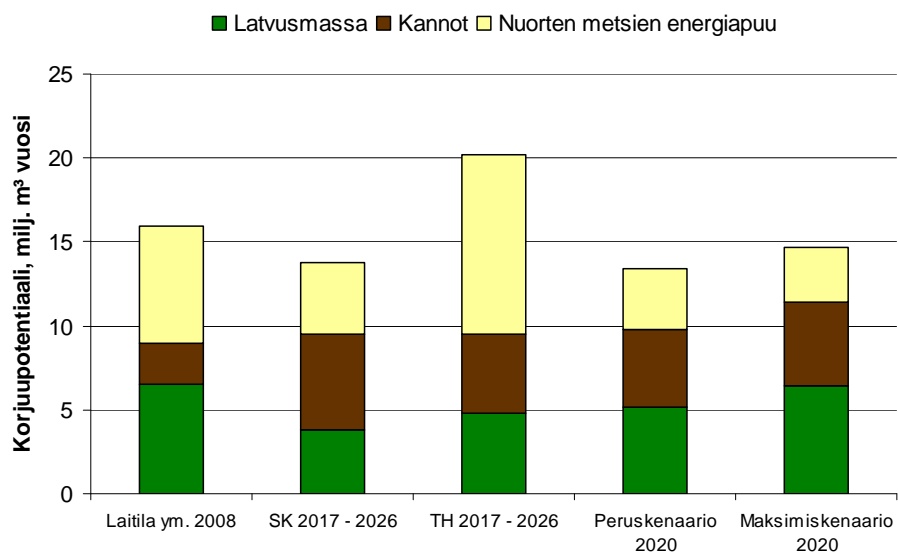
Taulukko 5. Aines- ja energiapuun hakkuukertymät suurimman kestävän (SK) ja toteutuneiden hakkuuiden (TH) mukaisissa skenaarioissa vuosille 2007–2016, 2017–2026 ja 2027–2036 (Salminen 2010).

	<b>2007–2016</b>	<b>2017–2026</b>	<b>2027–2036</b>
	<b>SK &amp; TH</b>	<b>SK &amp; TH</b>	<b>SK &amp; TH</b>
Ainespuukertymä yhteensä, milj. m <sup>3</sup>	70,3 & 56,0	78,4 & 56,1	79,9 & 56,1
Energiapuukertymä harvennuksilta, milj. m <sup>3</sup>	2,1 & 6,6	4,3 & 10,7	3,9 & 9,4
Latvusmassankertymä päätehakkuilta, milj. m <sup>3</sup>	3,7 & 4,2	3,8 & 4,8	3,4 & 4,4
Kantopuukertymä päätehakkuilta, milj. m <sup>3</sup>	7,2 & 5,7	5,7 & 4,7	5,5 & 4,3
Metsähake yhteensä, milj. m <sup>3</sup>	12,9 & 16,4	13,9 & 20,2	12,7 & 18,1

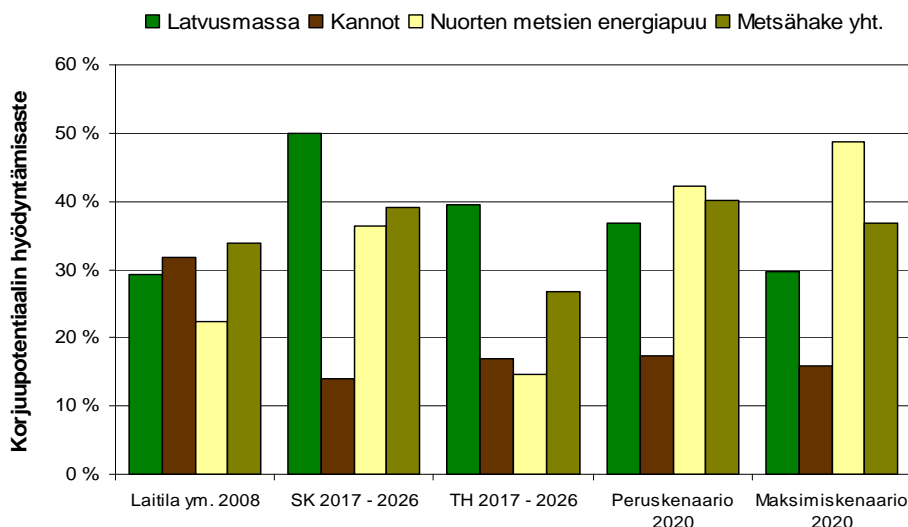
Metsähakkeen käyttötavoitteeksi lämpö- ja voimalaitoksissa on asetettu 13,5 milj. m<sup>3</sup> vuoteen 2020 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010). Verrattaisa tässä raportissa selostettuja korjuupotentiaaleja (kuva 11) metsähakkeen nykykäyttöön havaitaan, että metsähakkeen teknisestä ja teknis-taloudellisesta korjuupotentiaalista on tällä hetkellä hyödynnetty lämpö- ja voimalaitosten energiantuotannossa 27–40 % (kuva 12). Latvusmassahakkeen osalta metsähakkeen hyödyntämisaste on korkein. Tällä hetkellä 29–50 % teknisesti tai teknis-taloudellisesti korjattavissa olevassa latvusmassahakkeesta hyödynnetään energiantuotannossa. Kannoista 14–32 % on energiakäytön piirissä. Nuorten metsien energiapuun teknisestä ja teknis-taloudellisesta korjuupotentiaalista hyödynne-

### 3. Metsähakkeen raaka-aineet

tään lämpö- ja voimalaitosten energiantuotannossa laskentaperusteista riippuen 15–49 %. Kuvissa 11 ja 12 Pöyryn ja Metsätehon laskelmien (perusskenaario ja maksimiskenaario) teknis-taloudellinen korjuupotentiaali (Kärhä ym. 2009b) muutettiin tulosten vertailun helpottamiseksi kiintokuutiometreiksi kertoimella  $2 \text{ MWh} = 1 \text{ m}^3$ .



Kuva 11. Metsähakkeen tekninen ja teknis-taloudellinen korjuupotentiaali, milj. m<sup>3</sup>/vuosi (Helynen ym. 2007, Laitila ym. 2008a, Kärhä ym. 2009b, Salminen 2010).



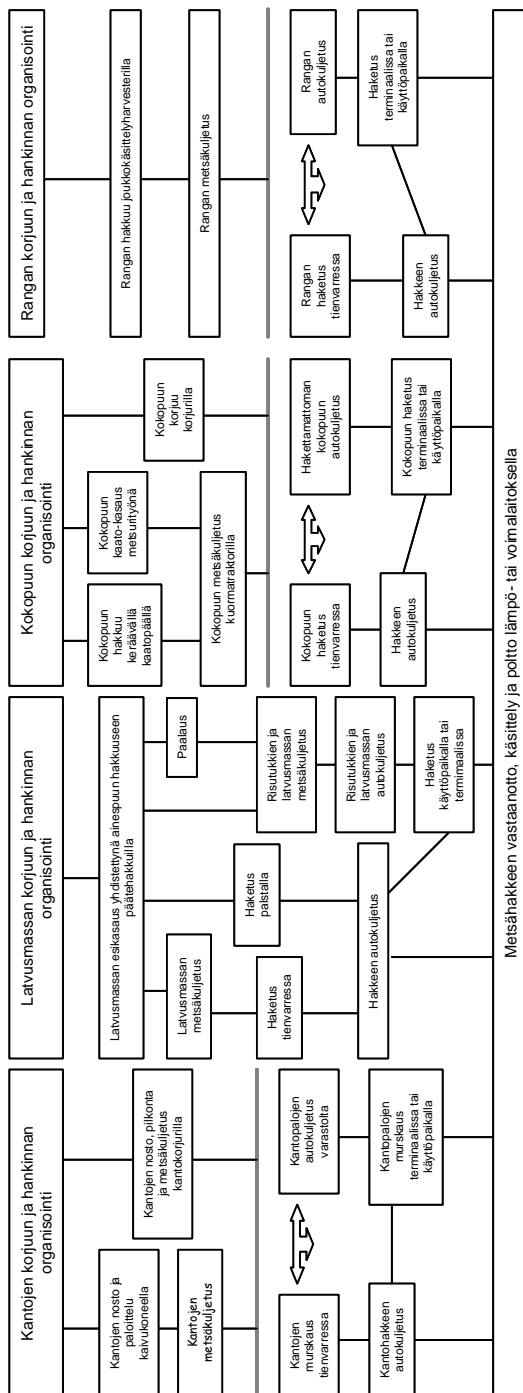
Kuva 12. Metsähakkeen korjuupotentiaalit suhteessa metsähakkeen nykykäyttöön (Helynen ym. 2007, Laitila ym. 2008a, Kärhä ym. 2009b, Salminen 2010, Ylitalo 2010).

Polttohaketta voidaan perinteisen metsäkasvatuksen lisäksi tuottaa erityisillä energiapuuviljelmillä. Tällaisia ovat mm. pelloille ja käytöstä poistuneille turvetuotantoalueille perustetut lyhytkiertoviljelmät, joilla kasvatetaan esimerkiksi pajua, koivua tai muita nopeakasvuisia lehtipuita. Tällä hetkellä energiapuuviljelmiä on perustettu pienialaisina lähinnä koetarkoituksiin. Tulevaisuudessa energiapuuviljelmiä voidaan perustaa myös turvetuotannosta vapautuville suopohjille. Turveteollisuusliiton arvion mukaan suopohjia vapautuu turvetuotannosta vuoteen 2020 mennessä noin 44 000 ha ([www.turveteollisuusliitto.fi](http://www.turveteollisuusliitto.fi)).

## 4. Metsäenergian korjuuketjut

### 4.1 Haketustavat

Metsähakkeen hankintajärjestelmä rakentuu pitkälti sen mukaan, mihin ketjun vaiheeseen haketustapahtuma sijoitetaan ja missä muodossa materiaalia sen tähden kuljetetaan (kuva 13). Metsähakkeen korjuumenetelmät voidaan jakaa haketuspaikkansa mukaan keskitetyn ja hajautetun haketuksen menetelmiin. Haketuksen keskittäminen käyttöpaikalle tai terminaaliin mahdollistaa suuret vuosituotokset, korkeat koneiden käyttöasteet ja alemmat haketuskustannukset. Menetelmällä päästään eroon ”kuumasta ketjusta”, jolloin tuotantoketjun kukin työvaihe voidaan tehdä niin tehokkaasti kuin kalustolla on mahdollista ilman turhia odotusaikoja. Jos materiaali puretaan suoraan murskaimen syöttökuljettimelle, voi odotusaikoja muodostua tässäkin hankintaketjussa. Käyttöpaikka- ja terminaalihaketusketjuissa metsäkuljetustyövaihetta seuraa tiensivastoinnin jälkeinen autokuljetustyövaihe. Käyttöpaikka- ja terminaalihaketuksen heikkoutena on se, että kuljetuksen kuormakoko jää käsittelemättömällä latvusmassalla, kokopuulla sekä kanto- ja juuripuulla pieneksi, mikä kasvattaa kuljetuksen kustannuksia etenkin kaukokuljetuksessa. Kuormakokoa on pyritty kasvattamaan tiivistämällä latvusmassa risutukeiksi, harvennuspuulla puiden karsinnalla ja määrämittaan katkonnalla sekä kanto- ja juuripuulla puuaineksen pilkkonnalla.



Kuva 13. Vaihtehtoisia metshakkeen tuotantoketjuja (Laitila 2006).

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut



Kuva 14. Biomassarekka purkamassa kantokuormaa Jämsänkosken voimalaitoksen käyttöpaikkamurskaimen syöttökuljettimelle (J. Laitila, Metla).



Kuva 15. Kantojen murskausta ja valmiin hakkeen kuormausta terminaalissa (J. Laitila, Metla).

Suurten investointikustannusten vuoksi käyttöpaikalla haketus sopii vain suurille voimalaitoksille (kuva 14). Terminaaleista (kuva 15) haketta voidaan toimittaa eri kokoluokan laitoksille, ja terminaali on toimitusvarma puskurivarasto esimerkiksi kelirikkoaikana, jolloin sivuteiden käyttö on rajoitettua raskaan liikenteen osalta. Hakkeen laatua on myös helpompi kontrolloida ja tarvittaessa märkää ja kuivaa haketta voidaan sekoittaa laadun tasaamiseksi. Hakkeen ja hakepuun käsittely terminaalissa lisäävät kustannuksia, samoin kuin mahdollinen ristiinkuljetus liikuteltaessa materiaalia ensiksi metsästä terminaaliin ja sitten terminaalista voimalaitokselle. Haketerminaalit sijaitsevat yleensä metsähakkeen käyttöpisteiden läheisyydessä tai turvesoiden yhteydessä. Terminaaleihin voidaan kuljettaa myös valmista haketta varmuusvarastoon. Terminaalitoiminta soveltuu tuotantoketjuun hyvin silloin, kun joudutaan yhdistelemään eri kaukokuljetusmuotoja (Karttunen ym. 2009). Autokuljetuksen yhdistäminen terminaalin avulla juna- tai proomukuljetukseen tuo kustannussäästöjä pitkillä kuljetusmatkoilla (Karttunen ym. 2009).

Energiapuukohteiden järetyminen ja mäntyensiharvennusten yleistyminen saattaa johtaa siihen, että kuorellisen ainespuun varastointia koskeva hyönteistuholaki ulottuu koskemaan entistä ankarammin myös harvennusmetsien energiapuuta (Viiri ja Piri 2008). Nykyisen lain mukaan syyskuun alun ja toukokuun lopun välisenä aikana hakattu ainespuumittainen havupuu on kuljetettava pois metsästä ja tienvarsivarastolta viimeistään heinä–elokuun aikana (Viiri ja Piri 2008). Kuitenkaan varastokasojen haketus ja hyvälaatuisen hakkeen käyttö päälämmityskauden ulkopuolella ei ole taloudellisesti järkevää. Lisäksi valmiin hakkeen aumavarastointi saattaa puolestaan aiheuttaa laatu- ja määrätappioita (Nurmi 2000). Em. tilanteessa energiapuun autokuljetus terminaaliin saattaa olla kokonaistaloudellisesti järkevin ratkaisu.

Hajautetun hakkeen tuotannon menetelmiä ovat välivarastolla tai palstalla tapahtuvaan haketukseen perustuvat korjuuketjut. Välivarastohaketuksessa materiaali haketetaan suoraan vieressä odottavan hakeauton kuormatilaan (kuva 16). Hakkurin ja hakeauton toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa, mikä merkitsee sitä, ettei haketusta ja kuljetusta voi limittää. Kaukokuljetusmatkasta riippuen odotusaikojä tulee joko hakkurille tai hakeautolle. Käytettäessä useampia hakeautoja hakkurin odotusaikojä voidaan vähentää, mutta silloin hakeautojen odotusajat saattavat kasvaa. Tämä ns. ”kuuma ketju” on myös altis keskeytyksille. Välivarastohaketusmenetelmässä auton kantavuus ja kuormakoko saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti, ja menetelmä on kuljetustehokas myös pitkillä kaukokuljetusmatkoilla. Välivarastohaketusjärjestelmä on hakkeen tuotannon perus-

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

ratkaisu, joka soveltuu sekä pienille että suurille käyttöpaikoille. Haketus tehdään yleensä kuorma-autoalustaisilla tai maataloustraktorisovitteisilla hakkureilla. Lisäksi käytössä on muutamia hakkuri-hakeautoja, joissa haketus- ja kaukokuljetus on integroitu samaan yksikköön



Kuva 16. Kuorma-auto alustainen hakkuri ja hakeauto (J. Laitila, Metla).

Palstahaketusketjussa haketuksen ja metsäkuljetuksen, samoin kuin joissain tapauksissa myös hakkuun, tekee yksi ja sama kone yhdellä käyntikerralla. Palstahaketuksessa metsätraktorin alustalle rakennettu hakkuri (kuva 17) liikkuu ajouria pitkin energiapuukasalta toiselle, hakettaa materiaalin ja kuljettaa valmiin hakkeen tienvarteen. Normaaliin metsäkoneeseen verrattuna palstahakkuri on kalliimpi ja painavampi ja sen vuoksi metsäkuljetusmatkojen on oltava lyhyitä, samaten kuin maapohjan on oltava kantavaa ja tasaista. Kone on myös vika- ja vaurioherkkä, mikä osaltaan nostaa menetelmällä tuotetun hakkeen tuotantokustannuksia. Palstahaketuksella tuotetun hakkeen määrä onkin erittäin pieni ja korjuumenetelmällä on enää korkeintaan paikallista merkitystä metsähakkeen tuotannossa.





Kuva 17. Palstahakkuri hakettamassa latvusmassaa kuusikon pätehakkuualalla (J. Laitila, Metla).

Vuonna 2009 latvusmassahakkeen tuotannosta yli 60 % perustui välivarastolla haketukseen ja terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli vajaa 10 %. Vajaa kolmannes energiantuotantoon käytetystä latvusmassasta haketettiin käyttöpaikalla (Kärhä 2010). Kantohakkeen tuotannosta lähes 70 % perustui käyttöpaikalla murskaukseen ja vajaa kolmannes kannoista murskattiin terminaaleissa. Pieniä määriä kantoja murskattiin myös tienvarsivarastoilla. Harvennuspuuhakkeen tuotannossa välivarastohaketuksen osuus oli lähes 80 % kokonaismäärästä. Terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli 16 % ja käyttöpaikalla haketettiin 5 % (Kärhä 2010). Metsätehon tutkimuksen mukaan (Kärhä 2007a) käyttöpaikalla tai terminaalissa tuotetun metsähakkeen suhteellinen osuus tulee kasvamaan ja välivarastohaketusmenetelmän valta-asema pienenemään. Muutokset tuotantomenetelmien suhteellisissa osuuksissa eivät kuitenkaan ole kovin suuria. Samassa tutkimuksessa metsähakkeen tuottajat lisäksi arvioivat, että vuonna 2015 nuorisista metsistä korjatun energiapuun osuus on 27 %, kanto- ja juuripuuhakkeen 24 % ja latvusmassahakkeen 43 % energialaitosten käyttämästä metsähakkeesta. Metsähakkeen kokonaiskäytön vuonna 2015 tuottajat arvioivat olevan runsaat 14 TWh (Kärhä 2007a) eli noin 7 miljoonaa kiintokuutiometriä vuodessa.

### 4.2 Autokuljetus

Energiapuun ja metsähakkeen kaukokuljetuksessa oli vuonna 2007 käytössä lähes 200 ajoneuvoyksikköä, joista kaksi kolmasosaa oli hakeautoja (Kärhä 2007b). Hakeautokalustosta arviolta noin kaksi kolmannesta on täysperävaihtolava- ja vaihtolava-autoyhdistelmiä (kuva 16) ja noin kolmannes vaihtolava-autoyhdistelmiä (Asikainen ym. 2001). Runsasta kolmasosaa hakeautoista käytetään metsähakkeen ajon ohella turpeen ja teollisuuden puusivutuotteiden kuljetuksessa. Hakettamattoman metsäbiomassan autokuljetukseen käytetään puutavara-autoja, jotka on varustettu laidoilla ja pohjalla (kuva 18). Risutukkien autokuljetukseen käytetään normaaleja puutavara-autoja (kuva 19) tai paalattua materiaalia kuljetetaan samalla autokalustoilla kuin kantoja, kokopuuta tai irtonaista latvusmassaa (kuva 18).



Kuva 18. Hakettamattoman metsäbiomassan kaukokuljetuksessa käytettävä ajoneuvoyhdistelmä (J. Laitila, Metla).



Kuva 19. Vakiorakenteinen puutavara-auto, jolla voidaan kuljettaa perinteisen ainespuun ohella latvusmassa- ja kokopuupaaleja sekä karsittua rankaa (J. Laitila, Metla).

### 4.3 Alus- ja junakuljetukset

Liikennepolttoaineiden hintojen nousu ohjaa yrityksiä hakemaan entistä päästö- ja energiataloudellisempia ratkaisuja kuljetuslogistiikkaan ja EU:n kuljetussäännökset kannustavat siirtämään kuljetuksia maanteiltä muille väylille. Metsähakkeen käyttömäärien kasvu merkitsee, että kuljetusmatkat kasvavat tulevaisuudessa. NykYTEKNIKALLA ja toimintatavoilla taloudellisesti kannattava metsähakkeen hankinta-alueen säde on noin 100–150 km tieverkkoa pitkin. Perinteisen autokuljetuksen avulla, ilman autokuorman enimmäispainorajan nostoa, ei juurikaan voida laajentaa metsähakkeen taloudellisesti kannattavaa hankinta-aluetta voimalaitoksen ympärillä (Karttunen ym. 2008). Lisäksi tienvarsihaketukseen perustuvan toimitusketjun tehokkuus kärsii kuljetusmatkojen kasvaessa joko hakkurin tai autojen odotusaikojen lisääntyessä. Lisäksi metsähakkeen kuljetukseen tarvitaan aiempaa enemmän autokalustoa ja kuljettajia (Korpinen ym. 2010). Rautatie- ja vesitiekuljetukset ovat myös ympäristöystävällisempiä ja energiataloudellisesti edullisempia kuin autokuljetukset pitkillä kuljetusmatkoilla (Karttunen ym. 2008, Hiltunen 2010).

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

Tehdyn selvityksen mukaan (Karttunen ja Korpilahti 2009) vesikuljetusreittien varrella olevien voimalaitosten metsäenergian käyttö on lähes 4 milj. irtoha-kekuutiometriä vuodessa. Biomassajalostamo investointi Saimaan vesistöalueelle nostaisi metsähakkeen käytön 6,5 miljoonaan hakekuutiometriin vuodessa. Kuljetussuoritteena em. hakemäärä vastaa 55 000 hakerekkakuormaa vuodessa (Karttunen ja Korpilahti 2009). LTY:n tekemissä aluskuljetuskokeiluissa proomukuljetuksen kannattavuus on osoittautunut ennakkoarviota paremmaksi (Karttunen ym. 2008). Päätehakkuiden latvusmassasta tehdyllä metsähakkeella logistiikkakustannukset ovat kilpailukykyiset, kun verrataan tuloksia voimalaitosten keskimääräiseen metsähakkeen korjuukustannukseen käyttöpaikalla (Karttunen ym. 2008). Muiden metsähakelajien osalta kokonaiskustannukset ovat vielä liian korkeat nykyisiin voimalaitoshintoihin nähden.

Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetuksessa on mahdollista käyttää puunkorjuussa käytettäviä kansilasti- ja ruumaproomuja ja nykyisten proomujen kuljetuskapasiteettia on mahdollista parantaa lisälaitojen ja hakkeen tiivistämisen avulla (Karttunen ym. 2008). Aluskuljetuksen hyötyjä ovat pieni työvoiman tarve, kuljetustehokkuus yli 100 km etäisyyksillä, toimitusvarmuus ja pienet CO<sup>2</sup>-päästöt. Heikkouksia ovat huono kustannuskilpailukyky alle 100 km:n kuljetusmatkoilla, metsähakkeen lastauspaikkojen rajallinen määrä vesikuljetusreittien varrella, hakkeen lastaus ja purkukustannukset satamissa, käytännössä vesitiekuljetus on mahdollista vain talvikauden ulkopuolella, proomujen saatavuus ja lisäksi se, että aluskuljetus vaatii suuret vuotuiset hankintamäärät (Karttunen ym. 2008, Karttunen ja Korpilahti 2009). Proomussa kulkee kerralla metsähaketta noin 3 000–5 000 irtokuutiometriä, eli noin 24–40 hakerekka-autokuorman verran (Ranta 2010).

Junakuljetuksia käytetään lähinnä risutukkien kuljetukseen Alholmens Kraftin voimalaitokselle Pietarsaareen. Risutukkien kuljetuskustannukset ovat samalla tasolla teollisuuden ainespuun kuljetuskustannusten kanssa (Korpilahti 2008). VR Cargo on toistaiseksi ainoa junakuljetusten operoija Suomessa ja sen käytössä on noin 3 000 puutavaravaunua. Keski-Suomessa on kokeiltu kantomurskeen ja hakettamattomien kantojen junakuljetuksia Rauhalahden voimalaitokselle. Raideliikenteessä hakevaunun tilavuus on 140 m<sup>3</sup> ja junakuljetuksen koko on metsähakekuljetuksissa yleensä 10–20 vaunua (Ranta 2010). Hakevaunun kantavuus on 60 tonnia ja hakettamattomilla kannoilla vaunun kantavuudesta jää hyödyntämättä 30–40 tonnia. Hakkeen kuljetuksessa hyötykuorma on noin 40–50 tonnia (Ranta 2010). Junakuljetuksia rajoittavat sopivien terminaali-alueiden puute, rajattu loppuasiakkaiden määrä (voimalaitoksille ei ole kiskoyhteyttä)

sekä kilpailun puute rautatiemarkkinoilla ja vaunukaluston saatavuus (Ranta 2010).

Ruotsissa tutkittiin hakkeen kuormausta junaan pyöräkoneilla ja materiaalin-käsittelykoneilla sekä hakekonttien käsittelyä ja junaan kuormausta trukeilla (Enström 2009, Enström 2010). Ruotsalaisten tulosten mukaan hakkeen junakuljetus on hakkeen autokuljetukseen verrattuna edullisempaa, kun kaukokuljetusmatka on vähintään 150 km (Enström 2009).

### 4.4 Materiaalin vastaanotto

Hakkeen vastaanottojärjestelyt määräävät kuljetuskaluston viipymisajan käyttöpaikalla ja tämä vaikuttaa sitä kautta koko ketjun tuottavuuteen ja toimivuuteen. Hakkeen vastaanotossa lämpö- tai voimalaitoksella ongelmia aiheuttavat hidas läpimenoaika, pienet varastotilat tai -kentät sekä jonotukset purkupaikalle. Hakeautot tyhjentävät kuormansa varastosiiloihin sivu- tai peräkipillä tai peräpurkuna. Hakettamattomat materiaalit puolestaan puretaan joko auton omalla kuormaimella tai vastaanottoaseman laitteilla suoraan murskaimen syöttöpöydälle tai varastokentälle. Kuljetusten ajo-ohjelmat muuttuvat nopeassa tempossa säätilan vaihtelun ja laitoksella tuotettavan energian muutosten mukaan. Kaikilla käyttöpaikoilla ei ole käytössä aikataulutusta. Samoin punnitus, purkupaikan järjestelyt ja näytteenotto kaipaavat kehittämistä. Lisäksi samoja mittaus- ja purkupalveluja käyttävät eri materiaalien toimitusautot, jolloin eri materiaalivirrat ja polttoaineseosten säätelyt vaikuttavat toisiinsa. Toimitusten tarkka aikataulutus ei käytännössä kuitenkaan ole järkevää, sillä kuljetuksiin vaikuttavat tekijät, kuten sääolot tekevät tarkan saapumisen ohjauksen lähes mahdottomaksi. Suurin hetkellisiin polttoaineen vastaanoton kuormituksiin, kuten aamuruuhkiin, aikataulutuksella on kuitenkin järkevää vaikuttaa (Ranta ym. 2002).

### 4.5 Metsähakkeen korjuun toiminnan ohjaus

Silloin kun energiapuun hankinta on sidottu osaksi teollisuuden puunkorjuuta, korjuun ja kuljetusten ohjauksessa hyödynnetään pääosin samoja oston, korjuun ja kuljetusten ohjauksen tietojärjestelmiä kuin ainespuun hankinnan ohjauksessa (Asikainen ym. 2001). Polttohakeyryyksillä investointimahdollisuudet kalliisiin tietojärjestelmiin ovat rajalliset ja toisaalta toimintojen ohjaus on yksinkertaisempaa kuin ainespuun hankinnassa. Metsähakkeen korjuussa hyödynnetäänkin

## 4. Metsäenergian korjuuketjut

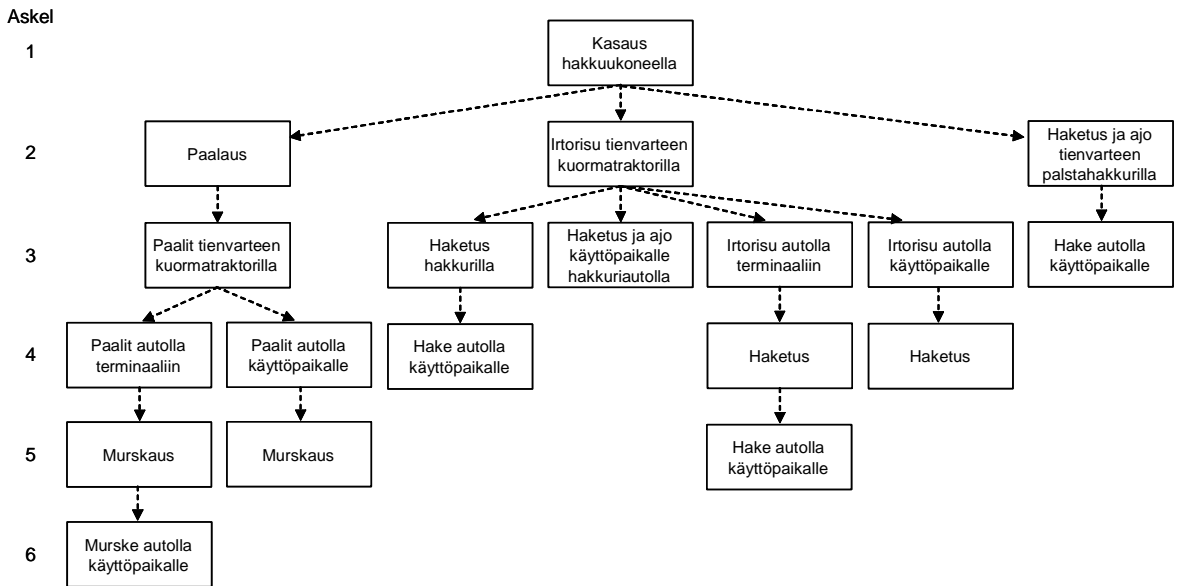
paljon internetpohjaisia paikkatieto-ohjelmistoja sekä perinteisiä paperikarttoja. Tietoa välitetään toimijoiden välillä matkapuhelinten avulla (Seppänen ym. 2008). Energiapuun hankinnassa hallittava tietomäärä on suuri ja tiedonhallinnassa korostuu oikea-aikaisuus (Seppänen ym. 2008). Energiapuuvarastot on haketettava oikeaan aikaan hakkeen laadun varmistamiseksi ja hake on toimitettava oikea-aikaisesti oikeisiin käyttökohteisiin. Varastojen pitää lisäksi olla saatavissa keliolosuhteiden puolesta. Toimitusvarmuus on hakkeen loppukäyttäjän kannalta tärkeä kriteeri hakkeen toimittajaa valittaessa. Pääomaa sitoutuu varastoihin ja tämä asettaa laadun ohella omat vaatimuksensa varastojen kierto-nopeudelle (Seppänen ym. 2008). Hankinnan operatiivisen toiminnan suunnittelun kannalta oleellista on, että hankintaketjuun osallistuvat toimijat saavat tiedot työkohteista hyvissä ajoin. Haketustyössä oman haasteensa aiheuttaa epätasaisesti jakautuva työmäärä. Pakkaskausina koneilla ja kuljetuskalustolla on palava kiire, kun taas kesäkuukausina ongelmana on työn puute.

### 4.6 Latvusmassan korjuu

Latvusmassahakkeen tuotannossa on menetelmästä riippuen 4–6 päätyövaihetta (kuva 20) ja korjuu alkaa oksien ja latvusten kasauksesta ainespuun hakkuun yhteydessä. Hakkuukoneen työtapaa muutetaan niin, että oksat ja latvat kasautuvat hakkuu-uran varteen (kuva 21), kun normaalissa työtavassa oksat ja latvat on pyritty keräämään ajouralle suojaamaan maaperää ja parantamaan kantavuutta (Asikainen ym. 2001). Kasoille hakkuussa on kaksi työtekniikkaa. Yksipuoleisessa kasoihin hakkuussa latvusmassa kasautuu koneen toiselle sivulle pitkänomaisiin kasamuodostelmiin ja kaksipuoleisessa hakkuutavassa ajouran molemmille puolille yksittäisiksi kasoiksi. Latvusmassan kasoille hakkuu parantaa materiaalin taiteensaantoa, tehostaa korjuutyötä ja ehkäisee kivien ja kivennäis-  
maan joutumista latvusmassan joukkoon.

## 4. Metsäenergian korjuuketjut

### Latvusmassahakkeen tuotantoketjut



Kuva 20. Latvusmassahakkeen tuotantoketjut päätyövaiheittain (Hakkila 2006).



Kuva 21. Latvusmassan esikasaus yhdistettynä ainespuun hakkuuseen (J. Laitila, Metla).

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

Latvusmassan kasoille hakkuu ei välttämättä vähennä ainespuun hakkuun tuottavuutta, mikäli työmenetelmä on kuljettajalle tuttu. Ongelmaksi on koettu ainespuurungon käsittely normaalia kauempana hakkuukoneen ohjaamosta sekä ainespuun tilanpuute hakkuu-uran varressa. Mikäli puutavaralajeja on paljon ja latvusmassa kerätään talteen, vaikeutuu puutavaralajien erillään pitäminen ja niiden sijoitteluun käytettävä ajanmenekki kasvaa (Jäkälä ja Mäkinen 2000). Ajourien varressa olevat latvusmassakaset voivat vähentää ainespuun metsäkuljetusvaiheen tuottavuutta erityisesti kuormausvaiheen osalta, jos ainespuupölkkyt ovat normaalia kauempana ajouran reunasta. Suora näköyhteys ohjaamosta heikkenee ja puut pitää kuormata pitkällä puomilla. Latvusmassan sivullepuinti vaikuttaa myös ajokoneen ajonopeuteen sekä kuormakokoon erityisesti työmaila, joilla heikko kantavuus hankaloittaa metsäkuljetusta. Ajonopeudet laskevat ja kuormakoot pienenevät, jos hakkuutähteitä ei ole ajourilla lisäämässä kantavuutta tai tasaamassa maaston epätasaisuuksia (Oijala ym. 1999).

Latvusmassa kuljetetaan välivarastolle töiden organisointitavasta ja kalustosta riippuen joko samalla kertaa ainespuun kuljetuksen yhteydessä tai erillisellä työmaakäynnillä. Metsäkuljetukseen käytetään joko samaa metsätraktoria kuin ainespuun metsäkuljetuksessa tai erillistä latvusmassan kuljetukseen varusteltua metsätraktoria (Kuva 22). Perusratkaisuksi on muodostunut laajennetulla kuormatilalla varusteltu metsätraktori, jossa normaali puutavarakoura on korvattu puutavarakouraa muistuttavalla hakkuutähddekouralla. Hakkuutähddekouran piikit uppoavat puutavarakouraa paremmin latvusmassaan eikä piikkien mukana nouse kovin herkästi maa-ainesta. Hakkuukoneen ja metsätraktorin työrytmitys ei yleensä mahdollista metsätraktorin käyttöä ainespuun korjuun ohella latvusmassan ajossa. Erillistä käyntiä puoltaa myös palstavarastoinnin mahdollisuus kesäkorjuussa, jonka avulla latvusmassa on nopeasti kuivattavissa siten, että osa neulasista varisee korjuualalle. Latvusmassan metsäkuljetukseen voidaan käyttää myös metsätraktoria, joka muokkaa maan latvusmassan metsäkuljetuksen yhteydessä (kuva 22). Yhdistelmäkoneella maanmuokkauksen ja latvusmassan korjuu niveltyvät toisiinsa ja työvaiheiden yhdistäminen lisää koneen tuottavuutta. Lisäksi koneen käyttöaste kasvaa ja siirtokustannukset pienenevät, kun samalla koneella voidaan tehdä kaksi työtä yhdellä käyntikerralla (Laitila ja Asikainen 2002). Tienvarteen kuljetettu latvusmassa haketetaan joko tienvarressa tai se kuljetaan terminaaliin tai käyttöpaikalle haketettavaksi. Suuren neulaspitoisuuden ja siitä aiheutuvien kuiva-ainetappioiden vuoksi latvusmassan varastointiaika on korkeintaan yksi vuosi.





Kuva 22. Kuivahtaneen latvusmassan metsäkuljetusta yhdistelmäkoneella, jolla voidaan muokata uudistusala latvusmassan metsäkuljetuksen yhteydessä (K. Väätäinen, Metla).



Kuva 23. Latvusmassan paalausta risutukeiksi hakkuutähdepaalaimella (J. Laitila, Metla).

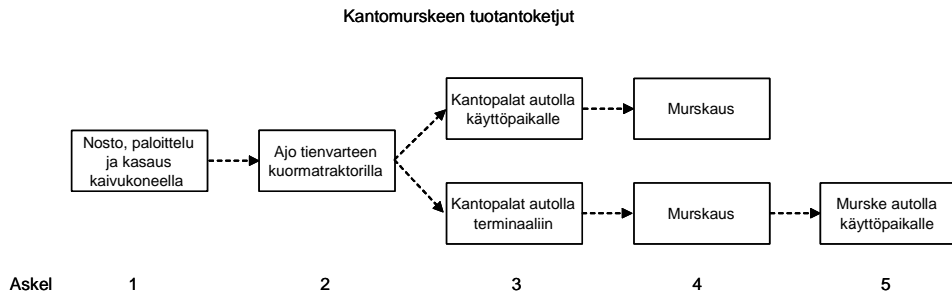
#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

Latvusmassahakkeen tuotannossa voidaan myös käyttää ns. risutukkimenetelmää, jossa latvusmassa tiivistetään halkaisijaltaan 70 cm paksuiksi ja noin kolme metrisiksi risutukeiksi (kuva 23). Latvusmassan tiivistyslaite on asennettu kuormatraktorin alustalle ja paalainkone liikkuu palstalla hakkuutähdekasalta toiselle. Laitteen toiminta on automatisoitu niin, että kuljettajan tehtäväksi jää vain hakkuutähteen kuormaus syöttöpöydälle. Syöttöpöydältä syöttörullat ahtavat materiaalia elementtiin, jossa se tiivistetään hydraulisylierien avulla. Siitä eteenpäin matka jatkuu sykesyötöllä. Sykkeiden lomaan liittyy sidontanarun pyöritys ja risutukin määrämittaan katkaisu. Risutukit kuljetetaan tienvarsivarastolle normaalilla kuormatraktorilla, josta ne edelleen kuljetetaan terminaalissa tai käyttöpaikalla haketettaviksi. Latvusmassan paalauksella pyritään parantamaan tehokkuutta ja joustavuutta hankintaketjun eri osavaiheissa etenkin suurilla hankintamäärillä ja pitkillä kaukokuljetusmatkoilla. Suuret hyötykuormat sekä metsä- että kaukokuljetuksessa merkitsevät kustannussäästöjä. Risutukkeihin perustuva menetelmä on kuitenkin kilpailukykyinen vain, jos em. logistiset näkökohdat ja kustannussäästöt ketjun muissa vaiheissa kattavat tiivistämisen kustannukset (Korpilahti ja Poikela 1997). Vuonna 2009 paalausmenetelmän osuus latvusmassahakkeen tuotannosta oli 10 % (Kärhä 2010).

#### 4.7 Kantojen korjuu

Kantojen korjuussa päätyövaiheita on 4–5 (kuva 24). Kannot nostetaan, pilkootaan ja kasataan kaivukoneilla, joissa kauhan tilalla on joko kanto-hara tai kanto-puun nosto- ja pilkontalaite (kuva 25). Maanmuokkaus on usein liitetty osaksi kantojen nosto, pilkonta ja kasaustyövaihetta. Kantojen korjuukohteet ovat pääte-hakkuukuusikoita ja kantojen metsäkuljetuksessa (kuva 26) käytetään samaa kalustoa kuin irtonaisen latvusmassan metsäkuljetuksessa. Kantojen korjuun etenee puunkorjuun ja latvusmassan korjuun sekä metsänuudistamistöiden asettamisessa aikarajoissa. Kantojen nostotyö rajoittuu käytännössä niille kuukausille, jolloin maa on roudaton ja lumeton. Metsäkuljetus sen sijaan on mahdollista myös talvella, kunhan palstalla olevat kannot on kasattu lumen alta erottuviin kasoihin. Kantopalojen kiinnijäätyminen voi jonkin verran vaikeuttaa kuormaus-ta ja lisätä hakkuualalle jäävän kantu-puun määrää. Kantoja varastoidaan tienvarsivarastolla yleensä vähintään vuoden verran, jolloin ne kuivuvat ja osittain myös puhdistuvat kantopaloihin tarttuneesta maa-aineksesta. Tienvarsivarastoilta kannot kuljetaan murskattavaksi joko terminaaliin tai suoraan käyttöpaikalle. Vuonna 2007 kantojen nostossa oli runsaat 100 tela-alustaista, noin 20 tonnin

painoista kaivukonetta (Kärhä 2007b). Kantoja voidaan nostaa myös metsäkoneisiin asennettavilla pilkontakourilla, mutta em. laitteiden tuottavuus on osoittautunut huomattavasti pienemmäksi kuin kaivukonealustaisilla nostokoneilla (Laitila 2010). Lisäksi korjuukustannukset ovat metsäkoneen kalliimmasta hankintahinnasta johtuen huomattavasti korkeammat kuin kaivukoneella.



Kuva 24. Kantomurskeen tuotantoketjut päätyövaiheittain (Hakkila 2006).



Kuva 25. Kantojen nostoa ja maanmuokkausta kantoharalla (J. Laitila, Metla).

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut



Kuva 26. Kantojen metsäkuljetusta metsätraktorilla (J. Laitila, Metla).

#### 4.8 Nuorten metsien energiapuun erilliskorjuu

Nuorten metsien energiapuun korjuun koneellistaminen on edennyt nopeasti. Vielä 2000-luvun alussa hakkuutyö tehtiin vielä pääosin metsurityönä, mutta nykyään lähes kokonaan koneellisesti. Hakkuu voi olla liitetty osaksi ainespuuhakkuuta tai työ tehdään erilliskorjuuna irrallaan teollisuuden puunkorjuusta. Harvennuksilta lämpö- ja voimalaitoksille ohjautuva puu on valtaosin karsimantonta kokopuuta.

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut



Kuva 27. Kokopuun kaato-kasausta keräävällä energiapuukouralla (J. Laitila, Metla).



Kuva 28. Energiapuukorjuri avaamassa ajouraa energiapusavotalla (J. Laitila, Metla).

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

Koneellisessa pienpuun korjuussa kaato-kasaus tehdään keräilevällä kaatopäällä tai työhön voidaan käyttää joukkokäsittelylaittein varusteltua normaalia hakkuulaitetta (Heikkilä ym. 2005). Puiden kouraan keräilyllä ja joukkokäsittelyllä vähennetään kouran ja puomin liikkeitä sekä parannetaan koneen tuottavuutta verrattuna yksinpuin käsittelyyn. Puiden katkaisu tapahtuu leikkaavalla terällä tai ketjusahalla. Kaato-kasauskoneen peruskoneena on harvennuksille soveltuva kevyt tai keskiraskas hakkuukone (kuva 27). Koneellisessa pienpuun korjuussa voidaan käyttää myös yhdistelmäkoneita eli korjureita, jossa sama kone hoitaa sekä pienpuun kaato-kasauksen että metsäkuljetuksen (kuva 28). Korjureiden kilpailukyky perustuu hakkuutyön suureen määrään suhteessa metsäkuljetukseen sekä siirtokustannusten pienuuteen verrattuna kahden koneen ketjuihin. Nuorten metsien energiapuun lähikuljetus tienvarteen tehdään harvennuksille soveltuvilla metsätraktoreilla (kuva 29). Varastoinnin ja kuivumisen jälkeen rungot haketaan tienvarressa kaukokuljetusta varten tai ne kuljetetaan hakettamattomina terminaaliin tai käyttöpaikalle. Harvennuspuuhakkeen tuotannossa käytetään samaa kalustoa ja toimitusketjuja kuin latvusmassahakkeen tuotannossa. Harvennuspuun varastointiaika on yleensä vuosi, mutta puuta voidaan varastoida myös ylivuotisena, koska varastoinnin kuiva-aine tappiot ovat huomattavasti pienemmät kuin latvusmassalla.



Kuva 29. Kokopuukuorman purkua tienvarsivarastolla (J. Laitila, Metla).

Energiapuun korjuu karsittuna on yksi mahdollinen korjuuvaihtoehto kokopuuna korjuun ohella. Markkinoilla on useita joukkokäsittelyyn ja puiden karsintaan soveltuvia hakkuulaitteita (kuva 30). Laitteet myös mahdollistavat hakkuukoneiden joustavan käytön varsinaisissa ainespuuhakkuissa ja energiapuuharvennuk- sissa ilman kahden erillisen hakkuulaitteen investointikustannuksia. Energiapuita käsiteltäessä voidaan karsivilla hakkuulaitteilla jättää palstalle haluttu määrä oksamassaa työn tuottavuuden säilyessä silti suhteellisen hyvänä (Heikkilä ym. 2005, Laitila ym. 2010).



Kuva 30. Joukkokäsittelylaittein varustettu TJ 745 hakkuulaite, jolla voidaan korjata sekä aines- että energiapuuta, joko kokopuuna tai karsittuna, erilliskorjuuna tai integroituna korjuuna (J. Laitila, Metla).

Karsitun rangan (kuva 31) korjuukustannukset ovat keskimäärin noin 23 % suuremmat kuin kokopuuna korjuun kustannukset (Heikkilä ym. 2005, Laitila ym. 2010). Kustannusero johtuu hakkuun tuottavuuserosta ja korjuukustannusten ero pienenee puiden järeyden kasvaessa. Karsinta on järkevintä kohteissa, joissa korjattavien puiden läpimitta on luokkaa 9–13 cm ja rungon koko 30–70 dm<sup>3</sup>. Lehtipuuvaltaisissa kohteissa karsinta alentaa tuottavuutta vähemmän kuin männiköissä. Tämä johtuu pääosin siitä, että tiheissä lehtipuuvaltaisissa metsissä karsinta pudottaa kertymää vähemmän kuin männiköissä. Lisäksi lähes oksattomien runkojen karsinta on tehokasta ja usein oksattoman puutavaran hakkaami-

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

seksi riittää vain latvatupsun katkaisu. Rangan metsäkuljetus oli jonkin verran kokopuun kuljetusta tehokkaampaa ja kustannukset ovat rangalla 13 % pienemmät kuin kokopuulla. Ero johtuu suurelta osin kuormakoon kasvusta kuljetettaessa karsittua puuta. Rankana korjuussa on myös mahdollista saada kustannussäästöjä ja lisätä metsähakkeen kertymää, mikäli energiapuun karsinnan avulla korjuu voidaan ulottaa niille kohteille, joilta kokopuuna korjuuta on pyritty mahdollisten kasvuhäiriöiden ja -tappioiden vuoksi välttämään. Tällaisia kohteita ovat nykyisten korjuusuositusten mukaan mm. kuusikot, turvemaat ja karut kivennäismaat (Heikkilä ym. 2005, Laitila ym. 2010).



Kuva 31. Karsittua rankaa kuivumassa tienvarsivarastolla (J. Laitila, Metla.)

Energiapuun hakkuussa oli vuonna 2007 lähes 200 hakkuukonetta ja valtaosaa koneista käytettiin energiapuuhakkuun ohella myös ainespuuhakkuussa (Kärhä 2007b). Yli puolessa koneista normaali hakkuulaite oli muunneltu lisälaitteilla energiapuun korjuuseen sopivaksi. Vajaassa puolessa koneista hakkuulaite oli vaihdettu energiapuun hakkuun ajaksi keräävään kaatokasauslaitteeseen. Kaatokasauslaitteiden etuna on, että ne ovat halvempia kuin normaalit hakkuulaitteet. Tämä johtuu lähinnä niiden pelkistetystä rakenteesta ja tekniikasta. Hakkulaitteiden käyttöä puoltaa se, että muutaman tuhannen euron lisälaitteinvestoinnilla jo olemassa oleva laite voidaan muuntaa toiseen työlajiin sopivaksi. Kantojen,

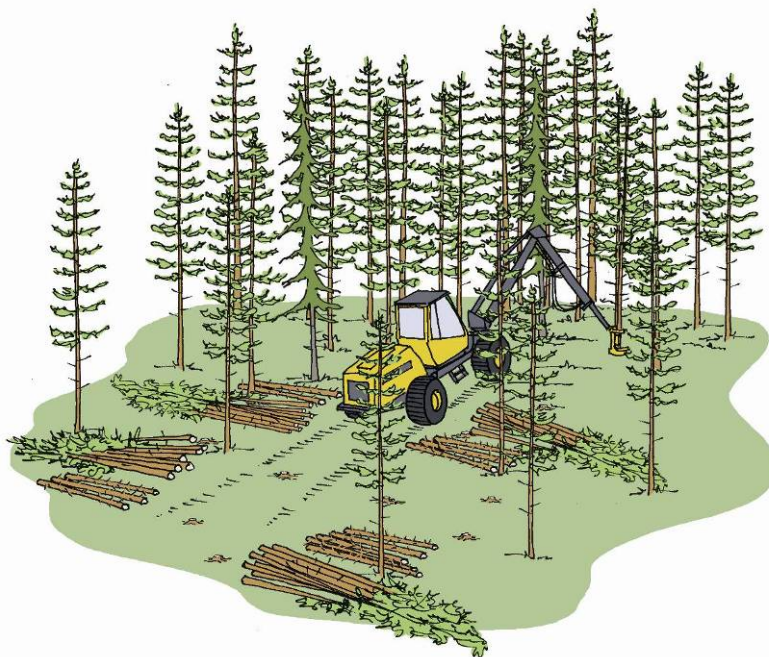


latvusmassan ja kokopuun metsäkuljetuksessa oli vuonna 2007 yli 300 keskiras-kasta tai raskasta kuormatraktoria. Viidesosaa koneista käytettiin yksinomaan energiapuun metsäkuljetukseen. Valtaosalle energiapuun metsäkuljetus oli sivu-työtä ainespuun kuljetuksen ohessa. Korjureita oli energiapuun korjuussa arviol-ta 50 kappaletta vuonna 2007 (Kärhä 2007b).

### **4.9 Aines- ja energiapuun integroitu korjuu**

Ensiharvennusleimikoilla on nopeasti yleistynyt puunkorjuutapa, jossa korjataan samalla kertaa sekä aines- että energiapuuta (Kärhä ym. 2009a). Korjuun tai hankinnan integroinnilla on tarkoitus päästä pienempiin kokonaishankintakus-tannuksiin kuin aines- ja energiapuujakeiden erillishankinnassa ja samalla laa-jentaa metsähakkeen raaka-ainepohjaa perinteisten ainespuuharvennusten puo-lle. Integroitua puunkorjuuta voidaan tehdä kahdella tapaa. Yleisin menetelmä on ns. kahden kasan menetelmä, jossa ainespuu hakataan omaan kasaansa ja latvat sekä ainespuuksi kelpaamaton harvennuspuu omaan kasaansa joko karsit-tuna tai oksineen (kuva 32). Metsäkuljetuksen jälkeen ainespuuosite ohjautuu kuiduttavan metsäteollisuuden käyttöön ja energiapuuosite energian tuotantoon perinteisten metsähakkeen haketus- ja kuljetusketjujen kautta. Integroidun kor-juun ehdoton edellytys on, että hakkuulaitteessa on sekä joukkokäsittely- että karsintaominaisuus (kuva 30). Pienten runkojen kouraan keräily tehostaa hak-kuutyötä ja teollisuuden ainespuun yleiset laatuvaatimukset edellyttävät kui-tuositteen karsintaa. Käytännössä nykyään kaikkiin markkinoilla oleviin harves-terikouriin on saatavilla keräilytoiminto joko lisälaitteen tai ohjelmistopäivityk-sen avulla. Tutkimuksen mukaan (Kärhä ja Mutikainen 2008) kahden kasan hakkuutavalla tuottavuus on noin 10 % alempi kuin kokopuun hakkuussa ensi-harvennuksella. Aines- ja energiapuun kertymään voidaan vaikuttaa muuttamalla kuitupuun katkopituuksia, laatuvaatimuksia ja latvaläpimittoja markkinatilanteen ja korjuuolosuhteiden mukaan.

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut

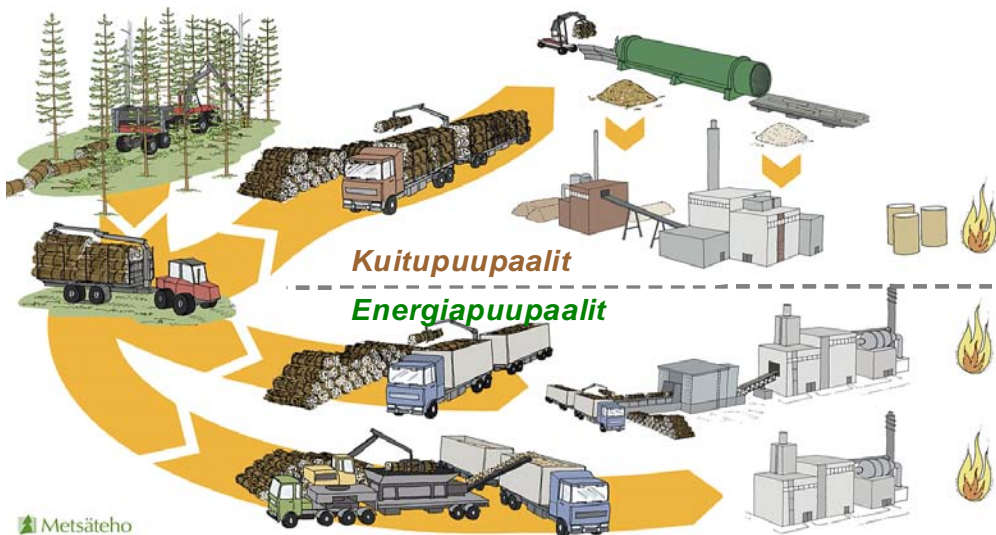


Kuva 32. Integroitu aines- ja energiapuun hakkuu kahden kasan menetelmällä. Piirros: Juha Varhi, © Metsäteho Oy



Kuva 33. Fixteri II -kokopuupalain. (J. Laitila, Metla).

Toinen tapa aines- ja energiapuun integroituun korjuuseen on joukkokäsittely-hakkuuta ja paalaustekniikkaa hyödyntävä ns. Fixteri menetelmä (kuva 33). Uudessa korjuumenetelmässä ainespuumittaiset puut kootaan oksineen tiiviiksi paaleiksi. Paalit kuljetetaan sellutehtaan kuorimoon, jossa aines- ja energiajakeet erollaan toisistaan (Kärhä ym. 2009a, kuva 34). Lisäksi ainespuuksi kelpaamattomat rungot voidaan hakkuun yhteydessä paalata omaksi puutavaralajikseen ja toimittaa suoraan energiantuotantoon voimalaitokselle tai terminaaliin. Kuljetukseen voidaan käyttää vakiorakenteista metsä- ja kaukokuljetuskalustoa sekä junia (kuva 35). Paalien pituus on keskimäärin 2,7 metriä, halkaisija 65 cm ja kiintotilavuus 0,5 m<sup>3</sup>. Kehitetty uusi menetelmä soveltuu teollisuuden suurimittakaavaisen puunhankintaan ja sen kilpailukyky perustuu pääasiassa lähi- ja kaukokuljetuksessa saavutettaviin kustannussäästöihin sekä siihen, että energiaosittien haketusvaihe yhdistetään ainespuun rumpukuorintaan (Kärhä ym. 2009a).



Kuva 34. Prosessikuvaus kokopuun paalaus -tuotantoketjusta. Piirros: Juha Varhi, © Metsäteho Oy.

#### 4. Metsäenergian korjuuketjut



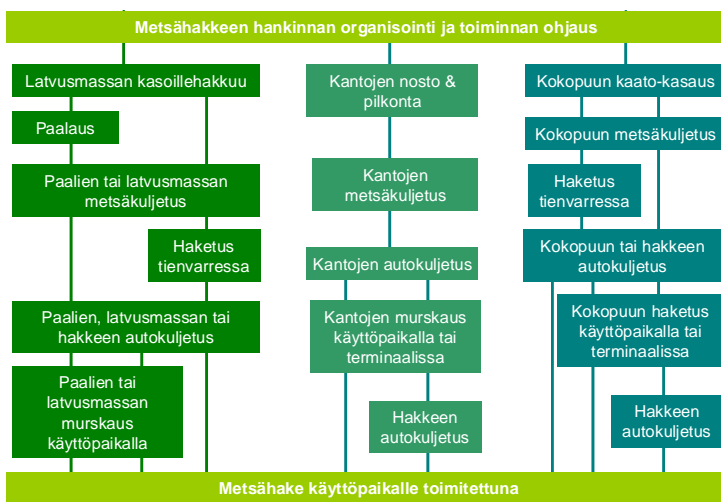
Kuva 35. Kokopuupaalien kuormausta puutavara-autosta puutavarajunan kyytiin (J. Laitila, Metla).

Metlan ja Metsätehon tutkimuksessa (Kärhä ym. 2009a) laskettiin kokopuun paalaus-tuotantoketjun kustannukset ja niitä verrattiin vaihtoehtoisten tuotantoketjujen kustannuksiin pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun aines- ja energiapuun hankinnassa. Matalimmat kuitupuun hankintakustannukset saavutettiin aines- ja energiapuun integroidussa hankinnassa kahden kasan menetelmällä. Integroidussa hankinnassa myös kokopuuhakkeen kokonaiskustannukset olivat kilpailukykyiset. Energiapuupaaleista tehdyn polttohakkeen hankintakustannukset olivat selvästi korkeammat kuin erilliskorjatun tai integroidusti korjatun kokopuuhakkeen hankintakustannukset. Pieniläpimittaisen harvennuspuun korjuussa korjuumenetelmien väliset erot ratkaistaan hakkuuvaiheessa, jossa syntynyttä kustannuseroa on vaikea kuroa kiinni, etenkin kun operoidaan kohtuullisilla metsä- ja kaukokuljetusmatkoilla.

Tehdyt vertailulaskelmat osoittivat, että kokopuun paalaus-tuotantoketju on sitä kilpailukyysisempi, mitä pienirunkoisempaa korjattava ensiharvennuskuutupuun on (Kärhä ym. 2009a). Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että kokopuun paalauksen optimaalinen toiminta-alue on ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7–10 cm. Kokopuun paalauksen suhteellinen vahvuus on nimenomaan kuitu- ja energiapuun yhdistetyssä hankinnassa. Tehdyt kustannuslaskelmat osoittivat, että kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky pelkän energiapuun hankinnassa on heikko.

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne

Metsähakkeen korjuukustannukset laskettiin työvaiheittain eri metsähakelajeille ja korjuuketjuille. Vertailulaskelmassa mukana olleet korjuuketjut ja niiden eri työvaiheet on esitetty kuvassa 36. Latvusmassahakkeella korjuukustannukset laskettiin sekä tienvarsihaketuksen että risutukkien ja irtolatvusmassan käyttöpaikkahaketuksen perustuvilla korjuuketjuille. Kantomurskeella toimitusketju perustui joko terminaalissa tai käyttöpaikalla murskaukseen ja kannot nostettiin kaivukoneella, jossa oli pilkontalaitte. Terminaalissa kannot murskattiin siirrettävällä murskaimella ja käyttöpaikalla kiinteällä murskaimella. Nuorten metsien energiapuu hakattiin hakkuukoneella, joka oli varustettu keräävällä kaatopäällä. Kokopuiden haketus tehtiin joko tienvarsivarastolla, terminaalissa tai käyttöpaikalla. Terminaalihaketuksessa työ tehtiin autoalustaisella rumpuhakurilla ja käyttöpaikalla kiinteällä murskaimella.



Kuva 36. Metsähakkeen korjuukustannuslaskelmassa mukana olevat korjuuketjut.

### 5.1 Koneiden käyttötuntilaskennan laskentaperusteet

Metsähakkeen korjuukustannuslaskenta aloitettiin määrittelemällä korjuukoneiden käyttötuntikustannukset. Koneiden kustannuslaskenta perustui yleisesti käytettyyn metsäkoneiden kustannuslaskentatapaan, jossa koneiden kiinteät pääomakustannukset yms. jaettiin koneen käyttöajalle (vuosille) ja muuttuvat käyttö- ja palkkakustannukset laskettiin kustannuksiin suoraan vuotuisen käyttötuntimäärän perusteella. Laskelmassa koneiden vuotuinen käyttöaika oli 2 600 tuntia ja koneiden pitoaika ennen vaihtoa oli 12 000 käyttötuntia. Kaivukoneella vuotuinen käyttöaika oli kantojen korjuun kausiluonteisuudesta johtuen 1 400 tuntia vuodessa. Laskentakorko oli 6 % ja koneiden jälleenmyyntiarvo vaihdossa oli 40 % uushankintahinnasta. Koneiden, laitteiden ja kuljetuskaluston hinnat koottiin valmistajilta ja jälleenmyyjiltä puhelinhaastatteluna. Palkkakustannukset, vakuutus- ja huoltokustannukset samoin kuin palkka- ja sosiaalikustannukset saatiin Koneyrittäjien Liitto ry:ltä ja Metsäalan Kuljetusyrittäjät ry:ltä. Tiedot koneiden polttoaineen kulutuksesta perustuivat valmistajien ilmoittamiin tietoihin, aikaisempiin tutkimustuloksiin (Asikainen ym. 2001) tai Koneyrittäjien Liitto ry:ltä tai Metsäalan Kuljetusyrittäjät ry:ltä saatuihin tietoihin vuodelta 2008.

Taulukkoon 6 on koottu tiedot koneiden hankintahinnoista, toiminnallisesta käyttöasteista sekä lasketuista käyttötuntikustannuksista. Kaukokuljetusajoneuvoilla käyttötuntikustannus laskettiin erikseen ajolle sekä kuorman teolle ja purkamiselle. Kantojen murskauskustannukset siirrettävällä murskaimella, samoin kuin valmiin hakkeen kuormauskustannukset terminaalissa, saatiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston koordinoiman ”Terminaalitoimintoihin perustuvan metsäpolttoaineiden hankintalogistiikkajärjestelmän kehittäminen” -hankkeen tuloksista (Ala-Fossi Antti, LTY, suullinen tiedonanto 2007). Käyttöpaikkamurskaimen käyttötuntilaskelmassa kiinteän murskainaseman pitoaika oli 10 vuotta ja vuotuinen poisto oli 30 % vuodessa.

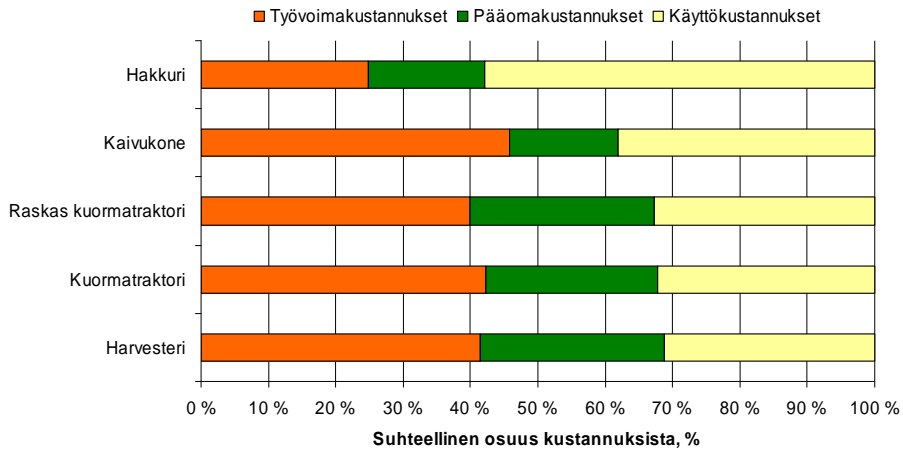
## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne

Taulukko 6. Käyttötuntikustannusten laskennassa käytetyt arvot.

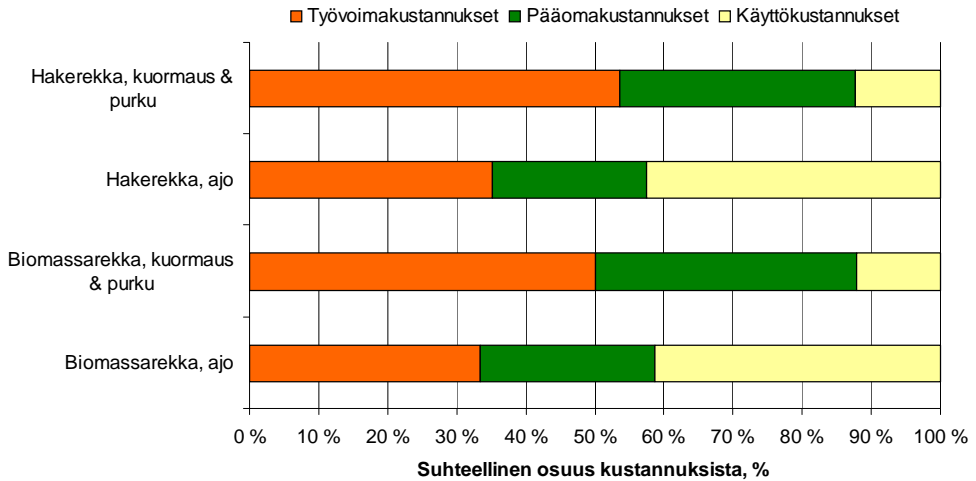
Kone- tai autotyyppi	Hinta, € (Alv 0%)	Toiminnallinen käyttöaste, %	Käyttötuntikustannus, €/h
Harvesteri	285 000	80	71,0
Kuormatraktori	225 000	85	60,0
Raskas kuormatraktori	255 000	85	63,5
Paalain	395 000	84	77,8
Kaivukone	109 000	88	56,0
Laidoilla varustettu rekka	278 000	90	
- Ajo			77,0
- Kuormaus & purku			51,0
Hakerekka	232 000	90	
- Ajo			72,0
- Kuormaus & purku			47,0
Puutavararekka	223 000	90	
- Ajo			75,0
- Kuormaus & purku			48,0
Autoalustainen hakkuri	400 000		
- Tienvarsihaketus		65	154,0
Käyttöpaikkamurskain	1 000 000	6500 h/vuosi	5,9 €/m <sup>3</sup> tai 4,5 €/m <sup>3</sup> 389,0 2,5 €/m <sup>3</sup>

Käyttötuntikustannuksia laskettaessa kustannukset jaettiin työvoimakustannuksiin, pääomakustannuksiin ja käyttökustannuksiin (kuva 37 ja 38). Pääomakustannuksiin luettiin pääoman poistot ja korot. Käyttökustannukset muodostuivat pääasiassa polttoainekustannuksista, huolto- ja korjauskustannuksista sekä vakuutusmaksuista. Palkkakustannuksiin sisältyivät työntekijän palkat ja sivukustannukset sekä yrittäjän voitto. Kaukokuljetuskaluston ajotuntikustannusten ja kuormaus- ja purkukustannusten laskennassa polttoainekulut jyvitetiin kokonaisuudessaan ajotuntikustannuksiin ja laskelmassa keskimääräinen autokuljetusmatka oli 45 kilometriä.

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne



Kuva 37. Työkoneiden kustannusrakenne (Ryymän ym. 2008).



Kuva 38. Kaukokuljetuskalusto kustannusrakenne (Ryymän ym. 2008).

Työkoneilla työvoimakustannusten osuus kokonaiskustannuksista vaihteli kaivukoneen 46 %:n ja välivarastohakkurin 25 %:n välillä (kuva 37). Kaukokuljetuksessa palkkakustannukset olivat 50–54 % kuormattaessa ja purettaessa ja 33–35 % ajossa (kuva 38). Työkoneilla pääomakustannusten osuus oli 17–27 % ja kuljetuskalustolla 22–38 %. Hakkurilla käyttökustannusten osuus oli suuresta polttoaineen kulutuksesta johtuen 58 % kokonaiskustannuksista. Autokuljetuk-



sessä käyttökustannusten osuus oli ajossa 41–43 % ja kuormaus- ja purkutyövaiheissa 12 %. Kaivukoneella käyttökustannukset olivat 38 % kokonaiskustannuksista. Metsäkoneilla käyttökustannukset olivat 31–33 %. Hakkuutähdepaalaimen kustannusrakenne oli samanlainen kuin hakkuukoneen kustannusrakenne ja vakiorakenteisen puutavara-auton kustannusrakenne muistutti biomassarekan kustannusrakennetta.

### 5.2 Korjuukustannusten laskentaperusteet

Metsähakkeen hankinnan organisointikustannukseksi oletettiin laskelmassa 3,51 €/m<sup>3</sup>, mikä vastaa tehtaalle toimitetun kotimaisen raakapuun hankinnan yleiskustannustasoa vuonna 2009 (Kariniemi 2010). Latvusmassan kasoille hakkuun kustannus oli 0,3 €/m<sup>3</sup>. Latvusmassan paalauksen tuottavuus oli 20 risutukkia käyttötunnissa ja risutukin kiintotilavuus oli 0,55 m<sup>3</sup>. Kantojen noston ja paloittelun tuottavuus perustui ajanmenekkimalliin, jossa 17,5 tonnin kaivukone oli varustettu kantojen nosto- ja pilkontalaitteella (Laitila ym. 2008b, Laitila ym. 2007a) ja nostotyön yhteydessä tehtiin uudistusalan maanmuokkaus. Maanmuokkaustyöstä ei saatu erillistä korvausta. Yhdistetyn maanmuokkauksen ja kantojen noston tehotuntituottavuus muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,1 (taulukko 7). Laskelmassa kantojen noston tuottavuus oli 10,3 m<sup>3</sup> käyttötunnissa.

Nuorten metsien energiapuun hakkuun tuottavuudet perustuivat keräävällä energiapuukouralla varustetun harvennusharvesterin ajanmenekkimalleihin (Laitila ym. 2004) ja em. mallin tehoajanmenekit muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,3 (taulukko 7). Laskelmassa hakkuutyön tuottavuus 30 litran keskitilavuudella oli 5,3 m<sup>3</sup> käyttötunnissa. Latvusmassan, risutukkien, nuorten metsien energiapuun sekä kantojen metsäkuljetuksen tuottavuudet perustuivat metsäkuljetuksen ajanmenekkimalleihin (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2007b, Laitila ym. 2008b) ja tehotuntituottavuudet muutettiin käyttötuntituottavuuksiksi kertoimella 1,2 (taulukko 7). Kokopuun metsäkuljetus tehtiin keskiraskaalla kuormatraktorilla, jonka kuormakoko oli 6,0 m<sup>3</sup>. Latvusmassalla, risutukeilla ja kannoilla kuormakoot olivat 7,8, 11,0 ja 8,6 m<sup>3</sup> ja kuljetustyö tehtiin raskaalla kuormatraktorilla (taulukko 7).

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne

Taulukko 7. Metsäkuljetuksen, hakkuun, paalauksen ja kantojen noston kustannusten laskennassa käytetyt arvot.

Materiaali	Kuormakoko, metsäkulj. m <sup>3</sup>	Käyttötuntikerroin: metsäkuljetuksessa	Käyttötuntikerroin: hakkuu tai nosto	Tilavuus, dm <sup>3</sup> kokopuu tai kannot
Kokopuu	6,0	1,2	1,3	30
Latvusmassa	7,8	1,2	-	-
Kannot	8,6	1,2	1,1	170 (lpm 37 cm)

Autokuljetuksen kuormattuna ja tyhjänä ajon ajanmenekki laskettiin Rannan (2002) ajanmenekkimalleilla kuljetusmatkan mukaan. Hakettamattomien kantojen, latvusmassan ja kokopuun kaukokuljetukseen käytettiin laskelmassa puutavara-autoa, joka oli varustettu laidoilla ja pohjalla ja jonka kuormakoko oli 30 m<sup>3</sup> (taulukko 8). Latvusmassa- ja kokopuuhakkeen kaukokuljetukseen tienvarsivarastolta tai hakkeen kuljetukseen terminaalista käytettiin täysperävaunullista hake-autoyhdistelmää, jonka kuormakoko oli 44 m<sup>3</sup> (taulukko 8). Hakkeen kaukokuljetuksessa kuormausaika on kytköksissä hakkurin tuottavuuteen, joka tässä laskelmassa oli latvusmassan haketuksessa 65 i-m<sup>3</sup>/h ja kokopuun haketuksessa 85 i-m<sup>3</sup>/h. Taulukossa 8 on eritelty kuormaus ja purkuajat eri metsähakelajeilla ja ajoneuvotyypeillä.

Latvusmassahakkeen haketuskustannus tienvarsivarastolla oli 5,9 €/m<sup>3</sup> (taulukko 9). Nuorten metsien energiapuulla tienvarsihaketuksen kustannus oli paremmasta haketuustuottavuudesta johtuen 4,5 €/m<sup>3</sup>. Kantojen murskauskustannus siirrettävällä murskaimella oli 7,0 €/m<sup>3</sup> ja hakkeen kuormauskustannus pyöräkuormajalla oli terminaalissa 0,9 €/m<sup>3</sup> (Ryymin ym. 2008). Kokopuun haketuskustannus terminaalissa oli laskelmassa 3,3 €/m<sup>3</sup>. Metlan tutkimuksen mukaan (Laitila ja Väättäinen 2010) autoalustaisen rumpuhakkurin käyttötuntikustannus terminaalihaketuksessa on 94 % tienvarsihaketuksen käyttötuntikustannuksesta ja haketuksen käyttötuntituottavuus terminaalissa on 1,29-kertainen tienvarsihaketuksen tuottavuuteen verrattuna (Laitila 2008). Käyttöpaikalla haketuksessa kustannuksen oletettiin olevan sama kaikille materiaaleille (2,5 €/m<sup>3</sup>).

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne

Taulukko 8. Kaukokuljetuskustannusten laskennassa käytetyt arvot.

Kuljetettava materiaali	Kuormakoko, m <sup>3</sup>	Kuormanteko aika, h	Purku- & apuajat, h
Kokopuu hake	44	1,30	0,5 & 0,3
Latvusmassahake	44	1,70	0,5 & 0,3
Kokopuu	30	1,00	0,5 & 0,3
Latvusmassa	30	1,40	0,5 & 0,3
Kannot	30	1,40	0,5 & 0,3
Risutukki	45 (82 kpl)	0,80	0,3 & 0,3
Hake terminaalista	44	0,37	0,5 & 0,3

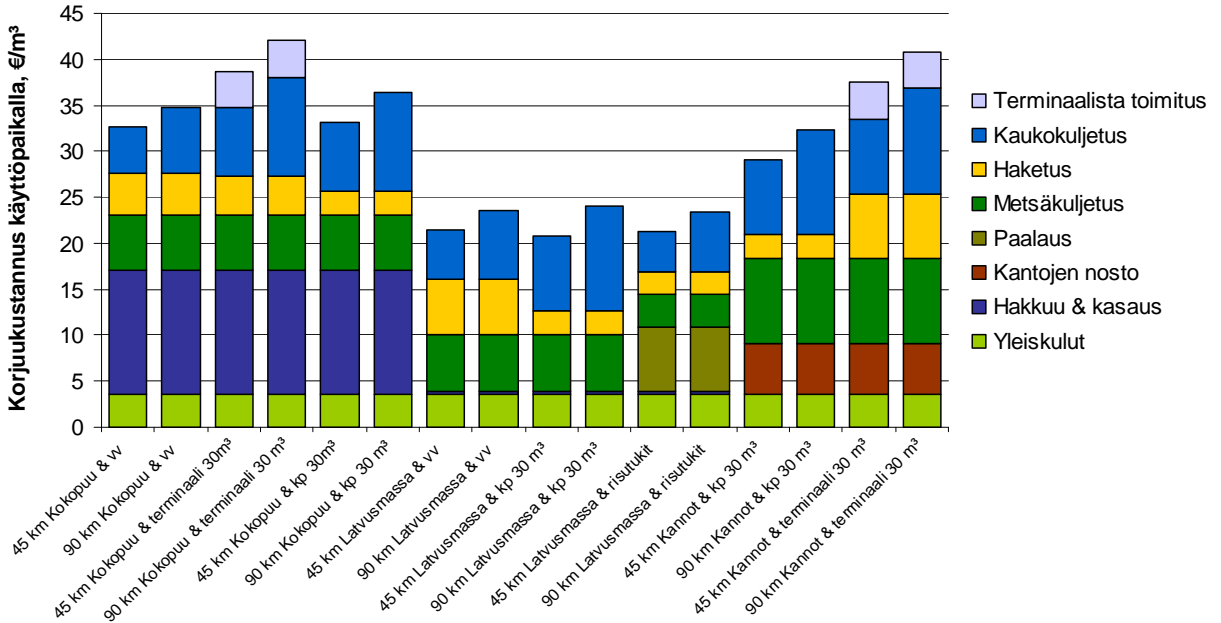
Taulukko 9. Eri materiaalien haketus kustannukset tienvarressa tai terminaalissa. Käyttöpaikkamurskauksessa kustannus oli sama kaikille materiaaleille: 2,5 €/m<sup>3</sup>.

	Latvusmassa	Kokopuu	Kannot
Haketuskustannus, €/m <sup>3</sup>	5,9	4,5 & 3,3	7,0

### 5.3 Metsähakkeen kustannusrakenne ja korjuukustannus käyttöpaikalla

Latvusmassan, kokopuun ja kantohakkeen kustannusrakenne eri toimitusketjuilla selvitettiin esimerkkileimikoiden avulla, joissa metsäkuljetusmatka oli 250 m ja kaukokuljetusmatka 45 tai 90 km. Hakkeen kuljetusmatka terminaalista lämpö- tai voimalaitokselle oli 10 km. Nuorten metsien energiapuun hakkuussa hakkuupoistuma oli 2 000 runkoa hehtaarilta ja poistettavien puiden keskikoko oli 30 litraa. Kantojen korjuussa kuusenkantojen keskiläpimitta oli 37 cm (= 170 litraa) ja nostettavia kantoja oli 500 kappaletta hehtaarilla. Latvusmassan ja nuorten metsien energiapuun kertymä hehtaarilta oli 60 m<sup>3</sup> ja kantopuulla hehtaarikertymä oli 85 m<sup>3</sup>.

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne



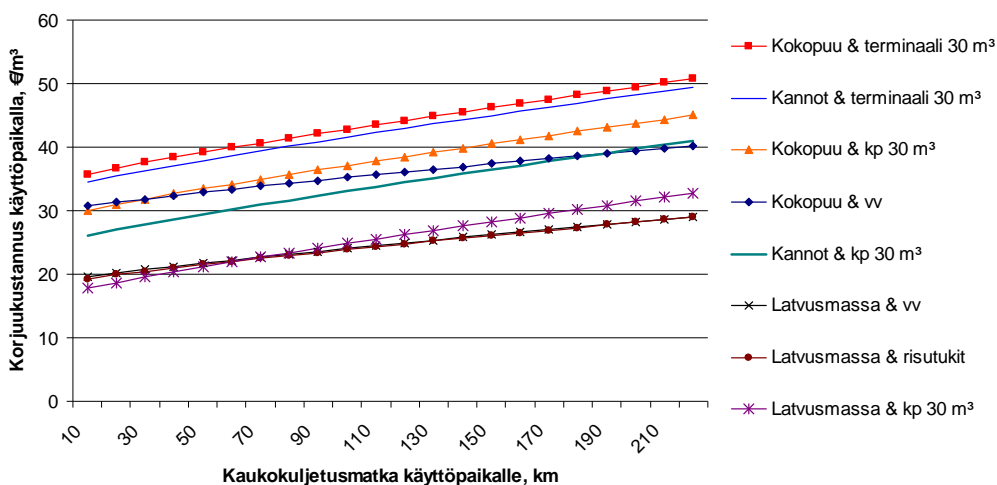
Kuva 39. Metsähakkeen kustannusrakenne eri korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla. Kuvatekstissä vv = välivarastohaketus ja kp = käyttöpaikkahaketus.

Nuorten metsien energiapuun korjuukustannus tienvarressa, organisointikulut mukaan lukien, oli 23,1 €/m<sup>3</sup>. Hakkuun kustannus oli 13,5 €/m<sup>3</sup> ja pienpuun metsäkuljetuksen 6,1 €/m<sup>3</sup> (kuva 39). Risutukkimenetelmällä korjatun latvusmassan korjuukustannus tienvarressa oli 14,1 €/m<sup>3</sup> ja paalaamattoman latvusmassan 10,1 €/m<sup>3</sup>. Latvusmassan kasoihin hakkuun kustannus oli 0,3 €/m<sup>3</sup> ja paalaamattoman latvusmassan metsäkuljetuksen kustannus 6,2 €/m<sup>3</sup>. Paalauksen kustannus oli 6,9 €/m<sup>3</sup> ja paalien metsäkuljetuksen kustannus 3,5 €/m<sup>3</sup>. Kantojen korjuun kustannus tienvarressa oli 18,4 €/m<sup>3</sup>. Kustannuksista kantojen noston ja paloittelun osuus oli 5,4 €/m<sup>3</sup> ja metsäkuljetuksen osuus 9,4 €/m<sup>3</sup> (kuva 39). Organisointikustannusten oletettiin olevan samat (3,51 €/m<sup>3</sup>) kaikilla korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla. Aiemmissä tutkimuksissa risutukkimenetelmälle on käytetty alemmaa organisaatiokustannusta kuin muilla menetelmillä (Asikainen ym. 2001). Hakkeen käsittely ja kuljetuskustannus terminaalista käyttöpaikalle oli myös sama kaikilla metsähakelajeilla. Hakkeen kuormauskustannus terminaalisissa oli 0,9 €/m<sup>3</sup> ja kuljetuskustannus terminaalista käyttöpaikalle oli 3,1 €/m<sup>3</sup> (10 km:n kuljetusmatka).

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne

Latvusmassahakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla oli eri korjuumenetelmillä 20,7–21,4 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 45 km ja 23,4–24,1 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 90 km. Kantohakkeella korjuukustannus käyttöpaikalla oli 29,0–37,5 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 45 km ja 32,4–40,8 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 90 km. Kokopuuhakkeen korjuukustannus oli menetelmästä riippuen 32,6–37,7 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 45 km. Kun kaukokuljetusmatka oli 90 km, niin kokopuuhakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla oli 34,8–41,1 €/m<sup>3</sup> (kuva 39).

Latvusmassan käyttöpaikkahaketus oli edullisin korjuuketju 60 kilometrin kaukokuljetusmatkaan saakka, kun korjuuketjuja verrattiin kaukokuljetusmatkan mukaan (kuva 40). Sitä pidemmällä autokuljetusmatkoilla risutukkimenetelmä oli kustannustehokkain korjuuketju latvusmassahakkeen tuotannossa. Vastaavassa vertailussa latvusmassan käyttöpaikkahaketusketjun ja tienvarsihaketusketjun kustannuskäyrät leikkasivat 70–80 km kaukokuljetusmatkan kohdalla (kuva 40). Välivarastohaketusketjun ja risutukkimenetelmällä tuotetun latvusmassahakkeen tuotantokustannukset olivat likimain samalla tasolla. Vertailun perusteella välivarastolla haketetun latvusmassahakkeen korjuukustannus oli käyttöpaikalla 0,10–0,30 €/m<sup>3</sup> korkeampi kuin risutukkimenetelmällä tuotetun hakkeen (kuva 40).



Kuva 40. Metsähakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla kaukokuljetusmatkan mukaan eri korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla.

## 5. Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne

Kokopuun käyttöpaikkahaketus oli edullisin kokopuuhakkeen tuotantomenetelmä alle 30 km:n kaukokuljetusmatkoilla ja välivarastolla haketus sitä pidemmillä kuljetusmatkoilla. Kantohakkeen korjuukustannukset olivat kokopuuhakkeen korjuukustannuksia pienemmät aina 200 km:n kaukokuljetusmatkaan saakka, kun kannot murskattiin käyttöpaikalla. Terminaalihaketukseen perustuvalla korjuumenetelmällä hakkeen tuotantokustannukset olivat vertailun korkeimmat (kuva 40).

## 6. Energiapuun lyhytkiertoviljely

Lyhytkiertoviljelyllä tarkoitetaan nopeakasvuisten puulajien intensiivistä viljelyä, jonka tavoitteena on maksimoida puubiomassan tuotos esimerkiksi energiaksi lyhyttä kasvatuskiertoaikaa käyttäen. Viljeltävät puuvartiset kasvit ovat lehtipuita, esimerkiksi pajuja, joilla on hyvä vesomiskyky ja tuhonkestävyys sekä mielellään myös kyky juurtua puutuneista pistokkaista. Laaja-alaisessa käytännön toiminnassa istutus ja biomassan korjuu tehdään koneellisesti

Pajujen lisäksi muita lyhytkiertoviljelyyn pajuja pidemmällä kiertoajoilla sopivia puita ovat mm. haapa ja leppä. Luonnonmetsissä aktiivista energiapuun kasvatusta (vesametsäkasvatus tai sen variaatiot) voidaan ajatella tehtävän myös hieskoivulla, joka sopii turvemaille.

Suomessa energiapuun lyhytkiertoviljely on keskittynyt pajun kasvatukseen, jota on tutkittu aina 1970-luvulta lähtien. Pajun kasvatus ei ole lähtenyt liikkeelle Ruotsiin tapaan, missä pajua viljellään noin 15 000 hehtaarin alalla. Suomessa pajua viljellään tällä hetkellä muutaman kymmenen hehtaarin alueella. Kiinnostus lyhytkiertoviljelyyn on Suomessa viime aikoina lisääntynyt niin pajun kuin myös muiden puulajien osalta. Tässä nähdään mahdollisuus tuottaa teollisesti pelkästään energiapuuta.

### 6.1 Lyhytkiertoviljely Euroopassa

Skandinaviassa ja Brittein saarilla paju on pääasiallinen lyhytkiertoviljelty puulaji. Keski-Euroopassa lyhytkiertoviljellään poppelia ja Välimeren alueella vaalekasiaa. Pajun viljelystä eniten kokemusta on Ruotsissa. Keski- ja Etelä-Ruotsissa pajun viljelyala vuonna 2008 oli noin 15 000 hehtaaria. Ruotsalainen hakepajun viljelymenetelmä on viety Englannin ja Slovakian lisäksi Ranskaan, Saksaan, Tanskaan, Puolaan ja Baltian maihin. Slovakiassa pajun viljelyala on

## 6. Energiapuun lyhytkiertoviljely

noin 300 ha, Englannissa 3 000 ha (Pohjonen 2010). Romaniassa pajua viljellään 20 400 hehtaarin alalla, Puolassa 2 000 hehtaarin alalla (FAO 2008).

### 6.2 Lyhytkiertoviljely Suomessa

Suomessa kaupallista pajun viljelyä ei ole. Pajun viljelyala Suomessa energia-kasvina on 10–15 hehtaaria. Viljelyssä pyritään käyttämään kotimaisia pajulajeja. Itä-Suomen yliopiston Siikasalmen pajukasvatustutkimuksissa tuottavimmaksi kotimaiseksi pajulajiksi Pohjois-Karjalassa on osoittautunut *Salix schwerinii*-lajin klooni. Energiapajun kustannustehokas tuotanto tapahtuu 10 000–20 000 pistokkaalla per hehtaari. Kuiva-ainesadot ovat olleet 6–8 tn/ha vuodessa ensimmäisen kiertoajan (4 v) aikana ja 8–14 tn/ha vuodessa toisen korjuukiertoajan aikana. Koeviljelmää on lannoitettu 2 kertaa 20 vuoden koejakson aikana. Koikeissa neljä vuotta on osoittautunut maksimaalisen kokonaistuotoksen korjuukiertoajaksi.

### 6.3 Pajun korjuunteknologia

Ruotsi on ollut pajun korjuukoneiden kehityksessä edelläkävijä. Käytössä on mm. tarkkuussilppureista kehitettyjä hakeharvestereita, jotka leikkaavat ja hakettavat pajut ja siirtävät hakkeen joko harvesterin vetämään perävaunuun tai harvesterin rinnalla kulkevaan traktorin vetämään peräkärriin (kuva 41). Peräkärriin hake kuljetetaan tienvarsivarastoon, jossa hake kipataan vaihtokonttiin. Hakeharvestereiden lisäksi on olemassa harvestereita, jotka pelkäästään leikkaavat pajun rungot ja siirtävät ne harvesterin vetämään peräkärriin. Peräkärriä rungot siirretään tienvarteen, varastoidaan kasoissa ja haketetaan ja kuljetetaan käyttäjille rankojen kuivuttua.





Kuva 41. Claas Jaguar -pajuharvesteri (Claas).

Suomessa pajun korjuuseen on tutkittu traktorin metsäkuormaimeen liitettyä keräävää energiapuukouraa, jolla voidaan katkaista ja kerätä useampia pajunipuja samaan kouraan. Puuniput siirretään energiapuukouralla korjuukentälle kasoihin, josta ne kerätään ajokoneella ja kuljetetaan tienvarteen varastokasoihin kuivumaan.

### 6.4 Pajun poltto-ominaisuudet

Pajun polttoaineen ominaisuuksia on analysoitu eniten Ruotsissa. Tutkimusten mukaan pajun poltto-ominaisuudet ovat keskimäärin lehtipuun ominaisuuksien kaltaiset. Kuitenkin pajun ominaisuudet vaihtelevat ja riippuvat maaperästä. Ruotsalaisen lähteen mukaan pajun kuiva-aineen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo on 18,3 MJ/kg, joka on jonkin verran pienempi kuin hakkuutähdehakkeella. Pajun tuhkapitoisuus on 1,0 % kuiva-aineesta, mikä on samaa luokkaa kuin hakkuutähdehakkeella, 1,33 %. Pajun tuhkan sulamispiste 1 200 °C, joka on samaa luokkaa kuin hakkuutähdehakkeella. Tämä ei aiheuta ongelmia poltossa. Alkalimetalleista pajun kaliumpitoisuus kuiva-aineesta on 0,46–0,49 %, kalsiumpitoisuus 0,34–0,43 %. Arvot ovat suuremmat kuin koivun kokopuulla. Alkalimetallit aiheuttavat isoissa lämpötiloissa kattilakorroosiota (Bioenergi 2010 ja Alakangas 2000).

## 6. Energiapuun lyhytkiertoviljely

Suomessa pajulla polttokokeita ei ole tehty vähäisen pajuviljelyn vuoksi. Ruotsissa viljelty paju käytetään pääasiassa energian tuotantoon. Pajun käytöstä energian tuotannossa esimerkkinä on Ruotsissa Enköpingsissä sijaitseva 55 MW:n CHP-laitos. Laitos käyttää erilaista puubiomassaa polttoaineena. Pajun osuus vuotuisesta polttoainekäytöstä on 10 %. Hetkellisesti pajun osuus koko polttoainevirrasta on enintään 15 %. Tällä ehkäistään korroosio-ongelmaa.

### 6.5 Lyhytkiertoviljelyn talous

Heikkinen (2009) selvitti pajun viljelyn taloutta kotimaisten viljelijöiden haastattelututkimuksessa. Pajun tuotoksen Heikkinen ennusti Heikolan (1992) pajun tuotostaulukon avulla. Laskelmissa oletettu viljelmän tuottoaika on 22 vuotta. Ensimmäinen vuosi on viljelmän perustamisvuosi ja viimeinen viljelmän lopettamisvuosi, joten varsinaisia satovuosia viljelmällä on 20 vuotta. Taulukko 10 esittää pajuviljelmien tuotoksen 22 vuoden kiertojalla. Viljelmä 1 sijoittuu lämpösumma-alueelle 1 300 °C ja viljelmä 2 lämpösumma-alueelle 1 100 °C

Taulukko 10. Pajuviljelmien tuotos Heikkisen (2009) mukaan.

	Viljelmä 1	Viljelmä 2
Sato (tn/ha) 1.vuosi	2,8	2,1
Sato (tn/ha) 2.vuosi	5,6	4,2
Sato (tn/ha) 3.vuosi	9,8	7,3
Sato (tn/ha) keskimäärin vuosina 4–22	14,1	10,5
Sato yhteensä, tn/ha	269	201
Sato yhteensä, MWh/ha	1211	902
Sato yhteensä, m <sup>3</sup> /ha	727	541

Viljelyn talouden selvittämiseksi Heikkinen kokosi pajuhakkeen tuotantokustannukset laitokselle toimitettuna 22 vuoden kiertojalla kahdelta viljelmältä. Kokonaiskustannus lämpölaitokselle toimitetulle pajuhakkeelle viljelmällä 1 oli moottorisahakorjuuna (kaato miestyönä, rangat traktorilla välivarastoon) 15 413 € (12,7 €/MWh) ja traktorikorjuuna (kaato, kasaus ja kuljetus traktorilla välivaras-

tolle, haketus väliavarastolla) 14 448 €(11,9 €/MWh). Viljelmällä 2 kokonaiskustannus moottorisahakorjuuna oli 20 150 (22,3 €/MWh) ja harvesterikorjuuna (hakettava harvesteri, haketus vaihtolavoille) 14 975 €(16,60 €/MWh). Heikkisen tutkimuksessaan käyttämällä metsähakkeen hinnalla (11,95 €/MWh, 2006) ei pajun tuottaminen voimalaitospolttoaineeksi ollut kannattavaa.

Elinkustannusindeksi on noussut vuoden 2006 elokuusta vuoden 2010 elokuuhun 7,6 % (Tilastokeskus 2010b). Metsähakkeen hinta laitoksilla kesäkuussa 2010 oli 18,0 €/MWh (Bioenergia lehti 4/2010). Tällä laitoshinnalla pajuhakkeen tuottaminen olisi niukasti kannattavaa elinkustannusindeksin nousu huomioiden lukuun ottamatta tilan 2 korjuuta moottorisahakorjuuna.

Heikkinen (2009) vertasi selvityksensä tuloksia myös Tahvanaisen (1995) tuloksiin. Elinkustannusindeksillä vuoteen 2010 korjattu pajuhakkeen tuotantokustannus laitokselle toimitettuna Tahvanaisen tutkimuksessa oli 17,8 €/MWh.

### 6.6 Yhteenveto

Ruotsissa viljelty paju käytetään pääasiassa energian tuotantoon. Pajun käytöstä energian tuotannossa esimerkkinä on Ruotsissa Enköpingissä sijaitseva 55 MW:n CHP-laitos. Laitos käyttää erilaista puubiomassaa polttoaineena. Pajun osuus vuotuisesta polttoainekäytöstä on 10 %. Hetkellisesti pajun osuus koko polttoainevirrasta on enintään 15 %. Tällä ehkäistään korroosio-ongelmaa.

Suomessa lyhytkiertoviljely on kokeiluasteella. Koeviljelmillä viljellään pajun eri klooneja. Pohjois-Karjalassa sijaitsevilla koeviljelmillä tuottoisimmaksi pajuklooniksi on osoittautunut *Salix schwerinii* -lajin klooni. Kaupallisessa mielessä tällä hetkellä viljelyssä olevia pajuviljelmiä voidaan pitää koeviljelminä.

Kustannuksiltaan pajun viljely energiataroituksiin on niukasti kannattavaa. Kannattavuutta on mahdollista parantaa kehitystyöllä ja yhdistämällä pajun kasvatus jätevesien käsittelyyn,

Kiinnostus muiden lyhytkiertopuulajien (koivu, leppä ja haapa) kasvatukseen on Suomessa viime aikoina lisääntynyt. Tässä nähdään mahdollisuus tuottaa teollisesti ja intensiivisesti pelkästään energiapuuta. Myös hiilidioksidin kierto nopeutta voidaan huomattavasti tehostaa.

## **7. Pellettien tuotantoteknologia ja -kustannukset**

### **7.1 Tausta**

Puupelletit ovat kuivaa, helposti käsiteltävää, vähän pölyävää ja tasalaatuista polttoainetta. Ne ovat myös luonnonmukaista ja puhdasta polttoainetta, sillä valmistuksessa ei käytetä lisäaineita. Pelletin kiinteä muoto ja kiiltävä pinta syntyvät, kun puristamisen yhteydessä puusta vapautuu ligniiniä, joka sitoo puuraaka-aineen.

Pelletointi mahdollistaa puupolttoaineen tehokkaan kuljettamisen, onnistuneen varastoinnin ja polton automatisoinnin.

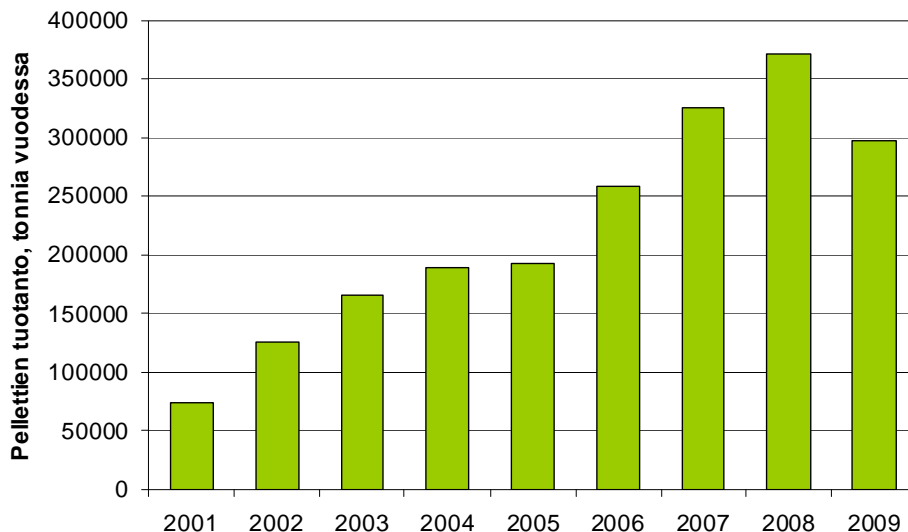
Pelletit soveltuvat lämmityspolttoaineeksi esimerkiksi yritysten tehdaskiinteistöihin, liiketiloihin, kasvihuoneisiin sekä kuntien ja valtion kiinteistöihin, kuten terveyskeskuksiin, kouluihin ja virastotaloihin. Turve- ja puupelletit soveltuvat erinomaisesti myös pää- ja tukipolttoaineeksi kaikissa voimalaitoskokoluokissa.

### **7.2 Pellettien käyttö nyt ja vuonna 2020**

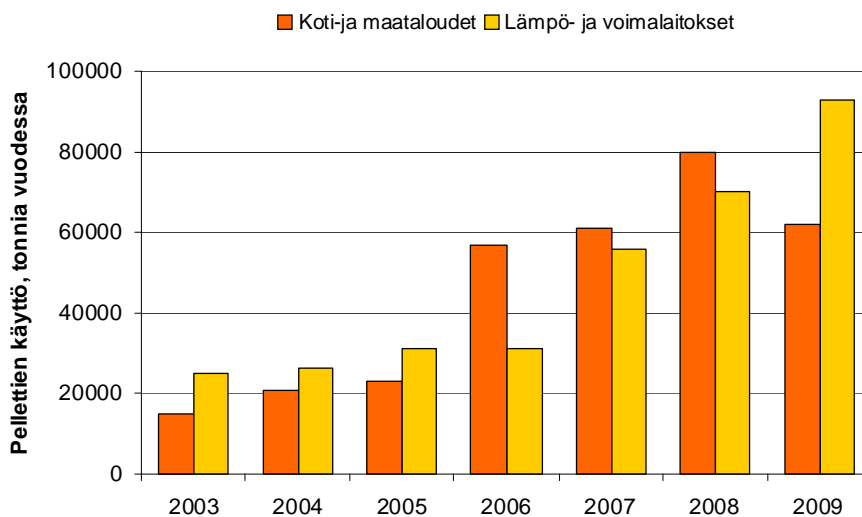
Pellettien tuotanto Suomessa vuonna 2009 oli 299 000 tonnia (1,4 TWh) (kuva 42) ja kulutus 156 000 tonnia (1,0 TWh) (kuva 43). Vuonna 2009 pellettiä tuotiin Suomeen 50 000 tonnia (0,24 TWh). Pelletin vienti vuonna 2009 oli 136 000 tonnia (0,65 TWh). Vientimaat ovat Ruotsi ja Tanska, jotka yhdessä kattavat viennistä 98 % (Ylitalo 2010).

Työ- ja elinkeinoministeriö on asettanut tavoitteeksi, että pellettien käyttöä kasvatetaan vuoteen 2020 mennessä 2 TWh:iin (taulukko 1). Tämä tarkoittaa pellettien kulutuksen kaksinkertaistamista nykykäyttöön nähden.

Työ- ja elinkeinoministeriö on asettanut myös tavoitteeksi lisätä metsähakkeen käyttöä 6–8 TWh kivihiiltä käyttävissä CHP-laitoksissa. Koska kivihiililaitokset sijaitsevat rannikolla ja osittain kaukana metsähakkeen raaka-ainelähteistä, niin osa metsähakkeesta tullaan pellettoimaan kuljetuksen tehostamiseksi.



Kuva 42. Pellettien tuotannon kehittyminen 2000-luvulla (www.metinfo.fi).



Kuva 43. Pellettien käytön kehittyminen 2000-luvulla (www.metinfo.fi).

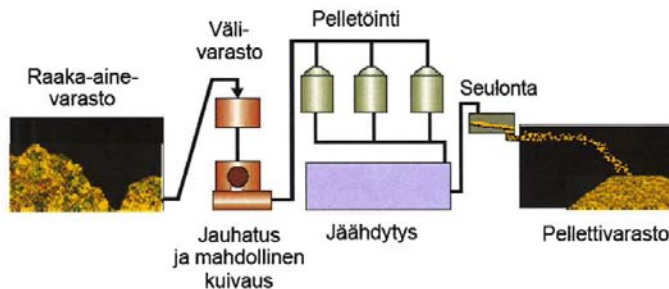
### 7.3 Raaka-aineet

Perinteisiä pelletin raaka-aineita ovat mekaanisen puunjalostuksen kuivat sivutuotteet, kuten kutterinlastu ja hiontapöly. Tällä hetkellä kuivat puuraaka-aineet on käytetty ensisijaisesti pellettien raaka-aineeksi. Tämän vuoksi pellettien tuotannossa joudutaan entistä enemmän käyttämään kosteita raaka-aineita. Näitä ovat sahanpuru, metsähake ja pienpuu. Sahanpurua käytetäänkin jo raaka-aineena, mutta ennen pelletöintiä puru on kuivattava pelletöintikosteuteen 10–15 %.

Pelletin raaka-ainepohjan laajentamiseksi on tutkittu hakkuutähteen mänty-rankapuun ja kokopuun pelletöintiä ja polttoa. Tässä Pelletime-hankkeen pelletöinti- ja polttokokeessa etenkin mäntyranka- ja kokopuu osoittautuivat lupaavaksi uudeksi pelletin raaka-aineeksi. Kuitenkin näistä raaka-aineista valmistetuilla pelleteillä pienhiukkas- ja kaasupäästöt olivat tuntuvasti nykyistä kaupallista pellettiä korkeammalla. Myöskään pelletin fyysiset ominaisuudet eivät olleet nykyisen kaupallisen pelletin tasolla. Pelletime-hankkeen päätavoitteena olivat kuitenkin polttokokeet ja itse pelletöintiprosessia ei ollut optimoitu sopivaksi uusille materiaaleille (Okkonen ym. 2009).

### 7.4 Prosessikuvaus

Pellettien valmistuksessa käytettävä raaka-aine kuljetetaan tehtaille tavallisesti rekoilla tai usein tehdas on integroitu muun puunjalostusteollisuuden yhteyteen, jolloin raaka-ainetta siirretään lyhyt matka esimerkiksi kuljettimilla. Raaka-aineesta on ennen tuotannon aloittamista poistettava tuotantoa haittaavat epäpuhtaudet, esimerkiksi kivet, metalli ja muovi (kuva 44).



Kuva 44. Puupellettien valmistusprosessi (Paju & Alakangas 2002).

Kostea raaka-aine kuivataan joko osittain tai täysin ennen materiaalin hienontamista. Raaka-aineen kuivettua n. 10 %:n kosteuteen se syötetään vasaramyllyyn jauhattavaksi. Vasaramyllyssä kaikki raaka-aine jauhetaan tasalaatuisen kokoiseksi ja sopivaksi puristusta varten. Myös syntyvä pöly otetaan talteen ja käytetään pelletin raaka-aineena. Käsitelty raaka-aine voidaan siirtää puristusvaiheeseen esimerkiksi ruuvikuljettimella, jolla varmistetaan sopiva syöttönopeus puristuslaitteelle.

Pelletöitävä materiaali pakotetaan puristamalla puristinrullien avulla kahdella eri perusmenetelmällä: joko reikälevyn eli tasomatriisin tai rei'itetyn sylinterin eli rengasmatriisin läpi. Prosessi nostaa puumateriaalin lämpöä ja aiheuttaa luonnollisten hartsien ja sideaineiden (ligniinin) hetkellisen pehmenemisen. Puristusvaiheessa sulanut ligniini muodostaa jäähtyttyään pellettien pinnalle kiiltävän ja koossa pitävän kerroksen ja toimii ns. luonnollisena liima-aineena.

Materiaalin puristuttua matriisin reikien läpi leikkuuterät katkaisevat puristeet oikean mittaisiksi, normaalisti noin 10–30 mm:n pituuteen. Mikäli pelletöintilaitetta ei ole varustettu leikkuuterillä, pelletit leikkautuvat oikeaan mittaan matriisin alapinnalla painovoiman vaikutuksesta.

Puristusprosessin vaiheen jälkeen kuumat pelletit on jäähdytettävä, jotta ne saavuttavat lopullisen lujuutensa. Jäähdytys tapahtuu puhaltamalla kylmää ilmaa pellettikerroksen läpi jäähdytyslaitteessa (kuva 45).



Kuva 45. Pellettien jäähdytyslaitte (http://www.woodpelletline.com/cooler.htm).

## 7. Pellettien tuotantoteknologia ja -kustannukset

Jäähdytyksen jälkeen valmiit pelletit kulkevat vielä seulan (usein täryseula) kautta, jossa pelleteistä erotetaan raakapuru ja hienoaines. Seulottu materiaali palautetaan tavallisesti takaisin tuotantoprosessiin. Pellettien seulonnan avulla saavutetaan tasalaatuisempaa polttoainetta, joka soveltuu paremmin jakeluun sekä aiheuttaa vähemmän ongelmia polttolaitteissa. Pelletin ominaisuuksia on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Pelletin ominaisuudet (Vapo Oy 2010).

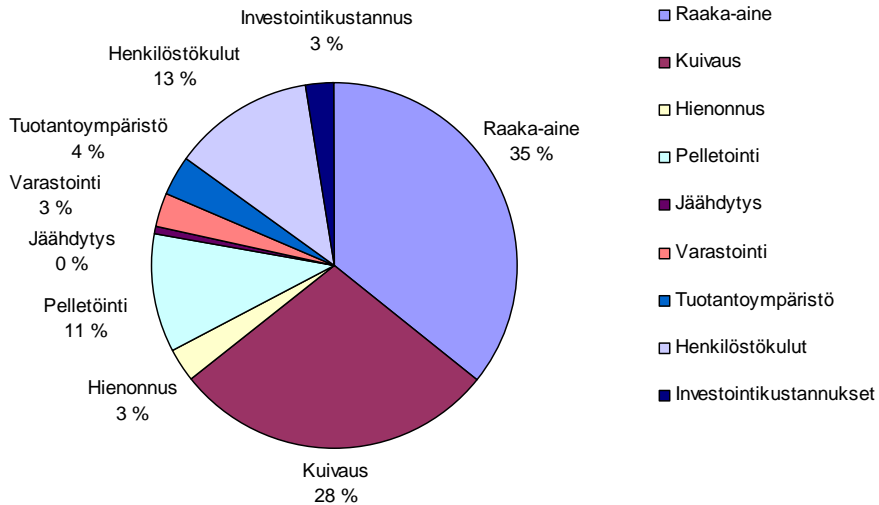
<b>Pelletin lisäaineet</b>	Enintään 1 % (tärkkelystä)
<b>Pelletin raaka-aine</b>	Kemiallisesti käsittelemätön kuoreton havupuu
<b>Pelletin käyttökohde</b>	Pienkuluttajat, lämmityspolttoaine
<b>Pelletin koko</b>	Halkaisija 6–8 mm, keskipituus 10–30 mm
<b>Pelletin energiasisältö</b>	> 4,70 kWh/kg eli >4,70 MWh/tonni eli >3 MWh/i-m <sup>3</sup>
<b>Pelletin kosteus</b>	< 10 %
<b>Pelletin tuhkapitoisuus</b>	< 0,5 %
<b>Pelletin ominaispaino</b>	600 kg/i-m <sup>3</sup>
<b>Pelletin tilan tarve</b>	1,5 m <sup>3</sup> /tonni

### 7.5 Tuotantokustannukset

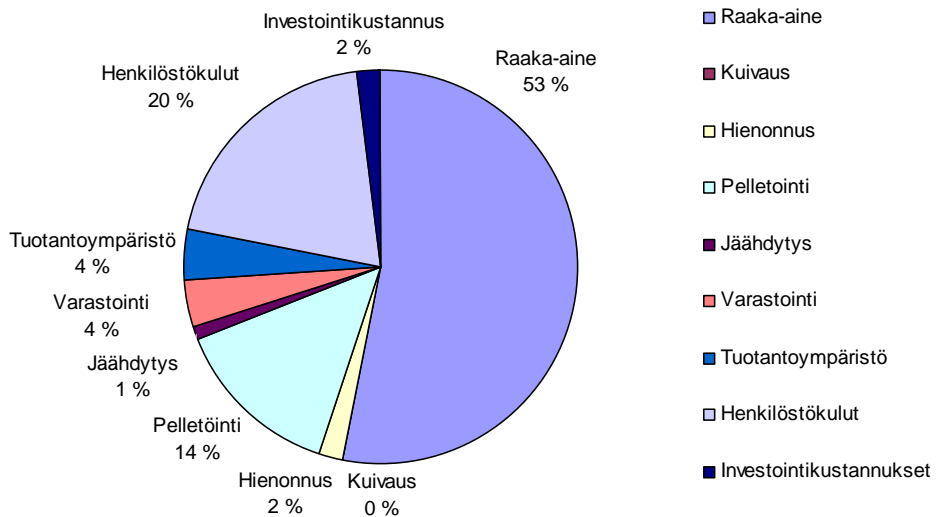
Thek ja Obernberger (2001) selvittivät pelletin tuotantokustannuksia vuonna 2001. Tutkimuksissa kerättiin tietoa yhdeksästä laitoksesta, joiden vuosituotanto vaihteli välillä 430–79 000 tonnia pellettiä vuodessa. Vastaavat käyttötuntimäärät laitoksilla olivat 615–8 000 tuntia vuodessa. Tutkimuksessa selvisi, että tärkeimmät kustannustekijät ovat raaka-ainekustannukset ja kuivauskustannukset. Yhteensä nämä voivat muodostaa noin 63 % pelletin tuotantokustannuksista (taulukko 12). Pelletin valmistuskustannusten jakauma kosteasta ja kuivasta raaka-aineesta on esitetty kuvissa 46 ja 47. Pelletin tuotantokustannukset työvaiheittain on esitetty taulukossa 12.



## 7. Pellettien tuotantoteknologia ja -kustannukset



Kuva 46. Pelletin tuotantokustannusten jakauma tuotantovaiheittain kostealle raaka-aineelle kapasiteetiltaan 730–79 000 tn/a laitoksissa (Thek ja Obernberger 2001). Tuotantokustannus keskimäärin 93,6 €/tn (19,9 €/MWh)



Kuva 47. Pelletin tuotantokustannusten jakauma tuotantovaiheittain kuivalle raaka-aineelle kapasiteetiltaan 730–79 000 tn/a laitoksissa (Thek ja Obernberger 2001). Tuotantokustannus keskimäärin 66,8 €/tn (14,2 €/MWh).

## 7. Pellettien tuotantoteknologia ja -kustannukset

Taulukko 12. Pelletin tuotantokustannukset kosteasta raaka-aineesta tuotantovaiheittain kapasiteetiltaan 730–79 000 tn/a laitoksissa (Thek ja Obernberger 2001).

	<b>Minimi</b> €/tn (€/MWh)	<b>Keskiarvo</b> €/tn (€/MWh)	<b>Maksimi</b> €/tn (€/MWh)
<b>Raaka-aine</b>	14 (3,0)	33,5 (7,1)	51,4 (10,9)
<b>Kuivaus</b>	25,1 (5,3)	26,6 (5,7)	29,5 (6,3)
<b>Hienonnus</b>	0,3 (0,1)	2,9 (0,6)	6 (1,3)
<b>Pelletointi</b>	7,1 (1,5)	9,9 (2,1)	14,8 (3,1)
<b>Jäähdytys</b>	0,1 (0,0)	0,3 (0,1)	0,5 (0,1)
<b>Varastointi</b>	1,4 (0,3)	2,9 (0,6)	4,9 (1,0)
<b>Tuotantoympäristö</b>	0,5 (0,1)	3,4 (0,7)	5,2 (1,1)
<b>Henkilöstökulut</b>	4,7 (1,0)	11,7 (2,5)	17,4 (3,7)
<b>Investointikustannukset</b>	0,6 (0,1)	2,4 (0,5)	4,1 (0,9)
<b>Kustannukset yhteensä</b>	<b>53,8 (11,4)</b>	<b>93,6 (19,9)</b>	<b>133,8 (28,4)</b>

Oulun yliopiston Thule-instituutti selvitti metsähakkeen pelletöintikokeessaan pellettituotannon kustannuksia Kortteen konepajan valmistamalla ns. isännänlinjan pelletöintilaitteistolla (Leiviskä 2004). Tutkimuksessa valmistettiin pellettejä kosteasta metsähakkeesta. Raaka-ainekustannus tutkimuksessa oli 48,65 €/tn (10,4 €/MWh) pellettiä, työvoimakustannus 46,25 €/tn (9,8 €/MWh) pellettiä, kuivauskustannus 17 €/tn (3,6 €/MWh) pellettiä ja muut kustannukset 11 €/tn (2,3 €/MWh) pellettiä. Pelletin hinnaksi tuotantopaikalla saatiin 122,9 €/tn (26,1 €/MWh).

VTT selvitti pelletin tuotantokustannuksia Brittiläisessä Kolumbiassa (Wiik ym. 2009). Tutkimuksessa tarkasteltiin laitosta, jonka kapasiteetti on 100 000 tn pellettiä/vuosi. Tutkimuksessa pelletin keskimääräiseksi hinnaksi tuotantolaitoksella saatiin 37,8 €/tn (8,0 €/MWh) pellettiä. Raaka-ainekustannuksen osuus kokonaiskustannuksista oli 44 %, henkilöstökulujen osuus 15 %, kuivauksen ja investointikustannuksen osuus kummankin 14 %. Muiden kustannusten osuus oli 13 %. Tarkasteltu laitos käytti raaka-aineenaan 150 000 tonnia 40 %:n kosteudessa olevaa sahanpurua, joka kuivattiin 10 %:n kosteuteen. Tarkastelussa kuivausilma tuotettiin kattilassa, jossa poltettiin 10 %:sta kutterinlastua. Laivauskustannus Kolumbiasta Rotterdamin satamaan (sisältää alkukuljetuksen satamaan ja kuljetuksen satamasta voimalaitokselle) oli arviolta 66,0 €/tn (14,0

€/MWh) pellettiä. Yhteenlaskettuna kanadalainen pelletti maksaisi laitoksella 103,8 €/tonni (22 €/MWh).

Raaka-aineen hinnan ohella pelletin tuotantokustannuksia tarkastellessa suurin epävarmuustekijä liittyy kuivauskustannuksiin. Kuivausmenetelmä vaihtelee laitoksittain ja pellettituotannon integrointi voiman- tai lämmöntuotantoon voi aikaansaada merkittäviä kustannushyötyjä. Metsähakkeen kuivaaminen suoraan esimerkiksi rumpukuivurissa öljyllä tuotetulla savukaasuilla on hyvin kallista ja tehotonta. Kuivauksen tehokkuutta voidaan parantaa erilaisilla takaisinkytkennöillä, joissa hyödynnetään kuivauksen jätelämpöä tai energialaitoksen kaukolämmön paluulämpöä. Flyktman (2001) selvitti kuivauksen tehokkuutta. Pienimpään energiankulutukseen päästiin lämmön talteenotolla varustetuilla höyrykuivureilla. Suurimmat kulutusarvot syntyivät erillisillä polttimilla varustetuilla savukaasukuivureilla. Pienempiin kuivauskustannuksiin päästiin kattilaan liitetävällä savukaasukuivurilla ja lämmön talteenotolla varustetulla höyrykuivurilla. Kuivauskustannukset ovat tällöin 10–14 €/tn (2,1–3,0 €/MWh) (pelletti).

Paukkusen et. al (2010) mukaan pellettien (laatuluokka 1) tuotantokustannukset käytettäessä kuitupuuta raaka-aineena olivat 35,2 €/MWh (165,3 €/tn), kun raaka-aineen hinta oli 18,9 €/MWh (89,0 €/tn). Saman tutkimuksen mukaan laatuluokaltaan heikomman pelletin tuotantokustannus kuitupuusta oli vain 23,4 €/MWh (110 €/tn). Lähteen Obernberg & Thek (2010) mukaan kosteasta sahanpurusta tehtyjen pellettien tuotantokustannus oli 29,1 €/MWh (136,6 €/tn). Sahanpurun hinta tarkastelussa oli 12,5 €/MWh (58,7 €/tn).

Edellä olevan tarkastelun pohjalta voidaan arvioida tämän hetkisiä pelletin tuotantokustannuksia metsähakkeesta keskisuuressa pellettitehtaassa Suomessa. Metsähakkeen raaka-aineen hinta pellettitehtaalla on 16–18 €/MWh ja kuivauskustannukset ovat arviolta 6–7 €/MWh. Jauhatuksen, pelletöinnin ja jäähdytyksen kustannukset ovat 3–4 €/MWh. Muitten kustannusten mm. henkilökustannusten osuus on arviolta 2–3 €/MWh. Näin pelletin tuotannon kokonaistuotantokustannukset metsähakkeesta olisivat 27–32 €/MWh. Pelletin kuljetuskustannukset (9 snt/tn/km) 100 km:n päähän olisivat 1,9 €/MWh ja pelletin tuotanto- ja kuljetuskustannukset yhteensä käyttöpaikalla 29–34 €/MWh.

## 7.6 Hinta käyttöpaikalla

Pelletti toimitetaan asiakkaalle joko pien- tai suursäkissä tai irtotavarana (kuva 48). Pelletin yksikköhinta vaihtelee toimitustavan mukaan ja se on piensäkki-toimituksessa korkein. Samoin rahtihinta vaihtelee toimituskohtaisesti. Toimitet-

## 7. Pellettien tuotantoteknologia ja -kustannukset

taessa täysiä rekkakuormia (35 tn lasti) on pelletin rahtikustannus luokkaa 9 snt/tn/km. Junakuljetuksessa rahtikustannus on luokkaa 3,3 snt/tn/km (Kariniemi 2010).



Kuva 48. Pellettitankkiauto (Kuva Vapo Oy.)

Irtopelletin hinta huhtikuussa 2010 oli 35,4 €/MWh. (ALV 0 %) (Bioenergia-lehti 3/2010). Pelletin kuluttajahinta 5 tonnin toimituserälle toukokuussa 2010 oli 193 €/tn (ALV 0 %) eli noin 41 €/MWh ilman rahtikustannuksia (Tilastokeskus 2010). Autokuljetuskustannuksineen 50 kilometrin etäisyydelle toimitettuna 5 tonnin toimituserä maksaisi 197,5 €/tn (42,0 €/MWh). Oletuksena edellä on 9 snt/tn/km rahtiveloitus.

### 7.7 Yhteenveto

Puupelletit ovat kuivaa, helposti käsiteltävää, vähän pölyävää ja tasalaatuista polttoainetta. Pelletit soveltuvat lämmityspolttoaineeksi pieniin käyttökohteisiin, mutta myös pää- ja tukipolttoaineeksi kaikissa voimalaitoskokoluokissa. Pellettien korkeampi energiasisältö mahdollistaa pitemmät kuljetusmatkat käyttäjälle kuin metsähakkeella.

Pellettien tuotanto Suomessa vuonna 2009 oli 299 000 tonnia (1,4 TWh) ja kulutus 156 000 (1,0 TWh). Vuonna 2009 pellettiä tuotiin Suomeen 50 000 tonnia (0,24 TWh). Pelletin vienti vuonna 2009 oli 136 000 tonnia (0,65 TWh). Vientimaat ovat Ruotsi ja Tanska, jotka yhdessä kattavat viennistä 98 %.

Perinteisiä pelletin raaka-aineita ovat mekaanisen puunjalostuksen kuivat sivutuotteet, kuten kutterinlastu ja hiontapöly. Tällä hetkellä kuiva puuraaka-aine

on käytetty ensisijaisesti pellettien raaka-aineeksi. Tämän vuoksi pellettien tuotannossa joudutaan entistä enemmän käyttämään kosteita raaka-aineita. Näitä ovat sahanpuru, metsähake ja pienpuu.

Metsähakkeesta tehtävän pelletin tuotannon kokonaistuotantokustannukset olisivat tarkastelun mukaan noin 27–32 €/MWh. Pelletin kuljetuskustannukset 100 km:n päähän olisivat 1,9 €/MWh ja pelletin tuotanto- ja kuljetuskustannukset yhteensä käyttöpaikalla 29–34 €/MWh. Tarkastelussa metsähakkeen raaka-aineen hinnaksi arvioitiin pellettitehtaalla 16–18 €/MWh, kuivauskustannuksiksi 6–7 €/MWh ja muiksi kustannuksiksi 5–7 €/MWh.

## 8. Biohiilen valmistus metsähakkeesta

### 8.1 Tausta

Torrefiointitekniikka on uusi kiinnostusta herättävä puubiomassan käsittelymenetelmä. Torrefioinniksi kutsutaan biomassan käsittelyä 250–270 °C:n lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa siten, että siitä haihtuvat vesi sekä osa haihtuvista aineista. Näin puulle saadaan ominaisuuksia, joita ei tuoreella puulla ole. Biomassa kuivuu täydellisesti torrefioinnin aikana ja sen jälkeen kosteuden imeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä. Kuljetettavuuden ja käsittelyn helpottamiseksi torrefioitu biomassa murskataan ja pelletoidaan. Näin valmistettua lopputuotetta kutsutaan TOP-pelletiksi (TORrefied Pellet).

TOP-pelletti on lähes hydrofobinen eikä vety ulkovarastoinnissa, sen tilavuuspohjainen lämpöarvo vastaa kivihiiltä, se käyttäytyy hiilimyllyjen jauhatuksessa ja pölypolttimilla kuten kivihiili, joten se soveltuu ihanteellisesti hiililaitoksiin sellaisenaan ilman muutosinvestointeja. TOP-investoinnit tehdään lähelle raaka-ainelähteitä, jolloin voidaan saavuttaa merkittävät logistiikkaedut perinteisiin puupolttoaineisiin verrattuna.

Euroopassa on satoja kivihiiltä polttoaineenaan käyttäviä voimalaitoksia, jotka ovat kiinnostuneita lisäämään biopolttoaineiden käyttöä. Olemassa olevien kivihiilivoimalaitosten uusiminen vaihtelevanlaatuiselle ja kostealle biomassapolttoaineille soveltuviksi vaatisi huomattavia investointeja ja voimalaitoskannan uusiminen olisi jopa vuosikymmeniä kestävä prosessi. Lisäksi energiapoliittisesta päätöksenteosta riippuvaiset ja monessa tapauksessa lyhytaikaisesti tiedossa olevat uusiutuvien energialähteiden tukitoimet laskevat energiayhtiöiden investointihalukkuutta uusiin biovoimalaitoksiin. Voimalaitokset ovat erittäin kiinnostuneita kivihiiltä korvaavista biopolttoainelajeista, joita voitaisiin käyttää voimalaitoksissa ilman suurempia muutostöitä ja investointeja. Jotta puuta voitaisiin käyttää yhä useammassa olemassa olevassa voimalaitoksessa, on järkevää

etsiä uusia keinoja jalostaa polttoainetta soveltumaan poltettavaksi pölypoltto-kattiloissa.

### 8.2 Raaka-aineet

Torrefioitua polttoainetta voidaan valmistaa monenlaisista biomassoista, mutta silti saavuttaa lopputuotteelle samat ominaisuudet. Suurin syy tähän on se, että puu- ja kasviperäinen biomassa koostuvat samanlaisista rakennusaineista, suurimpana yksittäisenä aineena polymeerit eli selluloosa. Kemialliset muutokset näihin kuituihin ovat kaikilla biomassoilla samat, jolloin vastaavasti saadaan samat materiaalimuutokset. Kuitenkaan samat käsittelyolosuhteet eivät automaattisesti tuota samanlaista lopputuotetta kaikille materiaaleille. Eri materiaalien ominaisuudet vaativat eripituisia käsittelyaikoja. Torrefiointia varten on testattu mm. pyökkiä, pajua, olkea ja lehtikuusta ja niille on määritelty kullekin oma ”resepti”, jolla saavutetaan sopiva torrefioinnin lopputulos (Bergman & Kiel 2005).

Torrefiointiprosessin raaka-aineena voidaan erityisesti käyttää mm. metsänhoidosta ja metsäteollisuuden prosesseista sivutuotteina saatavaa puumateriaalia, kuten hakkuutähdettä, kuorta ja purua. Myös rakennusteollisuudesta saatavaa purkujätettä voidaan hyödyntää torrefioinnissa. Purkujätteen käytön rajoitteena on puun aikaisempi käsittely: kyllästysaineet ja maalit voivat vapauttaa myrkyllisiä kaasuja torrefiointiprosessin aikana.

Bergman (2005) erottaa kaksi torrefioinnin tuotantosuuntaa: lähellä käyttöpaikkaa (kaukana raaka-ainelähteestä) ja kaukana käyttöpaikasta (lähellä raaka-ainelähdettä) tapahtuvan tuotannon. Tutkimus keskittyy nykyään jälkimmäiseen, sillä lyhyt raaka aineen kuljetusmatka ja kustannussäästöt torrefioidun puun kuljetuksessa ovat menetelmän keskeisiä etuja. Torrefiointiprosessin integrointi sähkön- ja lämmöntuotantoprosessiin on etu molemmissa tuotantovaihtoehdoissa.

### 8.3 TOP-prosessikuvaus

Torrefioinniksi kutsutaan biomassan käsittelyä 250–270 °C:n lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa noin 30 minuutin ajan, jolloin siitä haihtuvat vesi sekä osa haihtuvista aineista. Näin puulle saadaan ominaisuuksia, joita ei tuoreella puulla ole. Torrefiointi voidaan tehdä joko panostyyppisesti tai jatkuvatoimisella menetelmällä. Laitteistovalintaan vaikuttavat torrefiointimäärät sekä tilaratkaisut. Panostyyppisen torrefiointilaitteiston rakenne vastaa sahatavara-kuivaamoaa, mut-

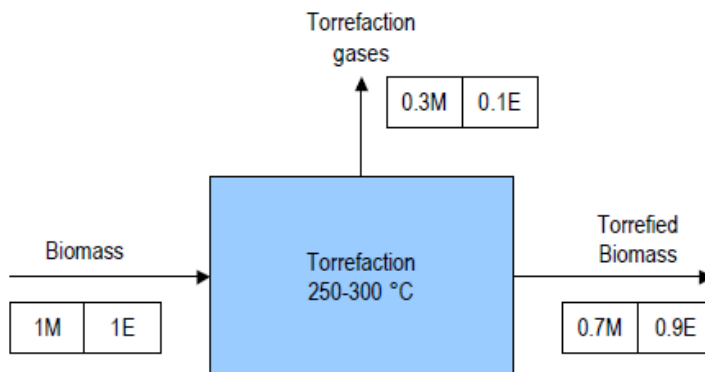
## 8. Biohiilen valmistus metsähakkeesta

ta panostyyppisenä sen kapasiteetti jää pieneksi verrattuna jatkuvatoimiseen prosessiin, eikä se siten ole varteenotettava vaihtoehto energiantuotannossa käytettävän polttoaineen valmistamiseksi.

Yleisesti kirjallisuudessa esitetään puun torrefiointin lopputuotteen sisältävän 70–80 prosenttia alkuperäisestä massasta ja 80–90 prosenttia alkuperäisestä energiasisällöstä. Näin ollen lämpöarvo kohoaa torrefiointin myötä 10–22 prosenttia. Puuperäisillä biomassoilla lämpöarvon kohoaminen on olkibiomassoja (60–70 % massasta ja 70–80 % energiasisällöstä) suurempaa (Agar & Wihersaari 2010).

ECN-tutkimuslaitoksen esittämä kuivan torrefiointiprosessin energiatase on esitetty kuvassa 49 (Bergman 2005). ECN:n raportin mukaan 70 % raaka-aineen kuiva-aineen massasta jää kiinteään muotoon ja se sisältää 90 % lähtöaineen lämpöarvosta. Biomassa kuivuu täydellisesti torrefiointin aikana ja sen jälkeen kosteuden imeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä.

Torrefiointiprosessi on torrefiointin osalta energiaomavarainen, sillä prosessista vapautuvien kaasujen poltosta saatava energia riittää torrefiointin toteutukseen. Mutta kostean raaka-aineen kuivaukseen tarvitaan lisäenergiaa. Energiataseen kannalta TOP-pellettituotannon kuivauksen integrointi esimerkiksi sähkön- ja lämmöntuotantoon on tärkeää. Tällöin kuivausenergia voidaan ottaa energiatuotannon savupalokaasuista ja torrefiointissa biomassasta haihtuvat kaasut voidaan syöttää sähkön- ja lämmöntuotantoprosessiin

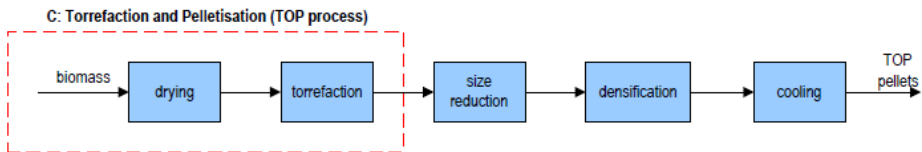


Kuva 49. ECN-tutkimuslaitoksen esittämä torrefiointin massa- ja energiatasapaino. M = massayksikkö, E = energiayksikkö (Bergman 2005).

Alankomaalainen ECN-tutkimuslaitos on tutkinut ja kehittänyt yhdistettyä torrefiointi- ja pelletöintiprosessia biomassalle, jota kutsutaan TOP-prosessiksi (torre-



fication and pelletisation). Siinä paahdettu puuhake murskataan ja pelletoidaan ilman sideaineita, jolloin saadaan uusi, tavallisista puupelleteistä poikkeava puuhiilipelletti – TOP (TORrefied Pellet) (kuva 50). Sen edut ovat parhaimmillaan laajamittaisessa ja pitkiä kuljetusmatkoja vaativassa bioenergialiiketoiminnassa, kun siirretään miljoonia tonneja TOP-pellettejä Euroopan sisällä tai Eurooppaan käytettäväksi hiilipölykattiloissa. ECN-tutkimuslaitoksen mallissa torrefiointi ja pelletointi toteutetaan erillisinä käsittelyvaiheina, kuitenkin yhdistettyjä energia-virtoja hyödyntäen. Esimerkiksi torrefioinnissa vapautuvat pyrolyysikaasut käytetään kuivauksen ja torrefioinnin vaatimaan lämmön tuotantoon.



Kuva 50. TOP-prosessin prosessikaavio. (Bergman 2005, s. 14)

Torrefioitu puu on tuotteena tuoreen puun ja hiilen välimuoto. Torrefioinnilla saavutetaan polttoaine, jonka tehollinen lämpöarvo on käsittelemätöntä puuainesta korkeampi. Torrefioinnilla saavutetaan myös paremmin säilyvää polttoainetta, sillä torrefioitu puu hylkii rakenteensa vuoksi vettä eikä siinä siten kasva esim. sienirihmasto. Vettähylykivän ominaisuutensa vuoksi torrefioitua puupolttoainetta voidaan säilyttää ulkona kivihiilen tapaan. Käsittelyn avulla puusta tulee hauraampaa ja helposti jauhautuvaa ja se käyttäytyy poltettaessa melko samoin kuin hiili ja siksi sitä voidaan käyttää sellaisenaan esim. hiilivoimalaitosten polttoaineena laitteistoa muuttamatta. Käsittelemättömän puun, torrefioidun biomassan, puupellettien ja TOP-pellettien ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 13.

## 8. Biohiilen valmistus metsähakkeesta

Taulukko 13. Käsittelemättömän ja torrefioidun puun ominaisuuksien vertailua irtotavarana ja pelletöitynä (Bergman 2005).

	Mänty koko- puuhake	Torrefioitu biomassa	Puu- pelletit	TOP- pelletit
Kosteus, %	45	3,0	7,0- 10,0	1,0 – 5,
Tehollinen lämpöarvo kosteana, (MJ/kg)	7,5	19,9	15,6 - 16,2	19,9 - 21,6
Tehollinen lämpöarvo kuivana, (MJ/kg)	19,33	20,4	17,7	20,4 - 22,7
Tiheys, (kg/i-m <sup>3</sup> )	330	230	500 - 650	750 - 850
Energitiheys, (GJ/i-m <sup>3</sup> )	3,1	4,6	7,8 - 10,5	14,9 –18,5

TOP-prosessilla tuotettujen pellettien irtotiheys on 750–850 kg/i-m<sup>3</sup>, tehollinen lämpöarvo 19,9–22,7 MJ/kg ja energitiheys irtotavarana 14,9–18,5 GJ/i-m<sup>3</sup> (4,1 – 5,1 MWh/i-m<sup>3</sup>). TOP-pellettien etuna perinteisiin puupelletteihin nähden on korkeampi energitiheys, mikä tekee TOP-pellettien kuljettamisen puupellettejä edullisemmaksi. Puupellettien energitiheys irtotavarana on tyypillisesti 7,8–10,5 GJ/i-m<sup>3</sup> (2,2–2,9 MWh/i-m<sup>3</sup>). (Bergman 2005, Bergman & Kiel 2005)

### 8.4 Tuotantokustannukset

ECN arvioi tuotantokapasiteetiltaan 56 000 t/a TOP-teknologiaan perustuvan tuotantolaitoksen investointikustannuksiksi 5,6–7,4 milj. € riippuen raaka-aineesta. ERCN arvioi TOP-pellettien tuotantokustannusten olevan sahanpurusta ja vihreästä puusta 2,2 – 2,5 €/GJ (7,9–9,0 €/MWh) eli 41–50 €/t ilman raaka-ainekustannuksia (Bergman 2005).

ECN tarkasteli myös TOP-pellettien tuotantoa Etelä-Afrikassa ja kuljetusta Eurooppaan. Raaka-ainekustannus oli 15 €/tn (2,6 €/MWh), tuotantokustannus 45 €/tn (7,8 €/MWh), laivakuljetuskustannukset (ilman satamakäsittelyjä ja -varastointia) on arvioitu olevan 28 €/t (4,8 €/MWh) eli yhteensä 88,0 €/tn (15,2 €/MWh). Satamakäsittelyn ja -varastoinnin sisältäväksi TOP-pellettien hinnaksi Rotterdamin satamassa saatiin 104,0 €/tn (17,9 €/MWh) (Bergman 2005).

Kun tarkastellaan TOP-pellettien valmistuskustannuksia metsähakkeesta Suomessa, niin lähtökohdaksi voidaan ottaa pellettien tuotantokustannukset metsähakkeesta, jotka ovat 27–32 €/MWh pellettitehtaalla. Kustannukset sisältävät raaka-aineen kuivauksen ja pelletointikustannukset. TOP-pellettien valmistuksessa tulee näiden lisäksi vielä torrefiointikustannukset, joiden voidaan arvioida

olevan 4–6 €/MWh riippuen tehtaan kapasiteetista. Näin TOP-pellettien tuotantokustannukset torrefiointitehtaalla ovat 31–38 €/MWh ja 100 km:n päässä käyttöpaikalla 33–40 €/MWh.

Edellä esitettyjä tuotantokustannuslukuja tulkittaessa on huomattava, että tuotantokustannusluvut ovat vuodelta 2006 ja esimerkiksi investointikustannuksissa on voinut tapahtua tuntuviakin muutoksia. Lisäksi torrefiointiprosessi on vasta pilotointiasteella, eikä tarkkaa kuvaa laitteiston todellisista käyttökustannuksista ole. Lisäksi epävarmaa on, kuinka hyvin ECN:n arvio Etelä-Afrikan tuotantokustannusarvio pitää paikkansa Suomen olosuhteissa.

### **8.5 Milloin kaupallisen mittakaavan teknologia saatavilla ?**

ECN-tutkimuslaitos on merkittävä TOP-pelletin (BO<sub>2</sub>-pelletti) tutkija Euroopassa. ECN on demonstroinut yhdistettyä torrefiointi- ja pelletöintiä pilottikokoluokan laitteistollaan (50–100 kg/h). Ensimmäinen kaupallisen mittakaavan laitos on luvanhakuvaiheessa, laitoksen rakentamisesta vastaavat ECN, Econcern ja Chemfo. Tehtaan suunniteltu kapasiteetti on 70 000 tn/a BO<sub>2</sub>-pellettiä. Laitoksen on ollut määrä valmistua vuoden 2009 lopulla (Kiel ym. 2008). ECN-tutkimuslaitoksen ohella Espanjalainen Cener (National Renewable Energy Centre) tekee torrefiointikokeita 500 kg/h pilottilaitteistollaan.

### **8.6 Yhteenveto**

Torrefioinniksi kutsutaan biomassan käsittelyä 250–270 °C:n lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa siten, että massasta haihtuvat vesi sekä osa haihtuvista aineista. Biomassa kuivuu täydellisesti torrefioinnin aikana ja sen jälkeen kosteuden imeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä.

Kuljetettavuuden ja käsittelyn helpottamiseksi torrefioitu biomassa murskaataan ja pelletoidaan. Näin valmistettua lopputuotetta kutsutaan TOP-pelletiksi (TORrefied Pellet). TOP-pelletti on lähes hydrofobinen eikä vety ulkovarastoinnissa, sen tilavuuspohjainen lämpöarvo vastaa kivihiiltä, se käyttäytyy hiilimyllyjen jauhatuksessa ja pölypolttimilla kuten kivihiili, joten se soveltuu ihanteellisesti hiililaitoksiin sellaisenaan ilman muutosinvestointeja.

## 8. Biohiilen valmistus metsähakkeesta

Metsähakkeesta valmistettvien TOP-pellettien tuotantokustannukset torrefiointitehtaalla ovat arviolta 31–38 €/MWh ja 100 km:n päässä käyttöpaikalla 33–40 €/MWh.

Ensimmäinen kaupallisen mittakaavan torrefiointilaitos on luvanhakuvaiheessa, laitoksen rakentamisesta vastaavat ECN, Econcern ja Chemfo. Tehtaan suunniteltu kapasiteetti on 70 000 tn/a BO<sub>2</sub>-pellettiä. Laitoksen on ollut määrä valmistua vuoden 2009 lopulla.

## **9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali**

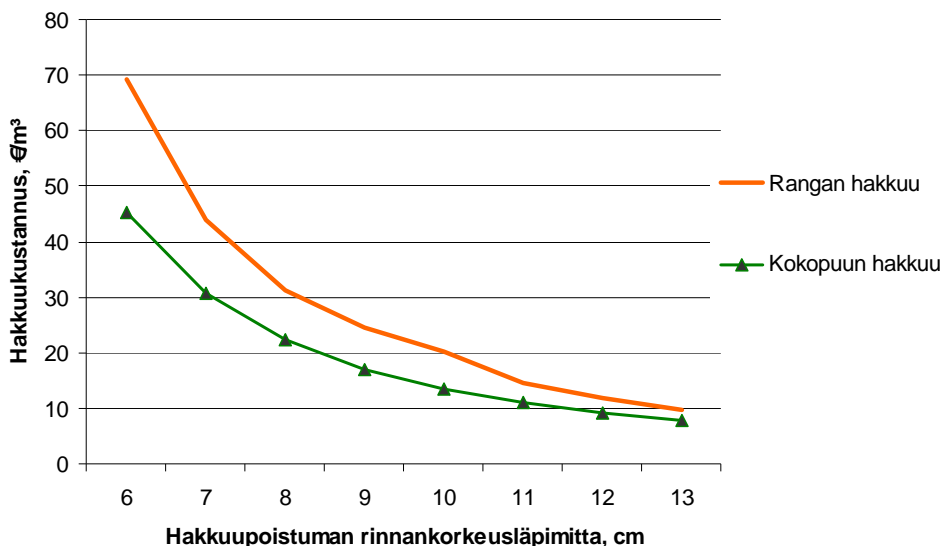
Kustannustekijät ovat koneisiin, työolosuhteisiin, työntekijöihin, organisaatioon tai tuotteeseen liittyviä muuttujia, jotka vaikuttavat työn tuottavuuteen ja kustannuksiin (Asikainen ym. 2001). Tietoja kustannustekijöistä ja niiden merkityksestä tarvitaan, kun arvioidaan eri korjuuteknologioiden ja menetelmien sekä toimintatapojen soveltuvuutta ja kilpailukykyä erilaisissa toimintaympäristöissä.

### **9.1 Korjuu**

#### **9.1.1 Puun tilavuus ja hakkuutapa**

Koneen tai laitteen ominaisuudet asettavat tekniset rajat koneen tuottavuudelle eri korjuuolosuhteissa ja toimintaympäristössä. Puun koko vaikuttaa ratkaisevasti hakkuutyön tuottavuuteen energiapuuharvennuksissa, samoin kuin kantojen nostossa. Esimerkiksi energiapuun korjuussa puun keskitilavuuden kasvu 15 litrasta 30 litraa laskee kokopuun tienvarsihintaa 25 %, jos oletetaan, että hakkuupoistuman hehtaarikertymä pysyy vakiona (Laitila 2008). Hakkuutyössä tuottavuus nousee puun tilavuuden kaksinkertaistumisen ansiosta 40 %. Nuorten metsien energiapuun korjuussa korjuukohteen valinta ja etenkin poistettavien puiden koko on merkittävä kustannuksiin vaikuttava tekijä. Harvennuksilla kuljettajan on valittava poistettavat puut ja lisäksi varottava vaurioittamasta jäljelle jääviä puita, mikä myös hidastaa hakkuutyötä. Jos energiapuuta olisi mahdollista korjata esim. käytäväharvennuksin tai koivikoiden aines- ja energiapuuplanttaaseilta avohakkuutekniikalla joukkokäsittelyä hyödyntäen, tuottavuuden nousu olisi arviolta 20–40 %.

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

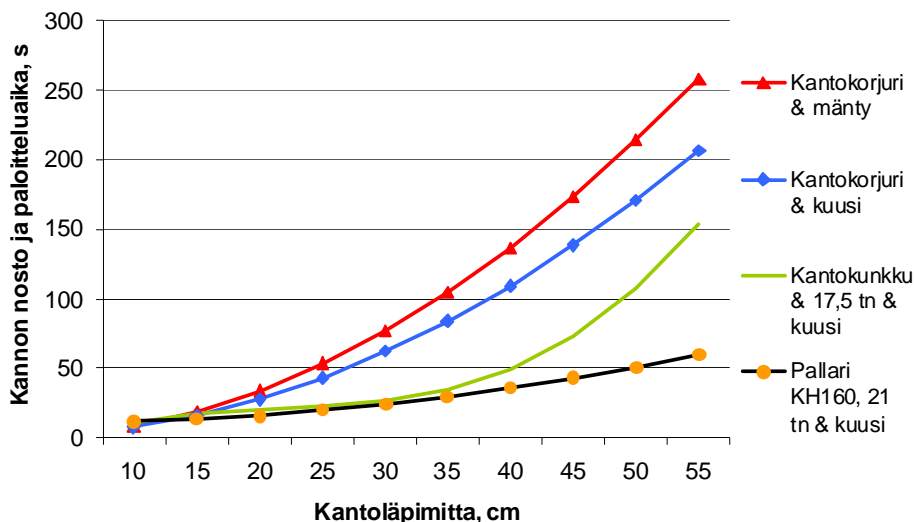


Kuva 51. Rangan ja kokopuun hakkuun kustannus rinnankorkeusläpimitan mukaan (Laitila ym. 2010).

Puukohtainen käsittelyaika on kokopuun ja rangan hakkuussa likimain samansuuruinen, eikä korjuumenetelmien välillä ei ole suurta eroa tehoajanmenekin jakautumisessa eri työvaiheisiin. Aivan pienten puiden karsinta on tosin hankalaa, ja kuljettajat pyrkivät mieluummin raivaamaan nämä rungot tai ottamaan ne talteen kokopuuna (Heikkilä ym. 2005). Kokopuun hakkuun tuottavuus on männiköissä ja koivikoissa samaa tasoa, mutta männiköissä karsinta laskee tuottavuutta 30–40 % ja koivikoissa selvästi vähemmän eli 10–20 %. Tämä johtuu pääosin siitä, että koivikoissa oksien karsinta laskee hakkuukertymää vähemmän kuin männiköissä (Heikkilä ym. 2005). Kokopuuna hakkuun kustannukset ovat rangan hakkuuta alemmat (Laitila ym. 2010), kun verrataan hakkuukustannusta hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitan mukaan (kuva 51). Männikössä ero rangan ja kokopuun hakkuukustannuksissa kapenee lähes olemattomiin, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta on 11 cm tai sitä suurempi. Ero johtuu siitä, että oksabiomassan suhteellinen osuus puun kokonaisbiomassasta pienenee puuston järeytyessä (Hakkila 2004, Repola ym. 2007).

### 9.1.2 Kantoläpimitta ja nostokoneen massa

Kantojen korjuussa nostettavien kuusen kantojen läpimitan kasvu 25 cm:stä 35 cm:iin parantaa nostotyön tuottavuutta peräti 80 % (Laitila ym. 2008b, Laitila ym. 2007a). Kannon käsittelyaika on molemmilla kantoläpimitoilla likimain sama ja tuottavuuden parantuminen on suoraan rinnasteinen kannon tilavuuden kasvuun. Kantojen korjuukohteilla kannon koon tilavuuden vaihtelut eivät ole niin suuria kuin nuorten metsien energiapuu harvennuksilla, joissa poistettavien puiden keskitilavuuksissa eri työmaiden välillä voi olla jopa kertaluokkien keroja. Metsälaissa on asetettu tietyt koko ja ikäkriteerit metsän uudistamiskäytölle, mikä ainakin osittain varmistaa nostettavien kantojen riittävän suuren tilavuuden nostotyössä päätehakuualoilla.



Kuva 52. Kantojen nosto- ja paloittelu-aika kuormatraktorialustaisella kantokorjurilla sekä 17 ja 21 tonnin kaivukoneilla (Laitila ym. 2008b, Laitila 2010).

Kuvassa 52 verrataan peruskoneen tyyppin ja massan vaikutusta kantojen nostotyön tuottavuuteen kantoläpimitan mukaan. Vertaluissa on mukana kaksi kaivukonetta, joista toisen massa on 17,5 tonnia ja toisen massa on 21 tonnia. Lisäksi vertailussa oli mukana metsätraktorin kuormaimen asennettu nosto- ja pilkontalaite. Kaivukoneiden nostotyön ajanmenekki oli samalla tasolla 35 cm:n kantoläpimitaan saakka. Sitä suuremmilla kannoilla kantojen prosessointiaika 17,5 tonnin kaivukoneella alkaa nousta huomattavasti jyrkemmin kuin suuremmalla

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

21 tonnin kaivukoneella. Pääsyy tuottavuuden alenemiseen ja nostoajan kasvuun oli aikatutkimuksissa käytetyn pienemmän kaivukoneen keveys, sillä koneen peräosa pyrki nousemaan ylös suurten kantojen nostossa. Kaivukoneisiin verrattuna kantokorjurin tuottavuus oli huomattavasti pienempi (kuva 52) ja syynä tähän oli mm. metsätraktorin kuormaimen heikompi nostoteho kaivukoneisiin verrattuna (kuva 53).



Kuva 53. Kantojen nosto- ja paloitteluaika kuormatraktorialustaisella kantokorjurilla (J. Laitila, Metla).

### 9.1.3 Kantojen paloittelu ja puhdistus

Kantojen korjuun vaikeimpana työvaiheena pidetään kantojen nostoa ja konekehittäely onkin pääosin keskittynyt siihen. Käytettävät työmenetelmät ja -laitteet ovat periaatteeltaan samoja kuin jo 1970-luvulla ja nostotyön tuottavuuden kasvu on perustunut laitteiden käytettävyyden parantumiseen ja peruskoneiden tehon kasvuun. Huomattavasti vähemmälle huomiolle laitetekniikan kehittelyn osalla on jäänyt kantojen paloittelu kaukokuljetuksen edellyttämään palakokoon ja juurakoiden tehokas puhdistus maa-aineksesta. Kokonaisten juurakoiden pinotiheys on suurusluokkaa 0,1 ja pilkonnalla pinotiheys voidaan nostaa 2–4-



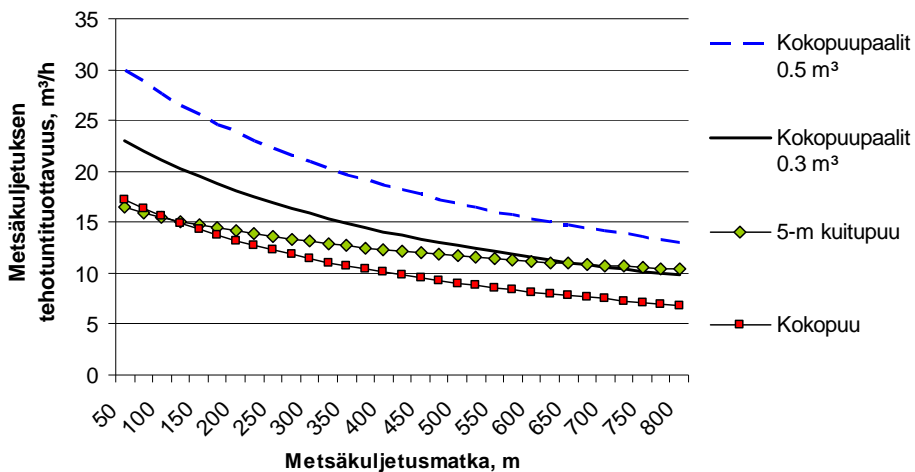
kertaiseksi (Hakkila 1976), mikä on selvä hyödyntämispotentiaali, kun auto-kuorman kantavuudesta nykyään jää käyttämättä 10 tonnia per kuorma huonon pilkkonnan ja pinotiheyden vuoksi.

Pinotiheyteen vaikuttavat mm. juurakon alkuperäinen koko, pilkkomismenetelmä, palakokojakauma, kuormaustapa ja ladonnan huolellisuus (Hakkila 1976). Kantojen pilkkonnan ja puhdistuksen osuus on nykyisellä korjuukalustolla lähes puolet nostotyön tehoajanmenekistä (Laitila ym. 2007a, 2008b). Puhdistus- ja pilkkontatyö perustuu pitkälti yksittäisen kantopalan käsittelyyn, kun nykykaluston hydrauliiikan tehoilla pystyttäisiin prosessoimaan huomattavasti suurempia käsittely-yksiköitä pelkästään laitteita ja menetelmiä kehittelemällä. Metsäkuljetuksessa pätevän puhdistusmenetelmän puute on estänyt tehokkaampien kuorma- ja purkumenetelmien käyttöönoton ja tuottavuuden tehostumisen taakkakoon kasvun kautta. Kantojen korjuun ehdoton edellytys, kilpailukykyisten korjuukustannusten ohella on, että polttoaineen laatu pystytään pitämään loppukäyttäjän vaatimalla tasolla myös kantojen puhtauden osalta.

### 9.2 Metsäkuljetus

Maastossa liikkuvien koneiden työ voidaan karkeasti jakaa kahteen päävaiheeseen: siirtymisiin ja kuormaukseen (Asikainen ym. 2001). Siirtymisen ajanmenekkiin vaikuttavat maaston ominaisuudet, kuljetusmatkat palstalta varastolle sekä kuormattavan ja prosessoitavan materiaalin määrä pinta-alaa kohden. Ajonopeus määrittää ajoneuvon kuljetuskyvyn yhdessä kuormatilan koon kanssa. Maastokoneilla nopeudet ovat tyypillisesti varsin alhaisia, vain muutamia kilometrejä tunnissa, maaston epätasaisuuden ja kantavuusrajoitteiden sekä maaston kaltevuuden vuoksi. Koneen kantokykyä rajoittaa ajoneuvon bruttomassa, joka vaikuttaa mm. sen maastoliikkuvuuteen ja raiteenmuodostukseen. Ulkomitoiltaan laaja tai korkea kuormatila heikentää ajoneuvon vakautta sekä aiheuttaa ongelmia, kun ajoneuvo joutuu liikkumaan metsässä kapeilla ajourilla. Kuormauksen ajanmenekkiin vaikuttavat kuormattavan materiaalin ominaisuudet sekä kourakasan koko, sijainti ja muoto. Metsäenergian korjuukohteilla kantavuus ajourilla on tavanomaista heikompi, koska oksabiomassa, joka normaalisti on pyritty kasamaan ajouralle parantamaan kantavuutta ja suojaamaan maanpintaa, otetaan talteen. Kantojen korjuukohteilla kantavuus heikkenee myös siksi, että kantojen nosto rikkoo maanpintaa.

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali



Kuva 54. Metsäkuljetusmatkan vaikutus kokopuun, 5 m:n kuitupuun ja kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuuteen. Hakkuupoistuma 60 m<sup>3</sup>/ha. (Laitila ym. 2009b).

Kokopuiden paalaus suurentaa taakkakokoa kuormaus- ja purkutyössä sekä kasvattaa metsäkuljetuksen kuormakokoa. Taakkakoon vaikutus metsäkuljetuksen tuottavuuteen on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa (Gullberg 1997, Väätäinen ym. 2005b, Nurminen ym. 2006, Laitila ym. 2007b ja Laitila ym. 2009b). Taakka- ja kasakoon merkitys on erityisen suuri harvennuksilla, joilla hakkuupoistuma on alhainen ja hakkuun jäljiltä puut ovat ripoteltuina ajouran varrelle pieniin kourakasoihin (Nurminen ym. 2006). Pitkillä metsäkuljetusmatkoilla kokopuupaalauksen edut tulevat esille kuormakoon kasvun kautta, kun paalien metsäkuljetuksen tuottavuutta verrataan esim. kokopuun metsäkuljetuksen tuottavuuteen (Laitila ym. 2009b). Kuvassa 54 verrattiin metsäkuljetusmatkan vaikutusta kokopuun, 5 m:n kuitupuun ja kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuuteen, kun hakkuupoistuma oli 60 m<sup>3</sup>/ha. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus oli liki kaksinkertainen kokopuun ja kuitupuun metsäkuljetukseen verrattuna, kun metsäkuljetusmatka oli 300 metriä ja paalin kiintotilavuus oli 0,5 m<sup>3</sup>. Jos kokopuupaalin kiintotilavuus pieneni 0,3 m<sup>3</sup>:ksi, niin paalien metsäkuljetuksen tuottavuus oli vielä 20–40 % korkeampi muihin puutavaralajeihin verrattuna. Kuvan 54 vertailussa kokopuukuorman koko oli 6,5 m<sup>3</sup>, kuitupuukuorman 11,0 m<sup>3</sup> ja paalikuorman 24 kokopuupaalia.

Metsäkuljetuksessa kuormakoon kasvu 5 m<sup>3</sup>:stä 8 m<sup>3</sup>:iin esimerkiksi kuormatila laajentamalla parantaa metsäkuljetuksen tuottavuutta 10–15 % (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004). Vastaavasti metsäkuljetusmatkan lyhentyminen

300 metristä 150 metriin parantaa tuottavuutta 18–23 %. Tuottavuuden parantuminen kuljetusmatkan lyhentyessä on sitä suurempi, mitä pienempi on metsäkuljetuksen kuormakoko. Materiaalin hehtaarikertymän kasvu 45 m<sup>3</sup>:stä 75 m<sup>3</sup> nostaa metsäkuljetuksen tuottavuutta noin 15 % (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004). Kasaamattomalla tai huonosti kasatulla latvusmassalla metsäkuljetuksen tuottavuus on reilut 10 % pienempi kuin kasatulla latvusmassalla (Rieppo 2002). Kantojen metsäkuljetuksessa kourataakan koon kasvattamista vaikeuttaa kanto-palojen epäyhtenäinen koko ja rakenne. Lisäksi työtä hidastaa epäpuhtauksien ravistelu ja kontrollointi, jos kantoja ei ole kunnolla ravisteltu puhtaaksi (Lauhanen ja Laurila 2007) nostotyön yhteydessä.

### 9.3 Työvaiheiden ajanmenekki ja työvaiheiden integrointi

Väätäisen ym. (2007) simulointitutkimuksessa selvitettiin, minkä verran työvaihekestot ja koneiden hankintahintojen muutokset vaikuttavat ainespuun korjuun yksikkökustannuksiin Pohjois-Pohjanmaalla kun aineistona oli todellinen leimikkoaineisto yhden vuoden ajalta. Hakkuun ajanmenekin pieneneminen 10 %:lla laski ainespuun korjuun yksikkökustannusta peräti 4,8 %, kun korjuuketjussa hakkuukoneena ja kuormatraktorina oli kevyt yleiskone. Kuormattuna- ja tyhjänäajon ajanmenekin aleneminen 10 %:lla laski kustannusta 1,1 %. Kuormauksen ja purkamisen ajanmenekin tehostuminen 10 % laski kustannusta puolestaan 2,7 %. Hakkuukoneen ja kuormatraktorin hankintahinnan aleneminen 10 %:lla pienensi puunkorjuun yksikkökustannusta 2,8 % (Väätäinen ym. 2007). Ongelmia puunkorjuussa aiheuttaa koneiden tuottavuuksien yhteensovittaminen, jota on pyritty lieventämään mm työvuorojärjestelyin ja työaikajoustoin. Harvennuksilla ajokoneen kapasiteetti on vajaakäytössä, kun hakkuukone ei ehdi hakata riittävästi ainespuuta. Päätehakuilla, joissa rungon tilavuus on suurempi kuin harvennuksilla, puollonkaulaksi puolestaan muodostuu usein puutavaran lähikuljetus.

Työvaiheiden ja työtehtävien yhdistämisellä voidaan lisätä tuottavuutta ja alentaa kustannuksia. Tutkimustulosten perusteella (Laitila ja Asikainen 2002) esimerkiksi latvusmassan korjuun ja maanmuokkauksen yhdistämisellä saavutetaan 5–10 % suurempi tuottavuus kuin sillä että työt tehtäisiin eri koneilla eri aikaan. Myös pääomakustannukset pienenevät, koska yhdistelmämenetelmässä ei tarvita erillistä maanmuokkauskonetta ja metsäkuljetuskonetta, vaan pärjätään yhdellä peruskoneella. Lisäksi koneen käyttöaste kasvaa ja siirtokustannukset pienenevät, kun koneella voidaan tehdä kaksi työtä yhdellä kertaa. Myös kanto-

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

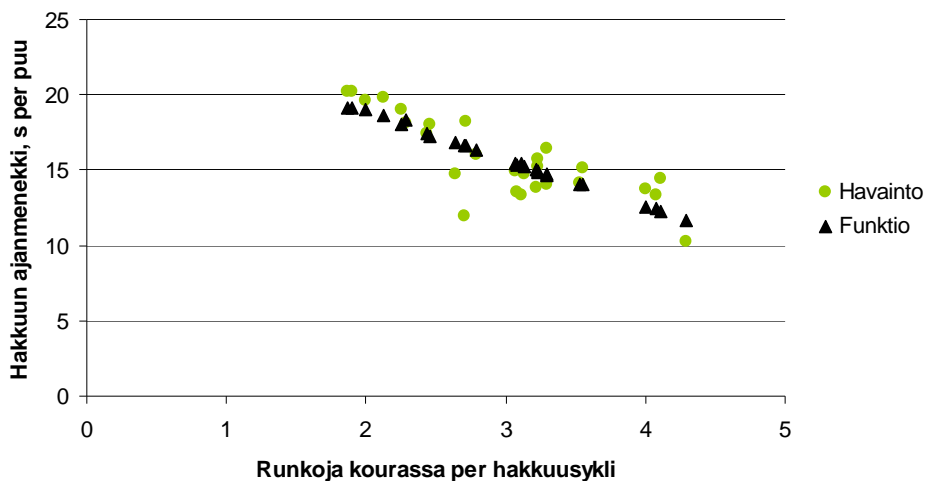
jen korjuussa maanmuokkaus voidaan liittää osaksi kantojen nostotyötä. Tutkimustulosten mukaan maanmuokkaus lisää hehtaarikohtaista nostotyön ajanmenekkiä 2–3,5 tuntia (Saarinen 2006, Laitila ym. 2007a), mikä on noin yksi kolmasosa kaivukoneella erillisenä työvaiheena tehtävän maanmuokkauksen ajanmenekistä.



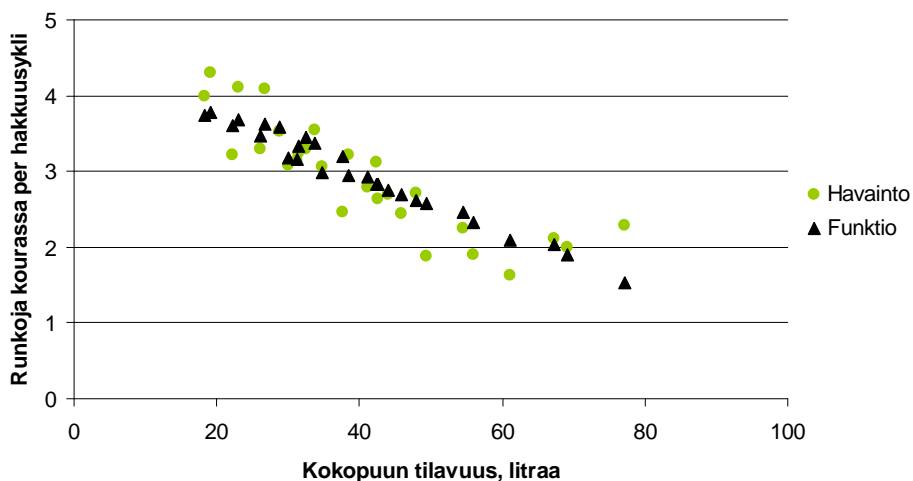
Kuva 55. Puiden keruulla hakkuulaitteeseen vähennetään kuormaimen liikkeitä ja tehostetaan hakkuutyön tuottavuutta yksinpuin käsittelyyn verrattuna (J. Laitila, Metla).

Hakkuun tuottavuutta voidaan nostaa keräämällä hakkuulaitteeseen kaatovaiheessa useita puita samanaikaisesti (kuva 55) ja karsimalla ja katkomalla ne yhtenä kourataakkana. Puiden kouraan keräilyllä ja joukkokäsittelyllä vähennetään kouran liikkeitä ja parannetaan koneen tuottavuutta verrattuna perinteiseen yksinpuin käsittelyyn koneellisessa puunkorjuussa. Kourataakassa olevien puiden kappalemäärän kasvu alentaa puukohtaisesti laskettavaa hakkuuaikaa. Joukkokäsittelyhakkuussa puukohtaiseen ajanmenekkiin hakkuusykliissä vaikuttaa kourataakassa olevien puiden kappalemäärä (kuva 56). Kourataakassa olevien puiden kappalemäärään vaikuttaa puolestaan kokopuun tilavuus ja hakkuupoistuman tiheys. Kokopuun tilavuuden kasvaessa hakkuulaitteen kouraan mahtuvien puiden kappalemäärä laskee ja vastaavasti puiden koon pienetessä kouraan mahtuvien puiden kappalemäärä kasvaa (kuva 57).

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali



Kuva 56. Hakkuulaitteessa olevien runkojen kappalemäärän vaikutus puukohtaiseen hakkuuajanmenekkiin hakkuusyklissä. Kuvassa on verrattu mallilla saatuja arvoja aikatutkimuksissa saatuihin havaintoihin (Laitila ym. 2009a, Kärhä ym. 2009a).



Kuva 57. Kokopuun tilavuuden vaikutus hakkuutyön taakkakokoon hakkuusyklissä. Kuvassa on verrattu mallilla saatuja arvoja aikatutkimuksissa saatuihin havaintoihin (Laitila ym. 2009a, Kärhä ym. 2009a).

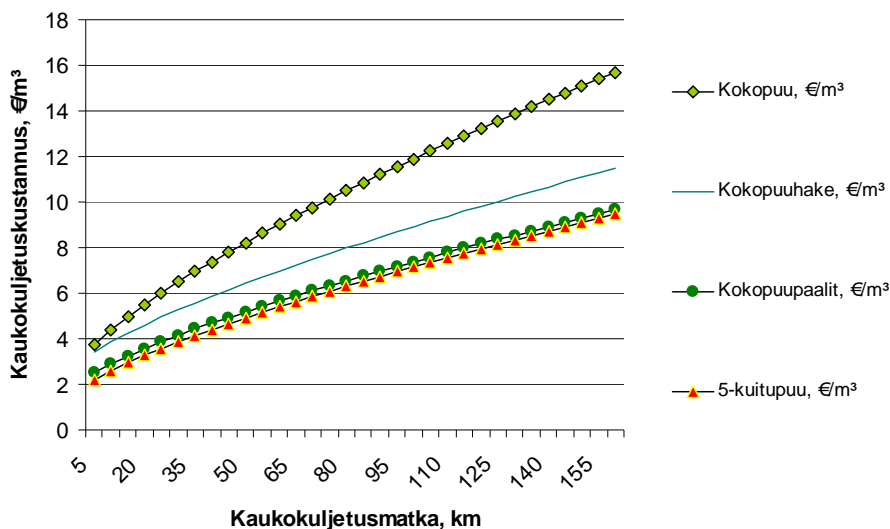
## 9.4 Kaukokuljetus

### 9.4.1 Kuormankäsittely ja kuormakoko

Materiaalin käsittelykapasiteetti kertoo, miten nopeasti kone kykenee kuormaan ja purkamaan tai prosessoimaan materiaalia. Kuormaus- ja purkukapasiteetti riippuu kuormaimen ulottuvuudesta, liikenopeuksista sekä ohjattavuudesta (Asikainen ym. 2001). Lisäksi nostokyky ja kuormaimen dimensiot määräävät, kuinka paljon materiaalia kuormain voi ottaa eri etäisyyksiltä. Prosessointinopeus taas määräytyy prosessointiosan (esim. hakkuri) tehosta, mitoituksista, syöttölaitteesta ja asetuksista. Esimerkiksi hakkurilla prosessointinopeutta rajoittaa koneen kuormauskapasiteetti. Harvennuspuulla kuormaus ja hakkuriin syöttö on tehokkaampaa kuin latvusmassahakkeella, minkä vuoksi haketustyön tuottavuus on suurempi (Asikainen ym. 2001).

Kuitupuun kaukokuljetuskustannukset ovat 0,2–0,3 €/m<sup>3</sup> alemmat kuin kokopuupaalien kuljetuskustannukset (kuva 58, Laitila ja Väättäinen 2010). Kokopuupaalien kaukokuljetuksessa kokopuupaalien kuormaus- ja purku-aikaa hidastaa niiden lyhyys pitkään kuitupuuhun verrattuna, vaikka kaukokuljetuksen kuormakoko onkin likimain sama. Pitkällä kuitupuulla vetoautoon mahtuu yksi puunippu ja perävanuun puolestaan kaksi nippua. Kokopuupaaleilla vetoautoon on kuormattava kaksi paalinippua ja vetoautoon puolestaan kolme tai neljä, jotta saavutetaan likimain sama kuormakoko kiintokuutiometreinä (Laitila ym. 2009b). Viiden tai kuuden nipun sitomiseen ja kuormaliinon avaamiseen menee puolestaan enemmän aikaa kuin kolmen rankanipun sitomiseen ja avaamiseen. Lisäksi kokopuupaaleilla kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen on varattava huomattavasti enemmän aikaa kuin karsitulla puutavaralla (Laitila ym. 2009b). Kokopuuhakkeen kaukokuljetuskustannukset ovat noin 2 €/m<sup>3</sup> korkeammat kuin kuitupuun tai kokopuupaalien kaukokuljetuskustannukset (kuva 58). Ero johtuu hakekuorman suuremmasta kuormaus- ja purkuajasta sekä hieman pienemmästä kaukokuljetuksen kuormakoosta kuitupuuhun ja kokopuupaaleihin verrattuna. Pienestä kuormakoosta johtuen kokopuun kaukokuljetuskustannukset ovat kustannusvertailun suurimmat ja kuljetuskustannukset nousevat muita menetelmiä jyrkemmin kaukokuljetusmatkan kasvaessa (kuva 58).

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali



Kuva 58. Kokopuun, 5 m:n kuitupuun, kokopuupaalien ja kokopuuhakkeen kaukokuljetuskustannukset kuljetusmatkan mukaan (Laitila ja Väättäinen 2010).

Tässä tutkimuksessa latvusmassan haketuksen tuottavuus oli 65 i-m<sup>3</sup> ja kokopuun haketuksen tuottavuus 85 i-m<sup>3</sup>. Tuottavuuserosta seurasi, että samaa kuljetuskalustoa käytettäessä latvusmassahakkeen kuormanteko-aika oli 0,4 tuntia suurempi kuin kokopuuhakkeella. Kustannuksiksi muutettuna latvusmassahakkeen haketuskustannus oli 1,6 €/m<sup>3</sup> kalliimpi ja kuljetuskustannus suuremmasta kuormaus/haketusajasta johtuen 0,5 €/m<sup>3</sup> korkeampi (kuvat 39 ja 40).

## 9.5 Toimintaympäristö

### 9.5.1 Hankinnan mittakaava

Metsähakkeen hankinnan mittakaavan vaikutukset korjuukustannuksiin voivat olla sekä positiivisia että negatiivisia. Metsähakkeen käyttömäärien kasvaessa ja kilpailun kiristyessä korjuu joudutaan ulottamaan entistä laajemmalle maantieteelliselle alueelle. Lisäksi korjuuolosuhteiltaan ja kertymiltään aikaisempaa epäedullisemmat työmaat on otettava korjuun piiriin, jotta käyttöpaikkojen polttoaineen tarve saadaan tyydytettyä (Asikainen ym. 2001). Toisaalta hankinnan mittakaavan kasvattaminen mahdollistaa korjuuketjujen entistä paremman työllistymisen. Lisäksi erityyppisten kuljetus- ja varastohallinnan optimointimene-

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

telmien käyttö tulee mahdolliseksi, kun ohjattavia kalustoyksiköitä on riittävä määrä.

Korjuukustannuksiin ja käyttöpaikkahintaan vaikuttavat mm. vuosittain korjattavissa oleva puumäärä, koneiden työllistyminen, rungon tilavuus, puulaji, metsäkuljetusmatka, työmaan koko, kaukokuljetusmatka sekä toiminnan organisointi. Korjuuolosuhteet maan eri osissa vaihtelevat voimakkaasti korjattavissa olevan määrän, kasvupaikkatekijöiden, puulajisuhteiden, työmaankoon sekä tiestön, vesistöjen ja peltojen tiheyden mukaan (Asikainen ym. 2001).

Yksittäisen käyttöpaikan metsähakkeen käytön volyyymi määrää hankinta-alueen koon ja näin ollen edullisimman korjuumenetelmän. Korjuuketjujen valintaan tehtävät tarkastelut on räätälöitävä käyttöpaikkakohtaisesti ja yleistarkastelut voivat johtaa väärin johtopäätöksiin. Alueilla, joissa on runsaat metsävarat ja metsäenergian käyttö on pientä, metsähaketta on saatavilla runsaasti jo pieneltä hankintasäteeltä. Sen sijaan käyttöpaikoilla, joissa hankinta-alue on puolimpyrjän muotoinen, metsähakkeen kertymä on pieni tai kilpailu materiaalista on kova, käyttöpaikan tarvitsema polttohake on korjattava huomattavasti suuremmalta hankintasäteeltä. Korjuuketjuissa, joissa materiaalia kuljetetaan tiivistämättömänä haketuspaikalle, korjuukustannukset nousevat hankintasäteen kasvessa nopeasti. Välivarastohaketus tai latvusmassan tiivistäminen risutukeiksi kasvattavat kuormakokoa ja kuljetuskapasiteettia, eivätkä niihin perustuvat menetelmät reagoi yhtä voimakkaasti kaukokuljetusmatkan kasvuun (Asikainen ym. 2001).

Koneiden työllistyminen on metsähakkeen kilpailukyvyn kannalta tärkeä kustannustekijä. Kalliit koneetjut edellyttävät täystyöllisyyttä, jotta kiinteiden kustannusten osuus yksikkökustannuksista ei nousisi hintakilpailukyvyn kannalta liian suureksi. Kiinteät kustannukset ovat toiminta-asteesta riippumattomia ja niitä ovat mm. pääoman korko ja poistot, vakuutukset sekä suuri osa työ kustannuksista. Täystyöllisyys takaa paremmin myös ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden ja alalla pysymisen. Muuttuvat kustannukset reagoivat puolestaan koneen käyttömäärän mukaan ja niitä ovat poltto-, voiteluaine-, korjaus- ja huolto-kustannukset sekä kulkemiskorvaukset

### 9.5.2 Materiaalin toimitus ja vastaanotto

Tienvarsihaketuksen perustuvassa toimitusketjussa kuormauksen ajanmenekkiin voidaan haketustuottavuuden ohella vaikuttaa kohteiden valinnalla sekä varasto ja työmaajärjestelyin. Rannan ym. (2002) hakeautoseurannassa merkittä-



## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

vä osa auton ajankäytöstä haketustyömaalla kului muuhun kuin varsinaiseen kuormaukseen, kuten varastoajoon ja kääntymisiin. Työmaan tulisikin olla sellainen, että yhdistelmä voidaan kuormata perävaunua irrottamatta tai että yhdistelmällä päästään ainakin mahdollisimman lähelle hakkuria ja perävaunun siirteily on helppoa (Ranta ym. 2002). Hakkeen kuljetuksessa autojen purkutekniikalla ja vastaanottoasemien purkutaskujen koolla on selkeä vaikutus autojen läpimenoaikoihin voimalaitoksella. Vastaanottoaseman on kyettävä toimimaan tehokkaasti myös voimalaitoksen toimiessa täydellä kapasiteetillaan (Ranta ym. 2002). Tällöin nopeat läpimenoajat voimalaitoksella turvaavat tasaisen polttoainehuollon ja kuljetusyrittäjälle paremmat mahdollisuudet hyödyntää kalustoaan kustannustehokkaalla tavalla.

Simulointitutkimuksessa (Väätäinen ym. 2005a) selvitettiin hakkeen vastaanottoaseman tehon vaikutusta autokaluston jonotusaikaan Kuopion kaupungin voimalaitoksella, kun voimalaitoksen polttoaineen kulutus oli korkeimmillaan eli 72 rekkakuormaa vuorokaudessa. Tutkimuksessa voimalaitoksen purkutaskun kapasiteetti oli aloitustilanteessa 146 m<sup>3</sup>/tunnissa ja vertailutilanteessa teho nostettiin kapasiteettiin 200 m<sup>3</sup>/tunnissa. Vastaanottojärjestelyn tehostumisen ansiosta autojen keskimääräinen jonotusaika laski 65,5 minuutista 19,5 minuuttiin. Kun polttoaineen kuljetuksen ohjauksessa käytettiin em. lisäksi aikataulutusta, niin keskimääräinen jonotusaika laski 43,5 minuutista 6,5 minuuttiin. Jos jätetään huomioimatta vastaanottoaseman kapasiteetin noston lisäinvestointikustannukset, niin jonotusaikojen lyhentymisen kustannussäästö tämän tutkimuksen lukuarvoilla laskien oli 0,66–0,82 €/m<sup>3</sup>.

Voimalaitokselle toimitettavan polttoaineen energiasisältö on merkittävä kustannustekijä myös logistisesta näkökulmasta. Metsähakkeen energiasisältö irto-kuutiometriä kohden laskettuna on noin 0,1 MWh pienempi turpeeseen verrattuna, mistä seuraa, että voimalaitokselle tulevien autokuormien lukumäärä kasvaa, kun turvetta korvataan metsähakkeella. Kuopion tapauksessa voimalaitokselle saapuvien rekkojen määrä kasvoi 1,5 %, kun metsähakkeen osuus nostettiin 10 %:iin voimalaitoksen polttoaineen kulutuksesta (Väätäinen ym. 2005a). Vastavasti, kun metsähakkeen osuus oli 50 % polttoaineen kulutuksesta, niin rekkaliikenne kasvoi 6,3 %. Metsähakkeen hankinnassa toiminnan ohjausta vaikeuttavat määrän mittaukseen ja mittauskäytäntöön liittyvät ongelmat. Mittauksen tarkkuus on usein keho, eikä vaihtelun aiheuttajia ja suuruutta tunneta. Kun sovelletaan kaksivaiheista mittaukseen, voi lopullinen tulos viivästyä kohtuuttomasti (Hakkila 2006). Myös mittauskustannus saattaa nousta materiaalin arvoon näh-

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

den kohtuuttoman suureksi, etenkin jos mittauskertoja on monta toimitusketjun eri vaiheissa tai materiaali vaihtaa välillä omistajaa.

### 9.5.3 Työvoiman ja kaluston tarve

Metsäteho ja Pöyry (Kärhä ym. 2009c) tekivät resurssitarvelaskelman, kuinka paljon kalustoa ja työvoimaa laajamittakaavainen tuotanto vaatisi, jos metsähakkeen tuotanto ja käyttö olisi 25–30 terawattituntia (TWh) Suomessa vuonna 2020. Resurssitarvelaskelmassa oletettiin, että vuonna 2020 käytetystä metsähakkeesta 43 % tuotettiin latvusmassasta, 29 % kannoista ja 28 % nuorista metsistä korjatusta pienpuusta. Latvusmassa- ja pienpuuhakkeen tuotannossa tienvarsihaketus oli päätuotantomuoto ja kannoilla käyttöpaikkamurskaus. Koneiden ja autojen hankintahintoina käytettiin alkuvuoden 2009 hintoja. Selvityksessä oletettiin, että kaikki metsähakeraaka-aine ja valmis metsähake kuljetetaan autolla. Vuonna 2020 rautatie- ja vesitiekuljetuksen osuus lienee nykyistä suurempi, mikä vähentää laskelmassa määritettyä resurssitarvetta.

Metsätehon ja Pöyryn (Kärhä ym. 2009c) resurssitarvelaskelman mukaan metsähakkeen laskennallinen tuotantokalustotarve olisi 1 900–2 200 konetta ja autoa, eli 3,3–4,0-kertainen määrä nykyiseen verrattuna. Em. kaluston kokonaihankintakustannukset olisivat 530–630 miljoonaa euroa (alv. 0 %). Koneen ja autonkuljettajien työvoimatarve oli 3 400–4 000 henkilöä eli 3,4–4,1-kertainen määrä verrattuna nykyiseen laskennalliseen kuljettajamäärään metsähakkeen tuotannossa. Välitön ja välillinen työvoimantarve huomioiden tarvittava henkilömäärä olisi 4 200–5 100 henkilötyövuotta vuonna 2020 (Kärhä ym. 2009c).

### 9.5.4 Raaka-aineen osto ja saatavuus

Latvusmassan ja kantojen korjuumäärät ovat kytköksissä ainespuun vuotuisiin hakkuumääriin ja hakkeen raaka-aineen hankinta on tiukasti kytketty osaksi puukauppaa ja puunkorjuuta etenkin metsäteollisuusyhtiöiden omien käyttöpis- teiden läheisyydessä. Puukauppatapahtuman kannalta on koettu luontevaksi ja vaivattomaksi, että sekä myyjä että ostaja voivat tehdä samalla kertaa kaupan kaikista kyseiseltä leimikolta kertyvistä puutavaralajeista. Metsäenergiaa markkinoidaan osana puukauppa ja metsähakkeesta on lyhyessä ajassa tullut yksi uusi puutavaralaji tukki- ja kuitupuiden joukkoon. Latvusmassan ja kantojen kanto- hinta maksetaan pinta-alaperusteisena korvauksena tai metsähakkeen määrä johdetaan korjatun ainespuun määrästä suhdeluvun avulla. Metsäenergian tal-

teenottoa päätehakkuualoilta on nimellisen kantohinnan ohella markkinoitu mm. nopeutuneen metsänuudistamisen avulla, alentuneina maanmuokkaus- ja viljelykustannuksina sekä sillä, että energiapuun korjuu helpottaa hakkuualueella liikumista ja virkistyskäyttöä. Nuorten metsien energiapuun korjuuta on puolestaan markkinoitu etenkin metsänhoidollisilla eduilla. Korjuun markkinoinnissa käytetyt argumentit vastaavat niitä arvoja, joiden vuoksi puunmyyjät kokevat mielekkääksi myydä tai luovuttaa metsähaketta energiantuotantoon (Rämö ym. 2001, Rämö ja Toivonen 2001, Järvinen ym. 2006).

Energiapuun käytön lisäämistä pidetään haastavana tehtävänä myös puun tarjonnan näkökulmasta. Etelä-Savossa tehdyn tutkimuksen mukaan energiapuuta tarjoavat ennen kaikkea yli 100 hehtaaria metsää omistavat ja maaseudulla asuvat metsänomistajat (Mynttinen 2010). Vähiten energiapuuta tarjoavat kaupungeissa asuvat metsänomistajat. Kaupunkilaismetsänomistajien aktivoiminen on siten ratkaisevaa ja heille suunnattu energiapuuasioihin liittyvä tiedottaminen erittäin tärkeää, mikäli energiapuun tarjontaa halutaan vauhdittaa. Energiapuukorjuuta puoltavina seikkoina metsänomistajat pitivät ennen kaikkea paikallista käyttöä energialähteenä, tuontien korvaamista kotimaisella, metsämaishoidon ja metsän virkistyskäytön edistämistä sekä metsän kasvuun ja jäävän puuston laatuun liittyviä seikkoja. Tutkimuksessa (Mynttinen 2010) metsänomistajat ilmoittivat halukkuutensa myydä energiapuuta maksua vastaan eri energiapuulajien osalta seuraavasti:

- karsimaton kokopuu 76 %
- karsittu ranka 67 %
- oksa- ja latvusmassa 68 %
- kannot 46 %.

Tutkimus (Mynttinen 2010) toi esiin useita energiapuun saatavuuden kannalta keskeisiä energiapuumarkkinoiden heikkouksia, kuten alhaiset hinnat ja sekavat hinnoitteluperusteet, kirjavat mittauskäytännöt, vaikeus löytää energiapuun ostajia ja korjuun heikko kustannustehokkuus. Moniin näistä tekijöistä ei kuitenkaan lyhyellä aikavälillä voida vaikuttaa. Tavoitteena tulisi kuitenkin olla, että energiapuun myynti saataisiin mahdollisimman helpoksi ja ymmärrettäväksi metsänomistajan näkökulmasta. Sen lisäksi että energiapuusta odotetaan korkeampaa korvausta, sen hinnoittelutapaan, Kemera-tukikäytäntöön, mittaamiseen ja maksuaikatauluihin kaivataan selkeyttä ja johdonmukaisuutta (Mynttinen 2010).

### 9.6 Liiketoimintamallit

Verkostomuotoisessa toiminnassa on tärkeää eri toimijoiden keskinäinen tiedonvälitys. Moniasiakkuuden ja verkostoliiketoiminnan kehittämisen keskeiseksi käytännön esteeksi on todettu eri toimijoiden tietojärjestelmien yhteensopimattomuus ja tietojen standardoimattomuus (Räsänen 2007). Tietojen ja sanomien välittäminen eri osapuolten kesken ei ole mahdollista, ellei ole luotu yhteisiä sääntöjä sille, mitä tiedot tarkoittavat ja miten niitä pitää tulkita ja käsitellä. Käytännön puunkorjuussa standardoimattomuus on usein tarkoittanut sitä, että yrittäjä joka on hankkinut vain yhden asiakkaan tietojärjestelmät koneisiinsa, ei ole voinut toteuttaa muiden asiakkaiden toimeksiantoja tiedonsiirron ongelmien vuoksi. Standardoinnilla luodaan avoimet rajapinnat tietojen ja sanomien siirtämiseksi käyttäjältä toiselle sekä tietojärjestelmästä toiseen (Räsänen 2007). Puunhankintalogistiikka samoin kuin metsähakkeen hankintalogistiikka on toimitusketjun hallintaa puukaupan teosta materiaalin toimittamiseen tehtaalte tai voimalaitokselle ja sitä ohjataan tiedon avulla.

Verkostojen johtamisen suurimpia haasteita on yhteisen strategian ja sen toteuttamiseen liittyvien pelisääntöjen luominen (Rese 2006). Verkostoitumisesta tulee olla hyötyä kaikkien verkostoon kuuluvien yritysten liiketoiminnalle (Rantala ja Kulmala 2006). Yhteisen verkostostrategian toteuttamisen ongelma syntyy yleensä toimijoiden sitouttamishaluttomuudesta. Oppportunistinen yritys on mukana verkostossa saadakseen sen toiminnasta hyötyä, muttei oma-aloitteisesti toimi verkoston eduksi, eikä noudata verkoston toimintaperiaatteita, ellei niistä ole sille välitöntä hyötyä (Laaksonen 2006). Verkostoitumalla saavutettavien hyötyjen mittaaminen ja jakaminen verkostoon osallistuvien yritysten kesken on verkoston toiminnan jatkuvuuden kannalta ensiarvoisen tärkeää (Ollus ym. 1998). Liikesuhteiden ympärille rakentuu verkosto, jossa jokainen keskittyy oman ydinosaamisensa ja liiketaloudellisen kannattavuutensa näkökulmasta tärkeimpiin toimintoihin (Rantala ja Kulmala 2006). Koska tuottoihin ei voi vaikuttaa kilpailuilla markkinoilla yksin, korostuu tuotantoverkostoissa kustannusten hallinnan rooli (Seppänen ym. 2002). Toimitusketjussa voiton maksimointi on yhtä kuin kustannusten minimointi (Vesterinen 2007).

Korjuukoneiden siirtokustannusten on todettu olevan 6–12 % puunkorjuun kokonaiskustannuksista (Väätäinen ym. 2005b). Yhden tai kahden korjuuketjun yritykset turvautuvat konesiirroissa pääosin omaan lavettikalustoon, vaikka saatavilla olisi myös koneiden siirtopalveluja tarjoavia kuljetusyrittäjiä (kuva 59). Siirtolavettien matala käyttöaste ja pienet vuotuiset korjuumäärät nostavat kone-

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

siirtojen osuutta puunkorjuun kokonaiskustannuksista merkittävästi. Useimmissa yhden tai kahden koneketjun yrityksissä siirtolavetin vuotuiset ajotunnit ovat alle 600 ja ajokilometrit alle 15–20 000. Siirtokaluston tehokkaampaa käyttöä edistäviksi keinoiksi on listattu mm. siirtolavetin yhteisomistus kahden tai useamman korjuuyrittäjän kesken, siirtolavetin vuokraus, alueyrittäjän tarjoamat siirtopalvelut osayrittäjille tai palvelun osto erilliseltä kuljetusyrittäjältä (Väätäinen ym. 2008).



Kuva 59. Koneiden siirtopalvelun osto oman kuljetuslavetin sijaan voi olla eräs keino säästää kustannuksissa etenkin pienissä koneyrityksissä (J.Laitila, Metla).

Keski-Suomen alueelle sijoitetussa simulointitutkimuksessa (Väätäinen ym. 2008) selvitettiin leimikkoaineiston avulla, voidaanko puunkorjuuyrityksen kannattavuutta parantaa yrityksen toimintasäteen pienentämisellä sekä moniasiakkuudella nykyisin vallalla olevan yhden asiakkaan toimintamallin sijaan. Moniasiakkuuteen perustuvassa toimintastrategiassa, jossa toimitaan monelle puunostajalle, korjuuyrittäjällä on etukäteen tiedossa kunkin puunostajan leimikkovarannot kahden tai kolmen työmaan osalta. Aiempaa suurempi ennakkotieto leimikkovarannoista antaa korjuuyrittäjälle paremmat mahdollisuudet kettuttaa leimikoita, vähentää konesiirtojen määrää ja toimia tavanomaista pienemmällä toimintasäteellä.

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

Simulointitutkimuksessa tutkittiin kannattavuuden parantamista kolmesta näkökulmasta: puuta ostavien asiakkaiden määrän lisääminen ja sitä kautta maantieteellisen toiminta-alueen pienentäminen vuotuisen korjuumäärän pysyessä samana, koneyrittäjän tiedossa olevan korjuukohdevarannon kasvattaminen sekä siirtopalvelujen tarjoaminen toisille puunkorjuuyrittäjille yrityksen siirtolavetilla. Lisäksi tarkasteluun otettiin korjuukaluston vuotuisen käyttömäärän kasvun ja tasaisen läpivuotuisen kaksivuorotyöjärjestelmän vaikutukset puunkorjuun kustannuksiin (Väätäinen ym. 2008). Tehty tutkimus keskittyi yritykseen, jolla oli käytössään kolme korjuuketjua.

Simulointitutkimuksen tulokset osoittivat, että korjuutoiminnan organisoiminen kahteen työvuoroon työvuorojoustoin (korjuusuoritteiden kasvu), korjuukoneiden siirtopalvelun tarjoaminen muille korjuuyrittäjille sekä mahdollisimman pieneen toimintasäteeseen pyrkiminen useamman kuin yhden asiakkaan myötä avasivat selkeitä kustannussäästömahdollisuuksia kolmen koneketjun yrittäjän tapauksessa. Em. tekijät yhdistävässä toimintamallissa kolmen korjuuketjun yrittäjän puunkorjuun yksikkökustannukset laskivat 7,2 %:n alkutilanteeseen verrattuna (Väätäinen ym. 2008). Merkittävimmät kustannussäästöt toivat moniasiakkuus (3,3 % säästö) ja korjuusuoritteiden kasvattaminen käyttämällä kahta työvuoroa (2,0 %). Kustannussäästöpotentiaali kulminoitui konesiirtoihin: siirtokustannukset vähenivät siirtomatkojen ja siirron kestojen pudotessa. Korjuukoneiden kustannussäästö koostui koneiden käyttöasteiden kasvusta. Merkillepantavaa oli myös se, että em. tehostamispotentiaalin lisäksi toimintasäteiden pieneminen lyhensi kuljettajien päivittäisen työmatkan pituutta ja siten olettavasti paransi kuljettajien työviihtyvyyttä. Lisäksi toimittaessa pienellä toimintasäteellä ja tutussa ympäristössä korostuvat paikallistuntemuksen edut.

### 9.7 Yhteenveto

Metsähakkeen vuoden 2020 käyttöavoituksen saavuttaminen edellyttää, että jatkossa metsähakkeen käyttömäärä kasvaa likimain miljoonalla kiintokuutiometrillä per vuosi. Käytön kasvu tarkoittaa, että korjuuseen ja kuljetukseen tarvitaan joka vuosi lisää ammattitaitoista työvoimaa ja kalustoa. Metsänomistajia on myös aktivoitava, sillä energiapuukauppojen määrä kasvaa samaa tahtia kuin hankintamäärät lisääntyvät. Energiapuumarkkinoiden heikkouksia puunmyyjän näkökulmasta ovat sekavat hinnoitteluperusteet ja kirjavat mittauskäytännöt. Myös energiapuun korjuun seurannaisvaikutukset arveluttavat. Tavoite merkitsee myös huomattavia investointeja haketta käyttäviin lämpö- ja voimalaitoksiin

sekä korjuu- ja kuljetuskalustoon. Metsähakkeen hintakilpailukykyä on myös parannettava sekä toimitusvarmuutta ja laatua parannettava.

Polttoainehuollon tiukka kytkös teollisuuteen tuo ajoittain ongelmia puu- ja metsäenergian käyttäjille. Jos teollisuuden puunkäyttö ja hakkuut vähenevät, vähenee sivutuotepuun lisäksi päätehakkUILTA ainespuunkorjuun yhteydessä korjattavan oksamassan ja kantopuun määrä. Työvoiman ja kaluston saatavuuden näkökulmasta haastetta lisää se, että metsähakkeen käytön kulutushuiput osuvat talvikuukausille. Pakkaskausina hakkureilla ja kuljetuskalustolla on palava kiire, kun taas kesäkuukausina ongelmana on työn puute. Terminaalien yhdistäminen juna- ja aluskuljetukseen parantaa huoltovarmuutta, tasaa kausihuippuja ja vähentää työvoiman tarvetta etenkin pitkillä kuljetusmatkoilla. Kantojen korjuussa kivet ja maa-aines aiheuttavat ongelmia etenkin poltossa. Kantojen kuljetustiheys on myös huono ja esimerkiksi autokuljetuksen kuormakoosta jää hyödyntämättä 10 tonnia huonon pinotiheyden vuoksi. Harvennushakkuilla huonot korjuolosuhteet yhdistettynä hyvään tuottavuuteen ja moitteettomaan työpöjälkeen on haastava ja vaikeasti ratkaistavissa oleva ongelma.

Metsä- ja kaukokuljetuksessa materiaalin käsittelykapasiteetin tehoa voidaan parantaa vaikuttamalla kuormattavan materiaalin ominaisuuksiin sekä kourakan kokoon, sijaintiin ja muotoon. Lisäksi voidaan kasvattaa kuormaimen ulottuvuutta, nostokykyä ja liikenopeuksia sekä parantaa ohjattavuutta. Purkupaikalla tehokkaat vastaanottojärjestelmät ja lyhyet kuorman läpimenoajat parantavat kuljetustehokkuutta merkittävästi. Käyttöpaikka- tai terminaalihaketuksen perustuvilla toimitusketjuilla kuormakoon kasvattaminen parantaa kuljetustehokkuutta mutta kuorman tiivistämisen kustannukset eivät voi merkittävästi ylittää tiivistämisellä saavutettavia kustannussäästöjä.

Ajonopeus määrittää ajoneuvon kuljetuskyvyn yhdessä kuormatilan koon kanssa. Maastokoneilla nopeudet ovat tyypillisesti varsin alhaisia, vain muutamia kilometrejä tunnissa, maaston epätasaisuuden ja kantavuusrajoitteiden sekä maaston kaltevuuden vuoksi. Lisäksi ulkomitoiltaan laaja tai korkea kuormatila heikentää ajoneuvon vakautta sekä aiheuttaa ongelmia, kun ajoneuvo joutuu liikkumaan metsässä kapeilla ajourilla. Metsäenergian korjuukohteilla kantavuus on tavanomaista huonompi, koska kantavuutta parantava puubiomassa otetaan talteen, mikä myös rajoittaa kuormakoon kasvua. Kaukokuljetuksessa tieliikennelaki asettaa omat rajoituksensa ajoneuvojen kokonaismassalle, ulkomitoille ja ajonopeuksille.

Puun koko vaikuttaa ratkaisevasti hakkuutyön tuottavuuteen energiapuuharvennuksilla samoin kuin kantojen nostossa ja tuottavuuden paraneminen on suo-

## 9. Metsähakkeen hankinnan pullonkaulat ja kehittämispotentiaali

raan rinnasteinen käsittely-yksikön tilavuuden kasvuun. Työvaiheiden ja työtehtävien yhdistämisellä voidaan lisätä tuottavuutta ja alentaa kustannuksia. Hakkuutyössä puiden kouraan keräilyllä ja joukkokäsittelyllä vähennetään kouran liikkeitä ja parannetaan koneen tuottavuutta verrattuna perinteiseen yksinpuin käsittelyyn koneellisessa puunkorjuussa. Tutkimuksissa on havaittu hakkuun tuottavuuden paranevan pieniläpimittaisen puuston hakkuussa joukkokäsittelyn ansiosta jopa 20 % yksinpuin käsittelyyn verrattuna (Lilleberg 1994, Mäkelä ym. 2002, Bergkvist 2003, Gingras 2004).

Lukuisissa tutkimuksissa on havaittu koneenkuljettajalla olevan merkittävä vaikutus työn tuottavuuteen ja siten korjuukustannuksiin (Oikari 2008). Hakkuukoneenkuljettajan niin sanotulla hiljaisella tiedolla voi olla jopa 40–55 %:n vaikutus työn tuottavuuteen rungon koosta riippuen, vaikka muut tehokkuuteen vaikuttavat tekijät ovat samanlaiset (Sirén 1998, Kärhä 2001, Ovaskainen ym. 2004, Väätäinen ym. 2005b, Kariniemi 2006). Hakkuukoneenkuljettajien väliset tuottavuuserot ovat tiheissä nuorissa metsissä suurimmillaan. Pelkästään nuorten metsien puunkorjuuta ajatellen kannattaisikin parhaat kuljettajat laittaa hakkaamaan puuta nuorten metsien haastaviin olosuhteisiin (Oikari 2008). Lukuisissa tutkimuksissa ja selvityksissä on esitetty tehostamiskeinoja, joita soveltamalla pystytään parantamaan nuorten metsien puunkorjuun kustannustehokkuutta. Esitetyt tulokset on kuitenkin sovellettu käytännön korjuutoiminnassa osin sangen huonosti (Oikari 2008). Korjuun tehostamiskeinojen soveltaminen käytännön puunkorjuussa on avainasemassa, mikäli halutaan saavuttaa tavoitteeksi asetetut energiapuun korjuumäärät ja samalla turvata teollisuuden puunsaanti tulevaisuudessa. Pelkästään niin sanottu tekemällä oppiminen voi johtaa tehotomien työtapojen omaksumiseen ja siten alhaiseen tuottavuuteen (Oikari 2008).

Metsähakkeen käyttömäärien kasvaessa ja kilpailun kiristyessä korjuu joudutaan ulottamaan entistä laajemmalle maantieteelliselle alueelle. Lisäksi korjuuolosuhteiltaan ja kertymiltään aikaisempaa epäedullisemmat työmaat on otettava korjuun piiriin, jotta käyttöpaikkojen polttoaineen tarve saadaan tyydytettyä. Itä-Suomessa metsähakkeen korjuupotentiaali ylittää käyttötarpeen mutta hakkeella on pitkät kuljetusmatkat Etelä-Suomen asutuskeskusten voimalaitoksille. Uudet liiketoimintamallit, kuten moniasiakkuus, voivat yrittäjätasolla antaa aiempaa paremmat mahdollisuudet ketjuttaa työmaita, vähentää konesiirtojen määrää ja toimia tavanomaista pienemmällä toimintasäteellä.



## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen

### 10.1 Asiantuntijakysely

Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittämiseksi laadittiin taulukko, jolla arvioitiin metsähakkeen kasvutavoitteiden saavuttamista rajoittavien tekijöiden merkitystä ja käytönkasvun ongelmakohtien ratkaisu- ja kehittämismahdollisuuksia (taulukko 14). Kehitystarpeiden arviointitaulukossa oli omat sarakkeensa kannoille, harvennuspuulle sekä latvusmassalle. Riveillä oli puolestaan arviointikriteerit, joilla arvioitiin metsähakelajikohtaisesti ko. tekijän vaikututtavuutta metsähakkeen käytönkasvun rajoitteena ja ko. käytönkasvun ongelmakohtien ratkaisu- ja kehittämismahdollisuuksia. Kasvutavoitteen rajoitteen ja kehityspotentiaalın merkitys kullakin arviointikriteerillä määritettiin pisteytyksen avulla (1–5 pistettä), eli 5 = *erittäin merkittävä*, 4 = *hyvin merkittävä*, 3 = *kohtalaisen merkittävä*, 2 = *hieman merkitystä* 1= *ei lainkaan merkittävä*. Kasvua eniten rajoittava tekijä/tekijät tai suurimman kehityspotentiaalın omaava rajoite/rajoitteet, saivat korkeimmat pisteet metsähakelajikohtaisessa analyysissä.

Arviointitaulukossa oli lisäksi kaksi avointa kysymystä, joissa pyydettiin esittämään konkreettisia kehitysehdotuksia metsähakkeen hankintaan liittyen ja nimeämään merkittävin este vuoden 2020 käyttötavoitteiden saavuttamisessa.

Arviointitaulukko ja avoimet kysymykset annettiin vastattavaksi 19 suomalaiselle asiantuntijalle, jotka kaikki vastasivat kyselyyn. Asiantuntijaryhmä koostui energiateollisuuden, korjuuorganisaatioiden, metsänomistajien, koneyrittäjien sekä tutkimus- ja tuotekehitysorganisaatioiden edustajista. Kyselykaavake lähetettiin asiantuntijoille sähköpostilla tai käytiin haastattelemassa suoraan paikalla. Sähköpostin lähetekirjeessä kerrottiin, että selvityksen tavoitteena on kartoittaa ne metsähakkeen hankinnan kompastuskivet, jotka voivat estää metsä-

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen

hakkeen käyttötavoitteiden (13,5 milj. m<sup>3</sup>) toteutumisen vuoteen 2020 mennessä ja löytää keinot näiden karikoiden kiertämiseksi. Lisäksi kerrottiin, että kyselyvastauksien perusteella etsitään alueita, joissa on suurin strateginen kehittämistarve ja kehityspotentiaali. Paikanpäällä haastatelluille asiantuntijoille kyselykaavake ja lähetekirje annettiin etukäteen tutustuttavaksi hyvissä ajoin ennen haastattelua.

Arviointitaulukossa *saatavuudella* eri markkinatilanteessa tarkoitettiin metsähakkeen saatavuutta silloin, jos ainespuukauppa ja markkinahakkuut syystä tai toisesta supistuvat rajusti. *Laatu & lämpöarvo* -kriteerillä arvioitiin hakkeen kosteuden, kosteusvaihtelun ja epäpuhtauksien merkitystä metsähakkeen käytön esteenä ja kasvun rajoitteena. *Varastoitavuudella* pyrittiin arviomaan kuiva-ainetappioiden, kostumisen yms. tekijöiden merkitystä toimitusvarmuuden ja varmuusvarastoinnin vaihtoehtoiskustannuksena. Hakkeen *soveltuvuudella* eri kokoluokan käyttöpaikoille arvioitiin hakkeen loppukäyttäjän asettamien laatuvaatimusten merkitystä metsähakkeen käytön kasvun rajoitteena tai esteenä. *Korjuukustannus ja kuljetustehokkuus* -kriteereillä pyrittiin arviomaan metsähakkeen hintakilpailukykyä korvaaviin polttoaineisiin nähden ja hankinta-alueen laajenemisen ja kuljetusmatkojen pidentymisen vaikutusta metsähakkeen käyttöpaikkahintaan sekä metsäpolttoainejakeiden soveltuvuutta autokuljetuksen ohella alus- ja rautatiekuljetuksiin. *Pääomien ja työvoiman* niukkuuden merkittävyyttä metsähakkeen käytön kasvun rajoitteena arvioitiin kalustoinvestointien, varastoihin sitoutuneen pääoman ja kuljettajatarpeen näkökulmasta. Metsähakkeen *korjuun seurannaisvaikutusten* ja metsänomistajien *energiapuukauppa-myönteisyyden*, samoin kuin *metsänkäsittelyvaihtoehtojen* merkitystä arvioitiin sekä metsähakkeen markkinoille tulon, korjuuolosuhteiden ja korjuukustannusten näkökulmasta. Metsähakkeen hankinnan liittämistä muihin toimintoihin (*integrointi*), kuten metsäviljelyyn, jakelulogistiikkaan tai puunkorjuuseen arvioitiin hankinnan tehostumisen ja jouhevoitumisen näkökulmasta. *Materiaalien käsittelyn* tehokkuutta ja *kuljettajien ammattitaitoa* arvioitiin logistiikan ja korjuun näkökulmasta.

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen

Taulukko 14. Arvioi riveillä olevien tekijöiden merkitystä vuoden 2020 käyttötavoitteiden saavuttamisen esteenä ja em. ongelman ratkaisupotentiaalia pisteityksellä 1–5 metsähakelajikohtaisesti. Kasvua eniten rajoittava tekijä/tekijät saa korkeimmat pisteet, samoin kuin suurimman kehityspotentiaalin omaava ongelma/rajoite/rajoitteet, eli 5 = erittäin merkittävä, 4 = hyvin merkittävä, 3 = kohtalaisen merkittävä, 2 = hieman merkitystä 1= ei lainkaan merkittävä

	Tekijän merkittävyys metsähakkeen käytön kasvun rajoitteena:			Ongelman ratkaisun kehityspotentiaali:		
	Kannot	Harvennuspuu	Latvusmassa	Kannot	Harvennuspuu	Latvusmassa
Saatavuus eri markkinatilanteissa						
Laatu & lämpöarvo						
Varastoitavuus						
Soveltuvuus eri kokoluokan käyttöpaikoille						
Korjuukustannukset						
Kuljetustehokkuus						
Pääoman tarve						
Työvoiman tarve						
Kestävyys & seurannaisvaikutukset						
Metsäomistajien suhtautuminen energiapuukauppaan						
Lainsäädäntö & metsäkäsittely						
Integroitavuus muihin toimintoihin						
Materiaalin kuormaus & purku						
Korjuun & käsittelyn vaatima ammattitaito						

## 10.2 Asiantuntijakyselyn tulokset

### 10.2.1 Arviointitaulukon tulokset

Tutkimuksessa kerätylle aineistolle laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat metsähakelajeittain kullekin arviointikriteerille niiden käytön rajoitteen merkittävyyden ja kehityspotentiaalin mukaan. Keskihajonta kuvasi vastausten ryhmittymistä keskiarvon ympärille. Mitä pienempi keskihajonta, sitä lähempänä toisiaan

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen

vastaajien näkemykset olivat olleet ko. arviointikriteerillä. Lopulliseen tärkeysjärjestykseen kehittämistarpeet asetettiin niiden merkittävyyden ja kehityspotentiaalin yhteisvaikutuksen perusteella. Tämä laskettiin vastausten keskiarvon tulona kertomalla kasvun rajoitteen merkittävyys ongelman ratkaisun kehityspotentiaalilla.

Kannoilla (kuva 60) suurimpina kasvun rajoitteina pidettiin kantomurskeen huonoa soveltuvuutta eri kokoluokan käyttöpaikoille, metsänomistajien suhtautumista energiapuukauppaan, kantojen korjuun kestävyys ja seurannaisvaikutuksia, huonoa kuljetustehokkuutta kaukokuljetuksessa sekä kantojen saatavuutta eri markkinatilanteissa. Eniten kehityspotentiaalia nähtiin kantomurskeen laadun paranemisessa (vähemmän epäpuhtauksia) ja sitä kautta parempana soveltuvuutena eri kokoluokan käyttöpaikoille. Metsänomistajien energiapuukauppamyönteisyyden edistämässä, samoin kuin kestävyys- ja seurannaisvaikutusten huomioimisessa ja siitä tiedottamisessa, nähtiin olevan merkittävästi parantamisen varaa. Kuljetustehokkuudessa ja kantojen kuormaus- ja purkutyön tehostumisesta todettiin olevan myös merkittävästi kehityspotentiaalia.

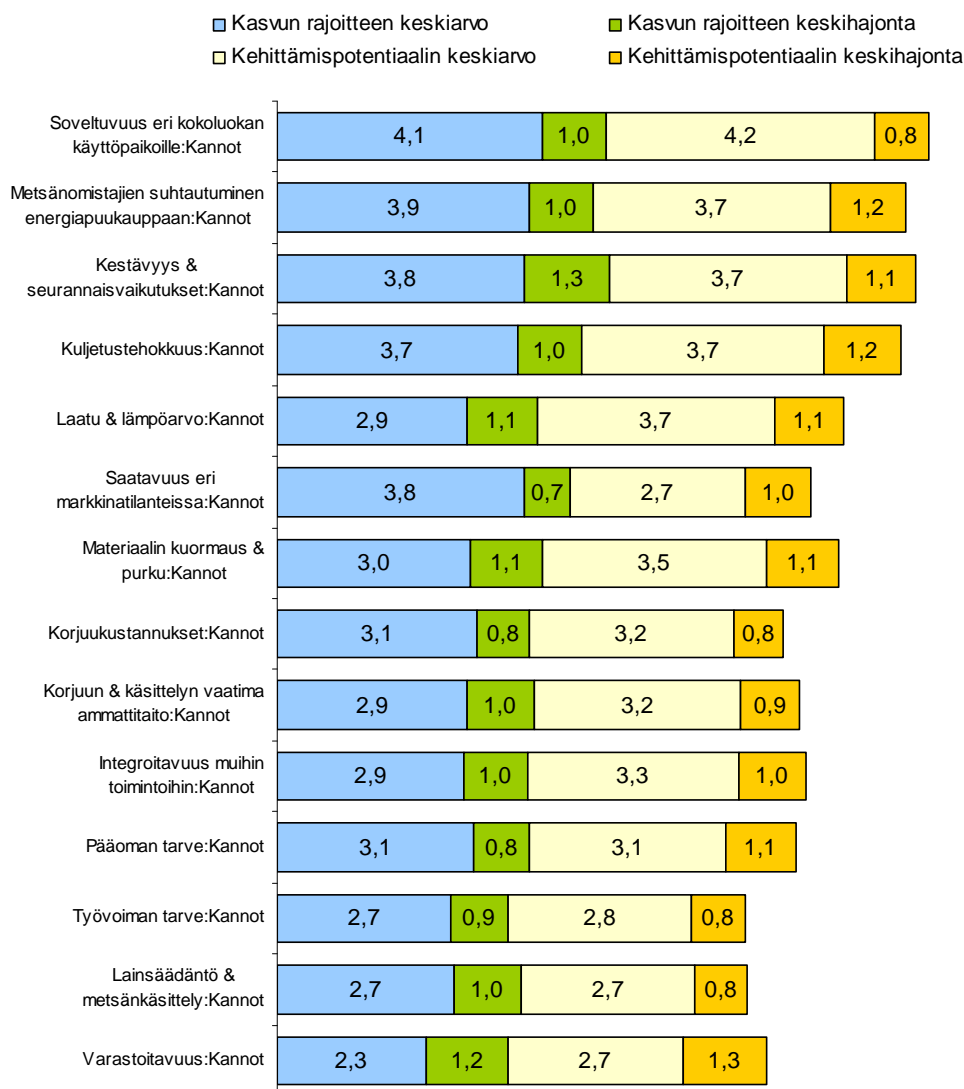
Harvennuspuulla suurimpina kasvun rajoitteina pidettiin korkeita korjuukustannuksia, korjuutyön vaativuutta, ammattitaitoisen työvoiman saatavuutta, metsänomistajien asennetta energiapuukauppaan sekä nykyisiä metsänkäsittelyohjeita. Suurin kehityspotentiaali nähtiin korjuukustannusten alentamisessa, kuljettajien ammattitaidon edistämässä, ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden turvaamisessa, metsänomistajien aktivoimisessa puukauppaan sekä korjuun integroinnissa (kuva 61).

Latvusmassalla (kuva 62) suurimpina kasvun rajoitteina pidettiin latvusmassan saatavuutta eri markkinatilanteissa, huonoa varastoitavuutta, huonoa kuljetustehokkuutta sekä heikkoa laatua ja lämpöarvoa. Metsänomistajien suhtautuminen energiapuukauppaan nähtiin myös kasvutavoitteen rajoitteena. Suurimmat kehityspotentiaalit nähtiin varastoitavuuden parantamisessa, metsänomistajien aktivoinnissa energiapuukauppaan, kuljetustehokkuuden kehittämässä sekä laadun ja lämpöarvon kohentamisessa eri kokoluokan laitosten vaatimalle tasolle (kuva 62).

Asiantuntijakyselyn mukaan metsähakkeen hankinnan tärkeimmät kehitystarpeet liittyvät harvennuspuulla korjuukustannusten alentamiseen, kuljettajien ammattitaidon edistämiseen, ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden turvaamiseen ja korjuun integrointiin. Kannoilla tärkeimmät kehitystarpeet liittyvät kantomurskeen laadun ja käytettävyyden parantamiseen ja kaukokuljetustehokkuuden lisäämiseen kuormakoon kasvun ja kuormankäsittelyn tehostumisen kautta.

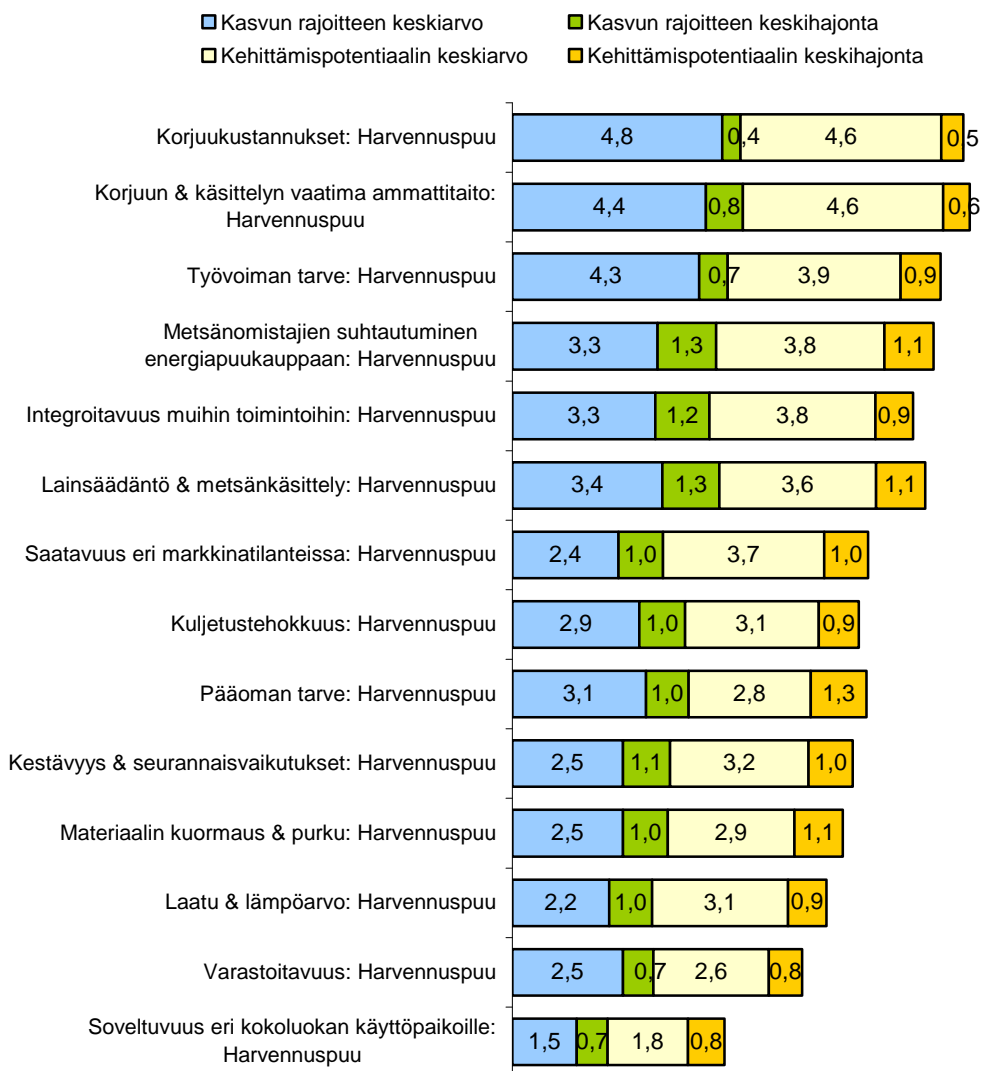
## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen

Latvusmassalla kehitystarvetta on materiaalin varastoitavuuden parantamisessa ja kuljetustehokkuuden lisäämisessä. Metsänomistajien suhtautuminen energia-puukauppaan, samoin kuin kestävyys ja seurannaisvaikutusten huomioiminen, nousi korostetusti esille kaikilla metsähakelajeilla (kuva 63).



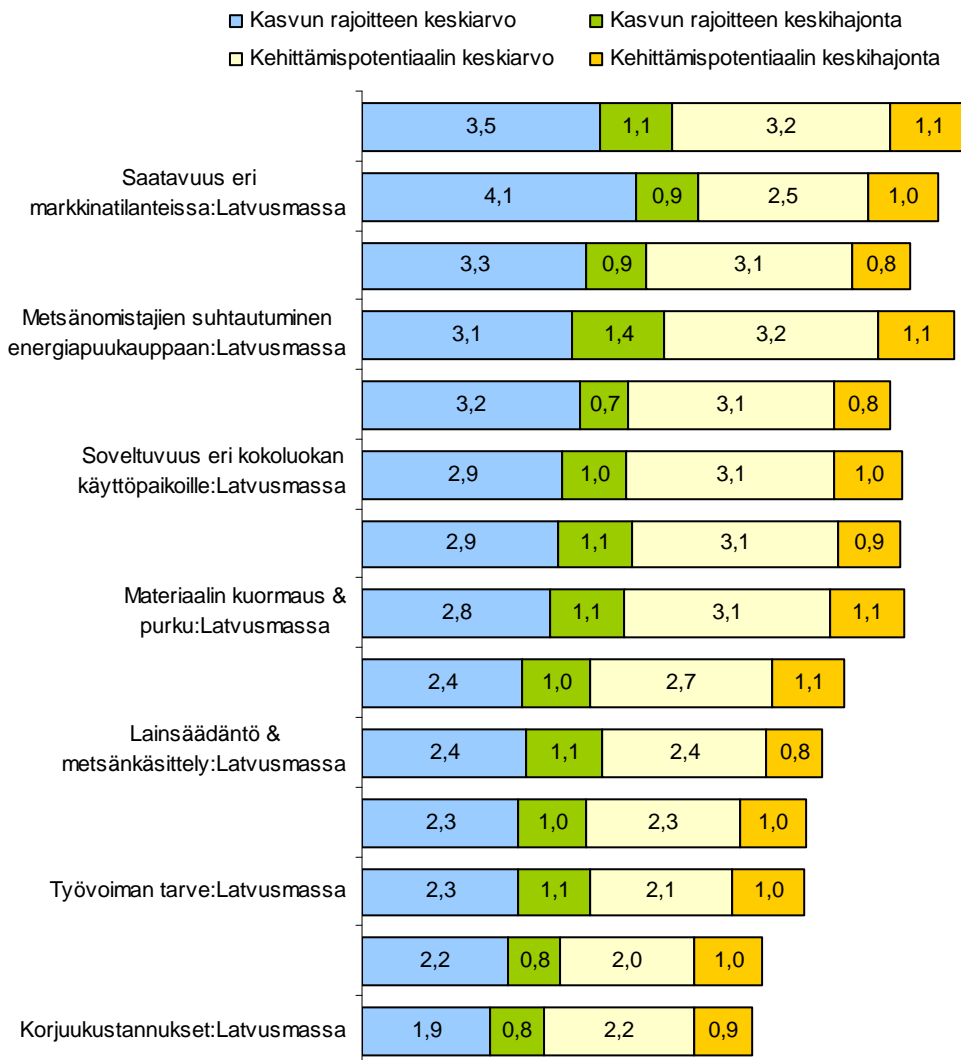
Kuva 60. Kantojen hankinnan kasvurajoitteiden ja ko. ongelmien ratkaisun kehityspotentiaalisten pisteytyksen keskiarvot ja keskihajonnat asiantuntijakyselyn perusteella kehittämistarpeen mukaisessa järjestyksessä.

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen



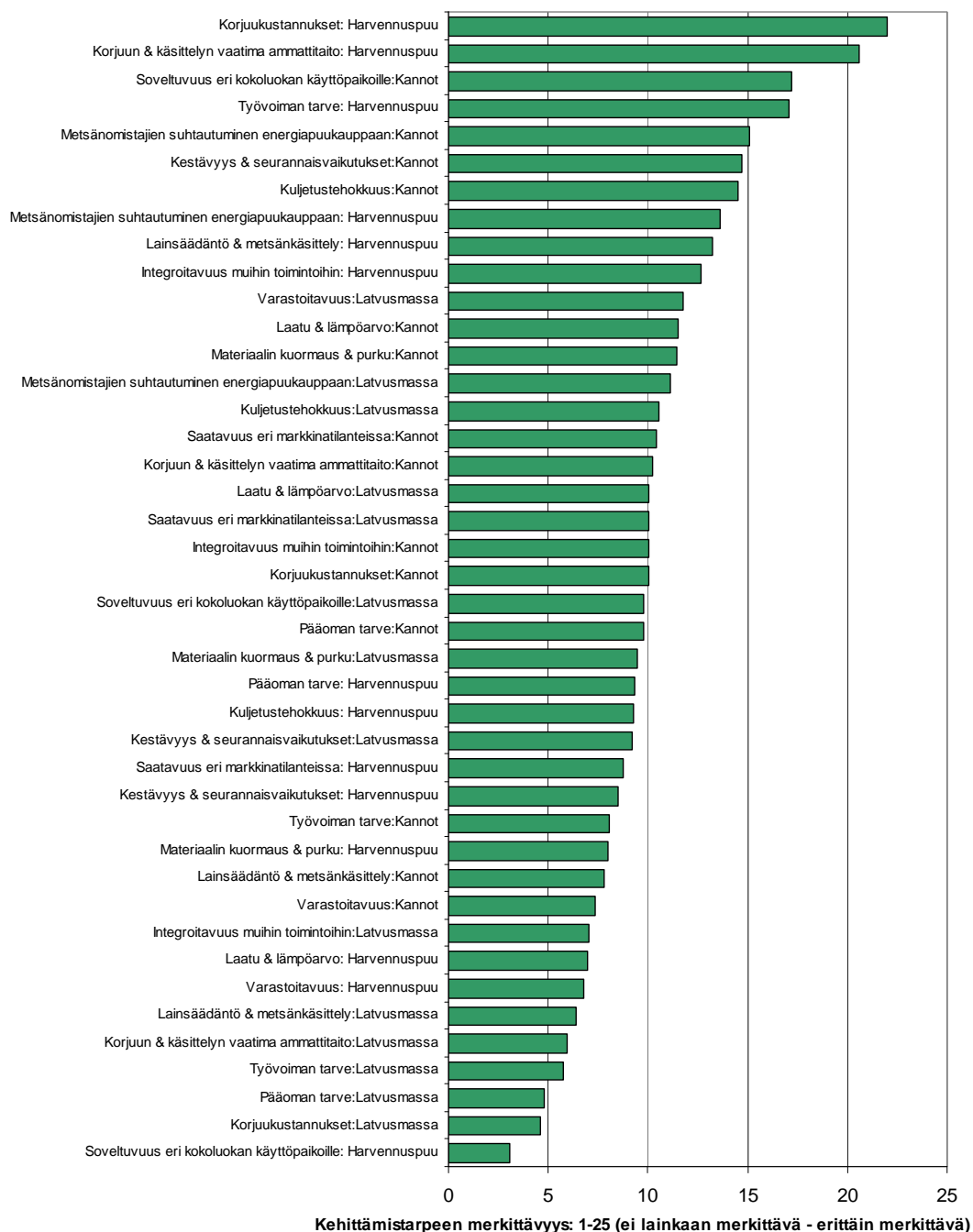
Kuva 61. Harvennuspuun hankinnan kasvurajoitteiden ja ko. ongelmien ratkaisun kehityspotentiaalien pisteytyksen keskiarvot ja keskihajonnat asiantuntijakyselyn perusteella kehittämistarpeen mukaisessa järjestyksessä.

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen



Kuva 62. Latvusmassan hankinnan kasvurajoitteiden ja ko. ongelmien ratkaisun kehityspotentiaalien pisteytyksen keskiarvot ja keskihajonnat asiantuntijakyselyn perusteella kehittämistarpeen mukaisessa järjestyksessä.

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen



Kuva 63. Metsähakkeen hankinnan kehitystarpeiden tärkeysjärjestys asiantuntijakyselyn mukaan.



### 10.2.2 Avoimet kysymykset

Asiantuntijavastauksissa ehdotettiin konkreettisena kehitysehdotuksena korvata nykyinen ainespuun korjuuseen suunniteltu puunkorjuuketju energiapuun korjuussa pelkistetyimmillä ja edullisemmilla korjuukoneilla (esim. kaivukonealustainen kalusto hakkuutyössä). Korjuun tehostamisella pyritään yksikkökustannusten alentumiseen, mikä käytännössä tarkoittaa puun korjaamista samassa aikayksikössä enemmän tai pienemmällä pääomapanoksilla. Pelkistetyillä koneilla tulisi päästä samaan tuottavuuteen pienemmillä yksikkökustannuksilla kuin ainespuun korjuuseen varustelluilla koneilla. Koneenkehittelyssä voitaisiin hakea myös keinoja, joilla esim. hakkuukoneen kuormaimen ohjausta voitaisiin kehittää ja tehdä työ sillä tavoin helpommin opittavaksi ja vähemmän kuormittavaksi. Koneenkuljettajien koulutusta, arvostusta, palkkatasoa ja sosiaalista kanssakäymistä tulisi parantaa, niin että se olisi ammattina houkutteleva myös kaupungissa kasvaneelle nuorelle. Uusien kuljettajien koulutuksessa tulisi painottaa nykyistä enemmän energiapuun korjuuta etenkin harvennushakkuissa. Metsäenergian hankinnasta on tehtävä oma itsenäinen toimiala, eikä ainespuukorjuun sivutoimialaa tai kausivaihtelua tasaavaa sesonkityötä, niin kuin se tällä hetkellä pitkälti on. Kuormaimen kouraan ehdotettiin asennettavaksi ”epäpuhtaustutka”, joka varoittaisi esim. metsätraktorin tai hakkurin kuljettajaa, että kourataakassa on kivi tms. Kehitettävällä ”kouratutkalla” pystyittäisiin merkittävästi vähentämään terien tylsymistä, keskeytyksiä ja etenkin kalliita konerikkoja.

Metsätalouden markkinoilla tulisi kehittää kilpailuolosuhteita, koska markkinat metsätaloudessa ovat liian suljetut. Uusien toimijoiden tulo puumarkkinoille on sangen vaikeaa. Kilpailuneutraliteettia on vahvistettava ja siten markkinoille tulee lisää toimijoita, joiden intressissä on saada puuta liikkeelle. Markkinoiden avautumista edesauttaisi, jos kehityspanoksia suunnattaisiin huokean mutta toimivan toiminnanohjaus- ja varastonhallintajärjestelmän luomiseksi kaikille toimijoille. Pienyrittäjien liiketoimintaosaaminen, puukauppaosaaminen sekä laadunhallinta kaipaavat vahvistamista. Energiapuun hankinta sitoo paljon pääomia ennen kuin kassavirta kääntyy positiiviseksi ja etenkin pienyrittäjille se voi muodostua jopa esteeksi toiminnalle. Siksi olisi kehitettävä rahoitustuotteita energiapuun hankinnan tueksi.

Ravinnehävikkiä vähentävät korjuumenetelmät, samoin kuin tuhkalannoituksen menetelmät ja logistiikka, nousivat esille konkreettisina kehitysehdotuksina, samoin kuin kantojen puhdistus esimurskaukseen yhdistettynä joko palstalla, tienvarsivarastolla tai terminaalissa. Intensiivikasvatus plantaasimetsätalouden

## 10. Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittäminen

tapaan lyhyellä kiertojalla joko aines- ja energiapuuksi tai pelkästään energia- puuksi mainittiin korjuuta tehostavana puuntuotantomuotona suunnitelmallisen energiapuuharvennuksen ohella. Nykyisiä tukijärjestelmiä tulisi kehittää niin, että tuet eivät ohjaa laiminlyönteihin taimikon hoidossa eivätkä vääristä puu- markkinoita. Tiedotusta tulisi lisätä ja kertoa asioista myös silloin kun ne eivät ole pelkästään metsäenergian hankintaa tukevia. Metsäenergian tuotannon ja hankinnan laadun auditointiin olisi luotava kriteerit ja toimintamallit. Pitkän kuljetusmatkan kuljetusmuotoja, samoin kuin yhdistettyjä kuljetusmuotoja, on kehitettävä ja kuljetustaloutta parannettava. Metsähakkeen varastoitavuutta on parannettava, laadun mittauksen menetelmiä kehitettävä ja puutteellista toiminta- varmuutta on parannettava. Terminaaliverkoston kattavuutta on laajennettava ja terminaalien liiketoimintamalleja ja toimintatapoja kehitettävä.

Merkittävimmiä vuodelle 2020 käyttötavoitteita saavuttamisen esteiksi mainittiin ammattitaitoisen työvoiman saatavuus, investointihalukkuuden puute korjuu- ja kuljetuskalustoon ja lämpö- ja voimalaitoksiin sekä metsänomistajien puunmyyntihalukkuuden ylläpitäminen omistajakunnan arvojen ja metsäomaisuuden merkityksen muuttuessa tulevaisuudessa. Polttoainehuollon tiukka yhteys metsäteollisuuden sivutuotevirtoihin, samoin kuin metsäteollisuuden ikäikäinen etuoitto-oikeus puuraaka-ainevaroihin koettiin myös esteenä tavoitteiden saavuttamisessa. Markkinoiden tulisi määrätä se, missä puuta käytetään, ei puun perinteinen käyttötapa tai kohde.

Energiamarkkinoiden avaamisen myötä energiasektorin toimijat ovat alkaneet arvottaa toimiaan entistä enemmän markkinatalouden ja periaatteiden mukaisesti. Tämä johtaa siihen, että polttoaineita ja energialähteitä käytetään ja investointeja tehdään liiketaloudellisin perustein, ei pelkästään huoltovarmuusnäkökohtien mukaisesti. Toisaalta politiikan poukkoilevuus ei luo sellaista vakaata investointiympäristöä, jonka investoinnit korjuu- ja kuljetuskalustoon samoin kuin haketta käyttäviin laitoksiin vaativat. Tukipolitiikan tulisi olla läpinäkyvää ja pitkäjänteistä. Metsähake kokonaisuudessaan ei ole riittävän hintakilpailukykyinen kilpaileviin fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna eikä takaa kannattavaa ja kestävästä liiketoimintaa metsäenergiaketjun eri toimijoille. Suuret volyymit lähtevät varmasti liikkeelle vain laadukkaalla työllä ja raaka-aineesta maksettavalla hinnalla. Nuorten metsien energiapuupotentiaali on merkittävä, mutta nykyisellä leimikkorakenteella tuon puumäärän korjaaminen vaatii paljon työvoimaa, korjuukalustoa ja tukieuroja, kun harvesteria käytetään raivaussahana.

### 10.3 Yhteenveto asiantuntijakyselyn tuloksista

Asiantuntijakyselyssä nousivat korostetusti esille tarpeet alentaa harvennuspuun korjuukustannuksia ja taata ammattitaitoisen työvoiman saatavuus. Korjuukustannuksia voitaisiin alentaa kehittämällä aiempaa pelkistetympiä ja siten tuntikustannuksiltaan edullisempia peruskoneita. Konekehittelyssä tulisi myös harkita sitä, voitaisiinko koneista tehdä helpommin halittavia, mikä saattaisi tasata kuljettajien välisiä eroja etenkin harvennusolosuhteissa ja kuljettaja voisi keskittyä aiempaa enemmän puiden valintaan koneen/kuormaimen ohjailun sijasta. Työtapoja kehittämällä ja kuljettajia kouluttamalla parhaat työmenetelmät saataisiin jalkautettua käytännön korjuutoimintaan. Leimikko-olosuhteiden parantamiseen tulisi kiinnittää huomiota, koska helpoin keino lisätä korjuutyön tuottavuutta on kasvattaa käsittely-yksikön kokoa. Integroitu korjuu nähtiin myös merkittävänä keinona lisätä harvennuspuukertymän volyymia sekä leimikon että valtakunnan tasolla.

Harvennuspuun, latvusmassan ja kantojen joukossa olevat kivet ja kivennäismaa aiheuttavat ongelmia etenkin kannoilla sekä haketuksessa/murskauksessa että poltossa. Epäpuhtauksista tulisi päästä eroon joko ennen materiaalin kuormausta välivarastokasaa tai viimeistään silloin kun materiaalia syötetään joko hakkuriin tai murskaimeen. Kantojen puhdistusmenetelmiä tulisi kehittää myös murskaustyön yhteydessä täristämällä ja seulomalla kivennäismaata irti kantopaloista. Puhdistava kantomurskain/esimurskain, joka pystyisi operoimaan myös tienvarsivarastolla, ratkaisisi huonoon kaukokuljetustehokkuuteen ja epäpuhtauksiin liittyviä ongelmia kantohakkeen tuotannossa.

Latvusmassalla suurimmat ongelmat liittyivät latvusmassan huonoon varastoitavuuteen joka johtuu neulasten suuresta osuudesta kokonaisbiomassasta. Metsänomistajien aktivoiminen energiapuukauppaan, samoin kuin energiapuun talteenoton seurannaisvaikutukset ja korjuujälki, nousivat esille kannoilla, harvennuspuulla ja latvusmassalla. Toimitusketjujen kehitystyössä painopiste pitäisi siirtää kokonaan uusien menetelmien kehittämisestä nykyisten korjuumenetelmien yksityiskohtien hiomiseen. Metsähakkeen toimitusvarmuutta pitäisi parantaa etenkin, kun haketta kuljetetaan suurille käyttöpaikoille pitkien kaukokuljetusmatkojen takaa eri kuljetusmuotoja yhdistämällä.

## 11. Kehitystyön toteutus ja organisointi

Suomessa metsähakkeen tuotantoa ja käyttöä on kehitetty yhtäjaksoisesti vuodesta 1993 lähtien. Tällöin käynnistyi viisivuotinen Bioenergia-ohjelma. Bioenergiaohjelma sisälsi metsähakkeen ohella myös muiden biomassojen korjuun ja polttotekniikan kehittämistä ja tutkimusta. Bioenergiaohjelmassa keskityttiin ensisijaisesti latvusmassan ja pienpuun korjuutekniikkaan ja ympäristövaikutusten seurantaan. Metsähakkeen korjuutekniikan kehittäminen jatkui vuonna 1998 käynnistyneessä ja viisi vuotta kestäneessä Puuenergia-ohjelmassa. Latvusmassan ja pienpuun korjuun ja toimituslogistiikan kehittämisen rinnalla käynnistettiin kantojen korjuuteknologian kehitystyö. Metsähakkeen tuotantoon liittyvää kehitystyötä jatkettiin 2004 käynnistyneessä Climbus-ohjelmassa. Tässä ohjelmassa pääpaino oli metsähakkeen korjuuteknologian viennissä ulkomaille.

Kehitystyön tuloksena metsähakkeesta on saatu kehitettyä merkittävä ja kilpailukykyinen polttoaine energian tuotannossa. Metsähakkeen korjuulle ja toimituksille luo uusia haasteita metsähakkeen nykykäytön yli kaksinkertaistaminen 13,5 milj. m<sup>3</sup>:iin vuoteen 2020 mennessä.

Tämä selvityksen mukaan tärkeimpiä kehittämiskohteita metsähakkeen korjuun osalta 2010-luvulla ovat:

1. Harvennuspuuhakkeen tuotantoketjun tehostaminen ja korjuukustannusten alentaminen
  - Tavoitteena on alentaa harvennuspuuhakkeen korjuukustannuksia käyttöpaikalla 25 %:lla eli 4 €/MWh
  - Tehostamistoimien tulee kohdistua etenkin hakkuuseen ja metsäkuljetukseen
  - Pehmeiden maiden puunkorjuun asettamiin vaatimuksiin ja juuristovaurioiden ehkäisyyn tulee kiinnittää erityistä huomiota, koska merkittävä osa harvennuspuupotentiaalista on ojitetuissa metsissä ja siksi että metsänuudistamisen pääpuulaji on ollut 1990-luvulta lähtien kuusi

- Kehittää integroitua puunkorjuuta ja edistää korjuukoneiden ympärivuotista työllistymistä
  - Kehittää korjuumenetelmiä ja hakkuutapoja, jotka parantavat hakettamattoman harvennusuun kaukokuljetuksen tehokkuutta esim. auto- ja junakuljetuksissa
  - Aiempaa pelkistetyimmät ja edullisemmat peruskoneet, joilla tulisi päästä samaan tuottavuuteen pienemmillä yksikkökustannuksilla, kuin nykyisellä korjuukalustolla energiapuun korjuussa
  - Laadukas työjälki ja energiapuun talteenoton negatiivisten seurannaisvaikutusten ehkäisy sekä korjuukalustoa että työmenetelmiä kehittämällä
  - Turvata ammattitaitoisen työvoiman saatavuus ja koulutus
  - Kehittää koneita, jotka ovat helpommin ohjattavia ja tehdä työ siten helpommin opittavaksi ja vähemmän kuljettajaa kuormittavaksi.
2. Metsähakkeen toimitusvarmuuden ja kuljetusketjujen tehokkuuden parantaminen pitkillä kaukokuljetusmatkoilla
- Tavoitteena on lisätä metsähakkeen toimitusvarmuutta suurille käyttäjille kuten biojalostamoille sekä teollisuuden ja yhdyskuntien suurille CHP-laitoksille
  - Kehitetään logistisia toimintamalleja, joilla metsähakkeen käytön kulu- tushuippujen aiheuttamat ongelmat voidaan ratkaista
  - Polttoaineen kulutuksen ja CO<sub>2</sub>-päästöjen pienentäminen kuljetuksessa
  - Kone- ja kuljetuskalustoresurssien tehokas ja ympärivuotinen käyttö
  - Tavoitteeseen pyritään kehittämällä eri kuljetusmuotojen yhdistelmiä metsähakkeen toimitukseen, kuten; autokuljetus-terminaali-junakuljetus tai autokuljetus-aluskuljetus-käyttöpaikkahaketus.
3. Kantohakkeen laadun parantaminen sekä metsä- ja maantiekuljetusten tehostaminen
- Kantohakkeen laadun parantaminen epäpuhtauksien osalta hakkuutähdehakkeen laatutasolle
  - Alentaa kantojen kaukokuljetuskustannuksia nykytasoon verrattuna 30 % eli 2 €/MWh
  - Tehostaa metsä- ja kaukokuljetuksessa kantojen kuormaus- ja purkutyötä ja kasvattaa kaukokuljetuksen kuormakokoa
  - Epäpuhtauksien poisto kantopaloista joko palstalla tai murskaustyön yhteydessä tienvarsivarastolla, terminaalissa tai käyttöpaikalla

## 11. Kehitystyön toteutus ja organisointi

- Kehittää murskain, jolla voidaan murskata kantoja sekä tienvarsivarastolla että terminaalissa, ja tuottaa epäpuhtauksista vapaata kantohaketta.

### 4. Kuljettajien koulutus

- Kehittää tehokkaita työtapoja ja -menetelmiä energiapuun korjuuseen ja soveltaa niitä käytännön korjuutoiminnassa
- Varmistaa koulutuksen avulla, että parhaat työtavat siirtyvät käytäntöön ja huonoista työtavoista päästään eroon
- Uusien kuljettajien koulutuksessa tulisi painottaa nykyistä enemmän energiapuun korjuuta ja joukkokäsittelyhakkuuta
- Pelkkä tekemällä oppiminen voi johtaa tehottomien työtapojen omaksumiseen ja siten matalaan työn tuottavuuteen
- Kokoneiden kuljettajien hiljaisen tiedon hyödyntäminen
- Laadunhallinnan merkityksen korostaminen.

### 5. Metsänomistajien aktivointi ja koulutus energiapuukauppaan

- Selkeyttää metsähakkeen hinnoitteluperusteita ja mittauskäytäntöjä
- Lisätä tiedotusta metsähakkeen korjuun eduista ja haitoista kokonaisvaltaisesti
- Metsänomistajia on aktivoitava, koska energiapuukauppojen määrä kasvaa samaa tahtia kuin metsähakkeen hankintamäärät lisääntyvät.

### 6. Metsähakkeen hankinnan liiketoiminnan kehittäminen

- Tavoitteena on kehittää metsähakkeen hankinnasta oma itsenäinen toimiala
- Pienyrittäjien liiketoiminta- ja puukauppaosaamisen sekä metsähakkeen laadunhallinnan kehittäminen
- Metsähakkeen tuotannon ja hankinnan laadun auditoinnin kriteerien ja toimintamallien luominen
- Metsähakkeen hankinnan toiminnanohjaus- ja varastonhallintajärjestelmien kehittäminen.

### 7. Metsähakkeen korjuun seurannaisvaikutusten ennaltaehkäisy korjuutoimintaa kehittämällä

- Kehittää tuhkalannoituksen menetelmiä ja logistiikkaa
- Kehittää korjuumenetelmiä ja -tapoja, jotka lisäävät palstalle varisevan neulasmassan ja hienoaineksen määrää latvusmassan ja harvennuspuun korjuussa
- Pienentää metsäkuljetuksessa syntyvien maaperä ja juuristovaurioiden määrää etenkin harvennusmetsien puunkorjuussa
- Kehittää varastointitapoja ja logistisia ratkaisuja, joiden avulla voidaan ehkäistä mahdollisten hyönteistuhojen synty energiapuuvarastoa ympäröiviin metsiin tai taimikoihin
- Maanmuokkaustyön laatu ja metsänuudistamisen menetelmät kantojen korjuualoilla
- Parantaa korjuuolosuhteita harvennusmetsien energiapuun korjuussa
- Kehittää kantokäsittelytekniikkaa energiapuuharvennuksille.

### 8. Tehostaa puubiomassan kasvatusta aines- ja energiapuuksi

- Kehittää aines- ja energiapuun kasvatusta lyhennetyllä kiertoajalla esim. turvemaiden hieskoivikoissa tai muissa lehtipuuvaltaisissa metsiköissä
- Kehittää energiapuun intensiivikasvatusta ja metsitysmenetelmiä turvetuotannosta vapautuvilla suopohjilla. Etsiä tehokkaimmat metsitystavat, tuottoisimmat puulajit sekä optimoida korjuukierron pituus
- Lisätä metsien lannoitusta varttuneissa talousmetsissä
- Suunnitelmallinen energiapuuharvennus osana kasvatusketjua.

Kehittämistyön käytännön toteutukseen liittyy tutkimus- ja kehitystyötä sekä uusien menetelmien ja tekniikoiden demonstrointia. Tutkimus- ja kehitystyö toteutetaan kone- ja laitevalmistajien, järjestelmätoimittajien, metsähakkeen käyttäjien, korjuuorganisaatioiden, kone- ja kuljetusyrittäjien sekä eri tutkimuslaitosten, ammattikorkeakoulujen ja yliopistojen yhteistyönä. Uusien tekniikoiden ja menetelmien käytännön demonstrointi tapahtuu koko metsähakkeen tuotanto- ja toimitusketjun yhteistyönä. Toimijoita ovat mm. metsänomistajat, metsäorganisaatiot, metsäenergian käyttäjät, korjuuorganisaatiot, kone- ja laitevalmistajat, kone- ja kuljetusyrittäjät, järjestelmätoimittajat, ohjausjärjestelmien kehittäjät, eri oppilaitokset sekä tutkimuslaitokset, ammattikorkeakoulut ja yliopistot.

## 12. Yhteenveto

### Työn sisältö ja tavoite

Tämän työn tavoitteena oli luoda katsaus metsähakkeen käyttö- ja korjuumahdollisuuksiin vuonna 2020 ja selvittää metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan kehittämistarpeet, jotta 13,5 milj. m<sup>3</sup> käyttö- ja korjuutavoite voidaan saavuttaa. Tämän ohella tarkasteltiin metsähakkeen korjuumenetelmiä, metsähakkeen hankinnan kustannusrakennetta, viljelyn energiapuun korjuuteknologiaa ja taloutta sekä pellettien ja biohiilen tuotantoteknologiaa ja -kustannuksia.

Metsähakkeen hankinnan ja toimitusten kehittämistarpeet ja mahdollisuudet selvitettiin asiantuntijakyselyllä, jolla kartoitettiin T&K-tarpeiden ohella metsähakkeen vuoden 2020 käyttö tavoitteiden saavuttamista rajoittavien tekijöiden merkitystä ja käytön kasvun ongelmakohtien ratkaisumahdollisuuksia.

### Metsähakkeen nykykäyttö

Vuonna 2009 lämpö- ja voimalaitoksissa käytettiin metsähaketta 5,4 miljoonaa kiintokuutiometriä ja pientalokiinteistöissä arviolta 0,7 miljoonaa kiintokuutiometriä (Ylitalo 2010). Edelliseen vuoteen verrattuna metsähakkeen käyttö kasvoi kolmanneksella. Kasvua vauhdittivat alkuvuoden polttoturvepula ja metsäteollisuuden tuotannon supistumisen aiheuttama niukkuus puunjalostusteollisuuden sivutuotteista, kuten kuoresta ja purusta. Energiantuotannossa hyödynnetty metsähake koostui latvusmassahakkeesta (1,9 milj. m<sup>3</sup>), kokopuusta (1,4 milj. m<sup>3</sup>), kannoista (0,8 milj. m<sup>3</sup>) ja rangoista (0,16 milj. m<sup>3</sup>). Lisäksi lämpö- ja voimalaitokset käyttivät järeää runkopuuta 1,1 milj. m<sup>3</sup>. Pääosa energiantuotannossa käytetystä runkopuusta oli tuontipuuta ja järeän puun käyttö kasvoi edellisvuodesta peräti kuusinkertaiseksi, kun Venäjältä virtasi ylivuotista, varastopiinoissa pilaantunutta ainespuuta. Pientalokiinteistöissä käytetty hake oli enim-



mäkseen runkopuuhaketta, joka oli tehty esim. pieniläpimittaisesta harvennuspöytä tai hukkarunkopöytästä.

### **Metsähakkeen käyttötavoite vuodelle 2020**

Suomen kansallisen uusiutuvan energian toimintasuunnitelman mukaan metsähakkeen nykykäyttö (11,2 TWh) lämpö- ja voimalaitoksissa on yli kaksinkertaistettava noin 13,5 milj. m<sup>3</sup> (25 TWh) vuoteen 2020 mennessä. Vuoden 2020 liikenteen biopolttoaineiden käyttötavoite on 7 TWh.

Metsähakkeen käytön tavoite 25 TWh voidaan saavuttaa, mutta se edellyttää, että metsähake otetaan huomioon kaikissa uusissa suurissa voimalahankkeissa yhtenä polttoainevaihtoehtoista. Tässä tarkastelussa metsähakkeen käyttömääräksi arvioitiin 25,4 TWh vuonna 2020.

Suomessa on kolme yrityskonsortiota, jotka suunnittelevat liikenteen biopolttoaineiden valmistusta metsähakkeesta. Nämä ovat UPM, Vapo Oy, Metsäliitto, Stora Enso ja Neste Oil. Kolmen suunnitteilla olevan biopolttoainelaitoksen kapasiteetti on noin 7 TWh ja raaka-ainetta, esim metsähaketta, liikenteen biopolttoaineen tuottamiseen tarvitaan 12 TWh.

### **Metsähakkeen korjuupotentiaali vuonna 2020**

Metsäntutkimuslaitoksen uusimman MELA-laskelman mukaan metsähakkeen korjuumahdollisuudet vuonna 2020 ovat 40,4 TWh eli 20,2 milj. m<sup>3</sup>, kun ainespuun korjuumäärä ja hakkuupoistuman rakenne ovat samat, kuin vuosien 2004–2008 hakkuissa keskimäärin. Toteutuneiden hakkuiden mukaisessa skenaariossa nuorten metsien harvennuksilta korjattavissa olevan energiapuun määrä on 10,7 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Päätehakkuilta on puolestaan korjattavissa latvusmassaa 4,8 milj. m<sup>3</sup> vuodessa ja kantoja 4,7 milj. m<sup>3</sup> vuodessa. Skenaariotarkastelun tuloksia tarkastellessa pitää muistaa, että käytännössä puunostajat ja metsänomistajat ratkaisevat puumarkkinoilla, miten metsiä vuonna 2020 hakataan ja hoidetaan. Tuloksia ei siis pidä tulkita todennäköisesti toteutuvan tulevaisuuden ennusteina tai toteutettavaksi tarkoitettuina suunnitteina (Salminen 2010).

Metsien hyvän kasvun ansiosta metsähakkeelle asetettu 13,5 milj.m<sup>3</sup> käyttötavoite on mahdollista saavuttaa. Toteutuneiden hakkuiden mukaisessa skenaariossa ainespuuhakkuiden taso oli hakkuupotentiaaliin nähden niin alhaisella tasolla, että harvennuspöytä riitti metsäteollisuuden tarpeiden lisäksi myös energiantuotantoon. Toinen vaihtoehto nykyisillä hakkuumäärillä ja hakkuupoistuman rakenteella on, että 2020-luvulla luonnonpoistuma hoitaa osan harvennuk-

## 12. Yhteenveto

sista ja puut kuolevat käytön ja harvennuksen puutteessa pystyyn etenkin niillä alueilla, jotka sijaitsevat kaukana puun kuljetusreiteistä tai käyttöpaikoista.

### **Metsähakkeen tuotantoketjut nyt ja tulevaisuudessa**

Vuonna 2009 latvusmassahakkeen tuotannosta yli 60 % perustui välivarastolla haketukseen ja terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli vajaa 10 %. Vajaa kolmannes energiantuotantoon käytetystä latvusmassasta haketettiin käyttöpaikalla (Kärhä 2010). Kantohakkeen tuotannosta lähes 70 % perustui käyttöpaikalla murskaukseen ja vajaa kolmannes kannoista murskattiin terminaaleissa. Pieniä määriä kantoja murskattiin myös tienvarsivarastoilla. Harvennuspuiden hakkeen tuotannossa välivarastohaketuksen osuus oli lähes 80 % kokonaismäärästä. Terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli 16 % ja käyttöpaikalla haketettiin 5 % (Kärhä 2010).

Metsätehon tutkimuksen mukaan (Kärhä 2007a) käyttöpaikalla tai terminaaleissa tuotetun metsähakkeen suhteellinen osuus tulee kasvamaan ja välivarastohaketusmenetelmän valta-asema pienenemään. Muutokset tuotantomenetelmien suhteellisissa osuuksissa eivät kuitenkaan ole kovin suuria. Samassa tutkimuksessa metsähakkeen tuottajat lisäksi arvioivat, että vuonna 2015 nuorista metsistä korjatun energiapuun osuus on 27 %, kanto- ja juuripuiden hakkeen 24 % ja latvusmassahakkeen 43 % energialaitosten käyttämästä metsähakkeesta. Metsähakkeen kokonaiskäytön vuonna 2015 tuottajat arvioivat olevan runsaat 14 TWh (Kärhä 2007a) eli noin 7 miljoonaa kiintokuutiometriä vuodessa.

### **Metsähakkeen korjuukustannukset ja kustannusrakenne**

Latvusmassa-, kokopuu-, ja kantohakkeen kustannusrakenne selvitettiin esimerkkileimikoiden avulla, joissa metsäkuljetusmatka oli 250 m ja kaukokuljetusmatka 45 tai 90 km. Hakkeen kuljetusmatka terminaalista lämpö- tai voimalaitokselle oli 10 km. Nuorten metsien energiapuun hakkuussa hakkuupoistuma oli 2000 runkoa hehtaarilta ja poistettavien puiden keskikoko oli 30 litraa. Kantojen korjuussa kuusenkantojen keskikäpimitta oli 37 cm (= 170 litraa) ja nostettavia kantoja oli 500 kappaletta hehtaarilla. Latvusmassan ja nuorten metsien energiapuun kertymä hehtaarilta oli 60 m<sup>3</sup> ja kantopuulla hehtaarikertymä oli 85 m<sup>3</sup>.

Nuorten metsien energiapuun korjuukustannus tienvarressa, organisointikulut mukaan lukien, oli 23,1 €/m<sup>3</sup>. Hakkuun kustannus oli 13,5 €/m<sup>3</sup> ja pienpuun metsäkuljetuksen 6,1 €/m<sup>3</sup>. Risutukkimenetelmällä korjatun latvusmassan korjuukustannus tienvarressa oli 14,1 €/m<sup>3</sup> ja paalaamattoman latvusmassan 10,1 €/m<sup>3</sup>.

Latvusmassan kasoihin hakkuun kustannus oli 0,3 €/m<sup>3</sup> ja paalaamattoman latvusmassan metsäkuljetuksen kustannus 6,2 €/m<sup>3</sup>. Paalauksen kustannus oli 6,9 €/m<sup>3</sup> ja paalien metsäkuljetuksen kustannus 3,5 €/m<sup>3</sup>. Kantojen korjuun kustannus tienvarressa oli 18,4 €/m<sup>3</sup>. Kustannuksista kantojen noston ja paloittelun osuus oli 5,4 €/m<sup>3</sup> ja metsäkuljetuksen osuus 9,4 €/m<sup>3</sup>. Organisoitinkustannusten oletettiin olevan samat (3,51 €/m<sup>3</sup>) kaikilla korjuumenetelmillä ja metsähakelajeilla. Hakkeen käsittely ja kuljetuskustannus terminaalista käyttöpaikalle olivat myös samat kaikilla metsähakelajeilla. Hakkeen kuormauskustannus terminaalissa oli 0,9 €/m<sup>3</sup> ja kuljetuskustannus terminaalista käyttöpaikalle oli 3,1 €/m<sup>3</sup> (10 km:n kuljetusmatka).

Latvusmassahakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla oli eri korjuumenetelmillä 20,7–21,4 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 45 km ja 23,4–24,1 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 90 km. Kantohakkeella korjuukustannus käyttöpaikalla oli 29,0–37,5 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 45 km ja 32,4–40,8 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 90 km. Kokopuuhakkeen korjuukustannus oli menetelmästä riippuen 32,6–37,7 €/m<sup>3</sup>, kun kaukokuljetusmatka oli 45 km. Kun kaukokuljetusmatka oli 90 km, niin kokopuuhakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla oli 34,8–41,1 €/m<sup>3</sup>.

Latvusmassan käyttöpaikkahaketus oli edullisin korjuuketju 60 kilometrin kaukokuljetusmatkaan saakka, kun korjuuketjuja verrattiin kaukokuljetusmatkan mukaan. Sitä pidemmillä autokuljetusmatkoilla risutukkimenetelmä oli kustannustehokkain korjuuketju latvusmassahakkeen tuotannossa. Vastaavassa vertailussa latvusmassan käyttöpaikkahaketusetjun ja tienvarsihaketusketjun kustannuskäyrät leikkasivat 70–80 km kaukokuljetusmatkan kohdalla. Välivarastohaketusetjun ja risutukkimenetelmällä tuotetun latvusmassahakkeen tuotantokustannukset olivat likimain samalla tasolla. Vertailun perusteella välivarastolla haketetun latvusmassahakkeen korjuukustannus oli käyttöpaikalla 0,10–0,30 €/m<sup>3</sup> korkeampi kuin risutukkimenetelmällä tuotetun hakkeen. Kokopuun käyttöpaikkahaketus oli edullisin kokopuuhakkeen tuotantomenetelmä alle 30 km kaukokuljetusmatkoilla ja välivarastolla haketus sitä pidemmillä kuljetusmatkoilla. Kantohakkeen korjuukustannukset olivat kokopuuhakkeen korjuukustannuksia pienemmät aina 200 km kaukokuljetusmatkaan saakka, kun kannot murskattiin käyttöpaikalla. Terminaalihaketukseen perustuvalla korjuumenetelmällä hakkeen tuotantokustannukset olivat vertailun korkeimmat.

## **Työvoiman sekä korjuu- ja kuljetuskaluston tarve vuonna 2020**

Metsäteho ja Pöyry (Kärhä ym. 2009c) tekivät resurssitarvelaskelman, kuinka paljon kalustoa ja työvoimaa laajamittakaavainen tuotanto vaatisi, jos metsähakkeen tuotanto ja käyttö olisi 25–30 terawattituntia (TWh) Suomessa vuonna 2020. Resurssitarvelaskelmassa oletettiin, että vuonna 2020 käytetystä metsähakkeesta 43 % tuotettiin latvusmassasta, 29 % kannoista ja 28 % nuorista metsistä korjatusta pienpuusta. Latvusmassa- ja pienpuuhakkeen tuotannossa tienvarsihaketus oli päätuotantomuoto ja kannoilla käyttöpaikkamurskaus. Koneiden ja autojen hankintahintoina käytettiin alkuvuoden 2009 hintoja.

Selvityksessä oletettiin, että kaikki metsähakeraaka-aine ja valmis metsähake kuljetetaan autolla. Vuonna 2020 rautatie- ja vesitiekuljetuksen osuus lienee nykyistä suurempi, mikä vähentää laskelmassa määritettyä resurssitarvetta. Metsätehon ja Pöyryn (Kärhä ym. 2009c) resurssitarvelaskelman mukaan metsähakkeen laskennallinen tuotantokalustotarve olisi 1900–2200 konetta ja autoa, eli 3,3–4,0 kertainen määrä nykyiseen verrattuna. Em. kaluston kokonaishankintakustannukset olisivat 530–630 miljoonaa euroa (alv. 0 %). Koneen ja autonkuljettajien työvoimatarve oli 3 400–4 000 henkilöä, eli 3,4–4,1 kertainen määrä verrattuna nykyiseen laskennalliseen kuljettajamäärään metsähakkeen tuotannossa. Välitön ja välillinen työvoimantarve huomioiden tarvittava henkilömäärä olisi 4200–5100 henkilötyövuotta vuonna 2020 (Kärhä ym. 2009c).

## **Energiapuun lyhytkiertoviljely**

Lyhytkiertoviljely on kokeiluasteella Suomessa. Koeviljelmillä viljellään pajun eri klooneja. Pohjois-Karjalassa sijaitsevilla koeviljelmillä tuottoisimmaksi paju-klooniksi on osoittautunut *Salix schwerinii* -lajin klooni. Kaupallisessa mielessä tällä hetkellä viljelyssä olevia pajuviljelmiä voidaan pitää koeviljelminä. Kustannuksiltaan pajun viljely energiataroituksiin on niukasti kannattavaa. Kuitenkin kehitystyöllä ja yhdistämällä pajun kasvatusta jätevesien käsittelyyn, on kannattavuutta mahdollista parantaa.

Kiinnostus muiden lyhytkiertopuulajien (koivu, leppä ja haapa) kasvatukseen on Suomessa viime aikoina lisääntynyt. Tässä nähdään mahdollisuus tuottaa teollisesti ja intensiivisesti pelkästään energiapuuta. Myös hiilidioksidin kierto nopeutta voidaan huomattavasti tehostaa.

## Pellettien valmistus

Puupelletit ovat kuivaa, helposti käsiteltävää, vähän pölyävää ja tasalaatuista polttoainetta. Pelletit soveltuvat lämmityspolttoaineeksi pieniin käyttökohteisiin, mutta myös pää- ja tukipolttoaineeksi kaikissa voimalaitoskokoluokissa. Pellettien korkeampi energiasisältö mahdollistaa pitemmät kuljetusmatkat käyttäjälle kuin metsähakkeella.

Pellettien tuotanto Suomessa vuonna 2009 oli 299 000 tonnia (1,4 TWh) ja kulutus 156 000 (1,0 TWh). Vuonna 2009 pellettiä tuotiin Suomeen 50 000 tonnia (0,24 TWh). Pelletin vienti vuonna 2009 oli 136 000 tonnia (0,65 TWh) ja vientimaat ovat Ruotsi ja Tanska, jotka yhdessä kattavat viennistä 98 %.

Perinteisiä pelletin raaka-aineita ovat mekaanisen puunjalostuksen kuivat sivutuotteet, kuten kutterinlastu ja hiontapöly. Kuivat raaka-aineet ovat jo nyt täyskäytössä ja jos valmistusmääriä jatkossa lisätään, joudutaan käyttämään kosteampia raaka-aineita. Näitä ovat sahanpuru, metsähake ja pienpuu. Metsähakkeesta tehtävien pelletin tuotannon kokonaistuotantokustannukset olisivat tarkastelun mukaan noin 27–32 €/MWh pellettitehtaalla.

## Biohiilen valmistaminen metsähakkeesta

Biohiilen valmistus eli torrefiointi tapahtuu käsittelemällä biomassa 250–270 °C asteen lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. siten, että siitä haihtuvat vesi sekä osa haihtuvista aineista. Biomassa kuivuu täydellisesti torrefioinnin aikana ja sen jälkeen kosteuden imeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä.

Kuljetettavuuden ja käsittelyn helpottamiseksi torrefioitu biomassa murskataan ja pelletoidaan. Näin valmistettua lopputuotetta kutsutaan TOP-pelletiksi (TORrefied Pellet). TOP-pelletti on lähes hydrofobinen eikä vety ulkoarastoinnissa, sen tilavuuspohjainen lämpöarvo vastaa kivihiiltä, se käyttäytyy hiilimyllyjen jauhatuksessa ja pölypolttimilla kuten kivihiili, joten se soveltuu ihanteellisesti hiililaitoksiin sellaisenaan ilman muutosinvestointeja. Metsähakkeesta valmistettavien TOP-pellettien tuotantokustannukset tehtaalla ovat 31–38 €/MWh.

Yhdistettyä torrefiointi- ja pelletointiprosessia on demonstroitu Euroopassa pilot-kokoluokan laitteistolla. Yhtään kaupallista laitosta ei ole vielä missään toiminnassa.

### **Metsähakkeen tuotannon ja hankinnan kehittämistarpeet**

Metsähakkeen hankinnan kehittämistarpeiden määrittämiseksi laadittiin arviointitaulukko, jolla määritettiin metsähakkeen kasvutavoitteiden saavuttamista rajoittavien tekijöiden merkitystä ja käytönkasvun ongelmakohtien ratkaisu- ja kehittämismahdollisuuksia. Arviointitaulukko ja avoimet kysymykset annettiin vastattavaksi asiantuntijaryhmälle, joka koostui energiateollisuuden, korjuuorganisaatioiden, metsänomistajien, koneyrittäjien sekä tutkimus- ja tuotekehitysorganisaatioiden edustajista.

Kannoilla suurimpina kasvun rajoitteina pidettiin kantomurskeen huonoa soveltuvuutta eri kokoluokan käyttöpaikoille, metsänomistajien suhtautumista energiapuukauppaan, kantojen korjuun kestävyys ja seurannaisvaikutuksia, huonoa kuljetustehokkuutta kaukokuljetuksessa sekä kantojen saatavuutta eri markkinatilanteissa. Eniten kehityspotentiaalia nähtiin kantomurskeen laadun paranemisessa (vähemmän epäpuhtauksia) ja sitä kautta parempana soveltuvuutena eri kokoluokan käyttöpaikoille. Metsänomistajien energiapuukauppamyönteisyyden edistämässä, samoin kuin kestävyys- ja seurannaisvaikutusten huomiomisessa ja siitä tiedottamisessa nähtiin olevan merkittävästi parantamisen varaa. Kuljetustehokkuudessa ja kantojen kuormaus- ja purkutyön tehostumisessa todettiin olevan myös merkittävästi kehityspotentiaalia.

Harvennuspulla suurimpina kasvun rajoitteina pidettiin korkeita korjuukustannuksia, korjuutyön vaativuutta, ammattitaitoisen työvoiman saatavuutta, metsänomistajien asennetta energiapuukauppaan sekä nykyisiä metsänkäsittelyohjeita. Suurin kehityspotentiaali nähtiin korjuukustannusten alentamisessa, kuljettajien ammattitaidon edistämässä, ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden turvaamisessa, metsänomistajien aktivoimisessa puukauppaan sekä korjuun integroinnissa.

Latvusmassalla suurimpina kasvun rajoitteina pidettiin latvusmassan saatavuutta eri markkinatilanteissa, huonoa varastoitavuutta, huonoa kuljetustehokkuutta sekä heikkoa laatua ja lämpöarvoa. Metsänomistajien suhtautuminen energiapuukauppaan nähtiin myös kasvutavoitteen rajoitteena. Suurimmat kehityspotentiaalit nähtiin varastoitavuuden parantamisessa, metsänomistajien aktivoinnissa energiapuukauppaan, kuljetustehokkuuden kehittämässä sekä laadun ja lämpöarvon kohentamisessa eri kokoluokan laitosten vaatimalle tasolle.

## Kehittämistyön toteutus

Tämän selvityksen mukaan tärkeimpiä kehittämiskohteita metsähakkeen korjuun osalta 2010-luvulla ovat:

- Harvennuspuuhakkeen tuotantoketjun tehostaminen ja korjuukustannusten alentaminen.
- Metsähakkeen toimitusvarmuuden ja kuljetusketjujen tehokkuuden parantaminen pitkillä kaukokuljetusmatkoilla ja eri kuljetusmuotojen yhdistelmillä.
- Kantohakkeen laadun parantaminen sekä metsä- ja maantiekuljetusten tehostaminen.
- Kuljettajien koulutus.
- Metsänomistajien aktivointi ja koulutus energiapuukauppaan.
- Metsähakkeen hankinnan liiketoiminnan kehittäminen.
- Metsähakkeen korjuun seurannaisvaikutusten ennaltaehkäisy korjuutoimintaa kehittämällä.
- Tehostaa puubiomassan kasvatusta aines- ja energiapuuksi.

Kehittämistyön käytännön toteutukseen liittyy tutkimus- ja kehitystyötä sekä uusien menetelmien ja tekniikoiden demonstrointia. Tutkimus- ja kehitystyö toteutetaan kone- ja laitevalmistajien, järjestelmätoimittajien, metsähakkeen käyttäjien, korjuuorganisaatioiden, kone- ja kuljetusyrittäjien sekä eri tutkimuslaitosten, ammattikorkeakoulujen ja yliopistojen yhteistyönä. Uusien tekniikoiden ja menetelmien käytännön demonstrointi tapahtuu koko metsähakkeen tuotanto- ja toimitusketjun yhteistyönä. Toimijoita ovat mm. metsänomistajat, metsäorganisaatiot, metsäenergian käyttäjät, korjuuorganisaatiot, kone- ja laitevalmistajat, kone- ja kuljetusyrittäjät, järjestelmätoimittajat, ohjausjärjestelmien kehittäjät, oppilaitokset sekä tutkimuslaitokset, ammattikorkeakoulut ja yliopistot.

## Lähdeluettelo

- Agar, D. & Wihersaari, M. 2010. Torréfaction of biomass on the production of enhanced solid fuels for European large-scale power generation. Forest Bioenergy 2010 – Book of Proceedings. Finbio Publications 47, FINBIO – The Bioenergy Association of Finland FINBIO. S. 315–323.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia (Properties of fuels used in Finland). Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. 172 s. + liitt. 17 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>
- Anttila, P., Korhonen, K.T. ja Asikainen, A. 2009. Forest energy potential of small trees from young stands in Finland. In: Mia Savolainen (toim.). Bioenergy 2009. Sustainable Bioenergy Business. 4th International Bioenergy Conference from 31st of August to 4th of September 2009. Book of Proceedings Part I. FINBIO:n julkaisusarja – FINBIO Publications 1(44), s. 221–226.
- Asikainen, A. ja Anttila, P. 2009. Jatkuuko metsäenergian käytön kasvu? Julkaisussa: Hänninen, R. & Sevola, Y. (toim.). Metsäsektorin suhdannekatsaus 2009–2010. Metsäntutkimuslaitos. S. 55–57.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. ja Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Bergkvist, I. 2003. Flerträdshantering höjer prestationen och ökar nettot i klen gallring. Skogforsk, Resultat 5/2003. 4 s.
- Bergman, P. C. A. 2005. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. Energy Research Centre of the Netherlands. ECN-C--05-073. 29 s. Saatavissa: <http://www.techtp.com/recent%20papers/TOP%20Process.pdf>.
- Bergman, P. C.A. ja Kiel, J. H. A. Torrefaction for biomass upgrading. Published at 14th European BiomassConference & Exhibition. Paris, France. 17–21 October 2005. Ei päivitystietoja. Saatavissa: <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05180.pdf>
- Bioenergia-lehti 3/2010. Puupolttoaineiden hintataso.
- Bioenergia-lehti 4/2010. Puupolttoaineiden hintataso.
- Bioenergi tidskriften 2010. Bioenergihandboken. Julkaisussa: <http://www.novator.se/bioenergy/facts/fuelinvest.pdf>.



- Energiateollisuus. 2008. Kaukolämpötilasto 2008.
- Enström, J. 2010. Effektivisering av järnvägstransport av skogsbränsle. Julkaisussa: Effektivare skogsbränslesystem 2007–2010, s. 70–73.
- Enström, J. 2009. Terminalhantering för effektivare järnvägstransporter av skogsbränsle. Resultat från Skogforsk. Nr 13/2009. 4 s.
- Flyktman, M. 2001. Pellettien tuotantokustannukset eri laitoskytkennöillä. ENE3/T0101/2001. 18 s. + liitt.15 s.
- FAO, October 2008. Synthesis of Country Progress Reports received, prepared for the 23rd Session of the International Poplar Commission, jointly hosted by FAO and by the Beijing Forestry University, the State Forest Administration of China and the Chinese Academy of Forestry; Beijing, China, 27–30 October 2008. International Poplar Commission, Working, Paper IPC/6. Forest Management Division, FAO, Rome (unpublished). Saatavissa: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/k3380e/k3380e.pdf>
- Gingras, J-F. 2004. Early studies of multi-tree handling in eastern Canada. International Journal of Forest Engineering 15(2), s. 18–22.
- Gullberg, T. 1997. A deductive time consumption model for loading shortwood. International Journal of Forest Engineering 8(1), s. 35–44.
- Hakkila, P. 2006. Selvitys energiapuun mittauksen järjestämisestä ja kehittämisestä. Dnro:n 4191/67/2005/MMM mukainen selvitystehtävä. 30 s.
- Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraportti 5/2004. 135 s.
- Hakkila, P. 1976. Kantopuu metsäteollisuuden raaka-aineena. Folia Forestalia 292. 39 s.
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tanttu, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. ja Korhonen, K.T.. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s.
- Heikkinen, J. 2009. Haastattelututkimus pajun lyhytkiertoviljelystä Suomalaisten viljelijöiden näkökulmasta. Proseminaarityö. Joensuun yliopisto 32 s. + liitteet 6 s.
- Heikola, P., Laaksonen, T., Laine, P. ja Seppälä P. 1992. Energiapajun kasvatusta ja talous. Satakunnan Painotalo Oy. 32 s.

- Helynen, S., Flyktman, M., Asikainen, A. ja Laitila, J. 2007. Metsätalouteen ja metsäteollisuuteen perustuvan energialiiketoiminnan mahdollisuudet. VTT Tiedotteita 2397. 66 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2397.pdf>
- Hiltunen, J. 2010. Metsähakkeen vesitiekuljetuksen simulointi Saimaan vesistöissä. Metsä- ja puuteknologian kandidaatin tutkielma. Itä-Suomen yliopisto. Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 25 s.
- Jäkälä, M. ja Mäkinen, P. 2000. Metsäkoneyrittäjät energiapuun korjuussa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 778. 20 s.
- Järvinen, E., Rämö, A-K. ja Silvennoinen, H. 2006. Energiapuun tuotanto ja markkinat: Metsäomistajakysely. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja nro 199. 88 s.
- Kaleva, 2010. Biodieselin teko vaatii tukea. 12.10.2010.
- Kariniemi, A. 2010. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2009. Metsätehon katsaus 43. 4 s.
- Kariniemi, A. 2006. Kuljettajakeskeinen hakkuukonetyön malli – työn suorituksen kognitiivinen tarkastelu. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 38. 127 s.
- Karttunen, K., Föhr, J. ja Ranta, T. 2009. Energiapienpuun hankintalogistiikka. Esiselvitys ”Energiapuuta Etelä-Savosta” -projektille. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 26 s. + liitteet 5.
- Karttunen, K. ja Korpilahti, A. 2009. Metsäpolttoaineiden proomukuljetus. Metsätehon tulosalvosarja 4/2009. 25 s.
- Karttunen, K., Jäppinen, E., Väätäinen, K. ja Ranta, T. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tutkimusraportti EN B-177. 54 s. + liitteet 3 s.
- Kiel, J.H.A., Verhoeff, F., Gerhauser, H. ja Meuleman, B. 2000. BO2 technology for biomass upgrading into solid fuel – pilot scale testing and market implementation. Saatavissa: <http://www.techtp.com/recentpapers/BO2-technology.pdf>
- Korpilahti, A. 2008. Puukuljetukset Suomessa. Metek 14 luento 10.11.2008. 38 s.
- Korpilahti, A. ja Poikela, A. 1997. Hakkuutähdeketjujen vertailu UPM-Kymmene Oy:lle. Metsätehon raportti 33. 45 s.

- Korpinen, O-J., Saranen, J., Väätäinen, K., Karttunen, K. ja Ranta, T. 2010. Viability of forest fuel transportation in the Finnish rail and waterway networks. Forest bio-energy 2010 31.8.–4.9.2010. Book of proceedings, s. 197–205.
- Kärhä, K. 2010. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2009. Metsätehon tulostalvosarja 9/2010. 22 s.
- Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. ja Keskinen, S. 2009a. Kokopuun paalaus – tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 211. 68 s.
- Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T. ja Pajuoja, H. 2009b. Kiinteiden puupolttoainesten saatavuus ja käyttö Suomessa 2020. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvara-ala: Metsä 10/2009 (736). 8 s.
- Kärhä, K., Strandström, M., Lahtinen, P. ja Elo, J. 2009c. Metsähakkeen tuotannon kalusto- ja työvoimatarve Suomessa 2020. Metsätehon katsaus nro 41/2009. 4 s.
- Kärhä, K. ja Mutikainen, A. 2008. Moipu 400 ES ensiharvennuspuun integroidussa hakuksessa. TTS:n tiedote 726. 6 s.
- Kärhä, K. 2007a. Metsähakkeen tuotannon visiot (The visions of the forest chip production). BioEnergia 2/2007, s. 8–12.
- Kärhä, K. 2007b. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. Metsätehon katsaus nro 28. 4 s.
- Kärhä, K. (toim.). 2001. Harvennuspuun koneelliset korjuuvaihtoehdot. HARKO-projektin (1999–2001) loppuraportti. Työtehoseuran julkaisuja 382. 93 s.
- Laaksonen, T. 2006. Yhteistyösuhteiden ja luottamuksen hallinta verkostotaloudessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, tuotantotalouden osasto. 96 s.
- Laitila, J., Heikkilä, J. ja Anttila, P. 2010. Harvesting alternatives, accumulation and procurement cost of small-diameter thinning wood for fuel in Central-Finland. Silva Fennica 44(3), s. 465–480.
- Laitila, J. ja Väätäinen, K. 2010. Harvennusmetsien energiapuun korjuuvaihtoehdot ja haketus- ja kuljetuslogistiikka. Metsätieteen aikakauskirjaan toimitettu käsikirjoitus. 28 s.
- Laitila, J. 2010. Kantojen korjuun tuottavuus. Metlan työraportteja 150. 29 s.
- Laitila, J., Jylhä, P. ja Nuutinen, Y. 2009a. Kokopuun paalaukseen perustuvan menetelmän tuottavuus ja kustannukset. Metlan tutkimusraportti Metsäteho Oy:lle 31.10.2009. 46 s.

- Laitila, J., Kärhä, K. ja Jylhä, P. 2009b. Time Consumption Models and Parameters for Off- and On-road Transportation of Whole-tree Bundles. *Baltic Forestry* 15, s. 105–114.
- Laitila, J. 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. *Silva Fennica* 42(2), s. 267–283.
- Laitila, J., Asikainen, A. ja Anttila, P. 2008a. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Kuusinen, M. ja Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. Saatavissa: [www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti](http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti)
- Laitila, J., Ranta, T. ja Asikainen, A. 2008b. Productivity of stump harvesting for fuel. *International Journal of Forest Engineering* 19(2), s. 37–47.
- Laitila, J., Ala-Fossi, A., Vartiamäki, T., Ranta, T. ja Asikainen, A. 2007a. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen tuottavuus. *Metlan työraportteja* 46. 27 s.
- Laitila, J., Asikainen, A. ja Nuutinen, Y. 2007b. Forwarding of whole trees after manual and mechanized felling bunching in pre-commercial thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 18(2), s. 29–39.
- Laitila, J. 2006. Cost and sensitive analysis tools for forest energy procurement chains. *Metsanduslikud Uurimused – Forestry Studies* 45, s. 5–10.
- Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K.T. ja Nuutinen, Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. *Metlan työraportteja* 3. 57 s.
- Laitila, J. ja Asikainen, A. 2002. Metla tutki uudenlaista yhdistelmäkonetta – Tutkimuksen tulokset lupaavia. *Koneyrittäjä* 2/2002, s. 40–42.
- Lauhanen, R. ja Laurila, J. 2007. Bioenergian tuotannon haasteet ja tutkimustarpeet. *Metlan työraportteja* 42. 58 s.
- Leiviskä, V. 2004. Metsähakkeen pelletöinti-pelletöintikoe. Oulun Yliopiston Thule-instituutti. Saatavissa verkosta: [http://www.hankerekisteri.fi/sisalto/raportit/pohjois-pohjanmaan\\_pellett\\_Tav1.pdf](http://www.hankerekisteri.fi/sisalto/raportit/pohjois-pohjanmaan_pellett_Tav1.pdf)
- Lilleberg, R. 1994. Joukkokäsittelyharvesteri FMG 990/756 H ensiharvennussmannikössä. *Metsätehon katsaus* 8/1994. 6 s.
- Metsäliitto ja Vapo Oy 2009. Metsäliiton ja Vapo Oy:n biodieselhanke YVA ohjelma.
- Mynttinen, S. 2010. Energiapuuta Etelä-Savosta hanke. *Metsänomistajakysely*. 25 s.

- Mäkelä, M., Poikela, A. ja Liikanen, R. 2002. Joukkohakkuu aines- ja energiapuun korjuussa. Metsätehon raportti 137. 18 s.
- Nurmi, J. 2000. Characteristics and storage of whole-tree biomass. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja – The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 758. 42 s. + 7 osajulkaisua.
- Nurminen, T., Korpunen, H. ja Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40(2), s. 335–363.
- Obernberger, I. ja Thek, G. 2010. The pellet handbook. The production and thermal utilisation of biomass pellets. London: Bios bioenegriesysteme GmbH. 549 s.
- Oijala, T., Saksa, T. ja Sauranen, T. 1999. Hakkuutähteen korjuumenetelmien vertailu ja vaikutus metsänuudistamiseen. Bioenergian tutkimusohjelma. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. 84 s.
- Oikari, M. 2008. Aines- ja energiapuun korjuun tehostamiskeinot ja niiden priorisointi nuorissa metsissä. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, metsä- ja puuteknologian pro gradu-tutkielma. 111 s.
- Okkonen, L., Paukkunen, S., Lamberg, H., Sippula, H., Tissari, J. ja Jokiniemi, J. 2009. PELLETtime investigates alternative raw materials of pellet production. Finbio-energy 2009. Saatavissa: [http://www.pellettime.fi/publications/material/Pellettime\\_Bioenergy\\_Submitted.pdf](http://www.pellettime.fi/publications/material/Pellettime_Bioenergy_Submitted.pdf)
- Ollila, J. 2010. Kanteleen Voima Oy. Suullinen tiedonanto.
- Ollus, M., Ranta, J. ja Ylä-Anttila, P. (toim.). 1998. Yritysverkostot – kilpailua tiedolla, nopeudella ja joustavuudella. Sitra 201. 133 s.
- Oulun Energia 2010. Puun käyttö roihatti kasvuun. Lähde: <http://www.ouluenergia.fi/index.php?1276>
- Ovaskainen, H., Uusitalo, J. ja Väättäinen, K. 2004. Characteristics and significance of a harvester operators' working technique in thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 15(2), s. 67–77.
- Paju, P. ja Alakangas, E. 2002. Puupellettien tuotanto-, jakelu- ja käyttöketjun tekniikka, talous ja markkinat. Opet Raportti 1, Jyväskylä, VTT Prosessit. 73 s. + liitt. 28 s.
- Paukkunen, S., Sikanen, L., Okkonen, L., Vilppo, T. & Lamberg, H. 2010. Energy pellets in the future - markets and raw materials. Proceedings of the forest bioenergy 2010, Tampere, 4–6 September 2010. Finbio. S. 305–313.

- Pekkarinen, M. 2010. Kohti vähäpäästöistä Suomea – Uusiutuvan energian velvoitepakketti. Esitelmä 20.4.2010.
- Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia 2008. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. 130 s.
- Pohjonen; V. 2010. Bioenergia-blogi. Lähde: [http://veli.pohjonen.org/?page\\_id=53](http://veli.pohjonen.org/?page_id=53). Päivitetty 26.4.2010.
- Raitila, J. 2009. Katsaus markkinoihin – kehitysnäkymät ja -tarpeet. Lähde: [http://www.metsakeskus.fi/NR/rdonlyres/7C377AA3-5AEC-420E-B3E9-F06BACC34A99/13846/RaitilaJyrki\\_energiapuukorjau\\_markkinat\\_ ja\\_ kehitys.pdf](http://www.metsakeskus.fi/NR/rdonlyres/7C377AA3-5AEC-420E-B3E9-F06BACC34A99/13846/RaitilaJyrki_energiapuukorjau_markkinat_ ja_ kehitys.pdf)
- Ranta, T. 2010. Metsäenergian tehokkaat kuljetusmuodot – LUT Energia. Esitelmä Itä-Suomen Bioenergiapäivillä, 22.3. 2010, Snowpolis Oy, Vuokatti. 29 s.
- Ranta, T. 2002. Logging residues from regeneration fellings for biofuel production – a GIS-based availability and supply cost analysis. Väitöskirja, Acta Universitatis Lappeenrantaensis 128, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 180 s.
- Ranta, T., Asikainen, A., Lehikoinen, M., Väätäinen, K., Halonen, K. ja Frilander, P. 2002. Metsähakkeen autokuljetuksen logistiikka. Tutkimusselostus PRO/T6042/02. VTT Prosessit. 31 s.
- Rantala, J. ja Kulmala, H.I. 2006. Verkostoitumisen nykytilanne, edellytykset ja mahdollisuudet metsätalouden palvelutuotannossa Pirkanmaalla. Metsätieteen aikakauskirja 3/2006, s. 353–367.
- Reini, K. ja Törmä, H. 2010. Suomen metsäteollisuuden uusien mahdollisuuksien alueloudelliset vaikutukset. Helsingin Yliopisto. Ruralia-instituutti. Raportteja 55.
- Repola, J., Ojansuu, R. ja Kukkola, M. 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. Metlan työraportteja 53. 28 s.
- Rese, M. 2006. Successful and sustainable business partnerships: how to select the right partners. *Industrial Marketing Management* 35(1), s. 72–82.
- Rieppo, K. 2002. Hakuutähteen metsäkuljetuksen ajanmenekki, tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 136. 47 s.
- Ryymin, R., Pohto, P., Laitila, J., Humala, I., Rajahonka, M., Kallio, J., Selosmaa J., Anttila, P. ja Lehtoranta, T. 2008. Metsäenergian hankinnan uudistaminen. Loppuraportti ([http://www.hse.fi/files/1388\\_JEME-raportti.pdf](http://www.hse.fi/files/1388_JEME-raportti.pdf)). HSE Executive Education 8. 81 s.

- Rämö, A-K. ja Toivonen, R. 2001. Metsänomistajien energiapuun tarjontahalukkuus alueittain. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen työpapereita 46. 53 s.
- Rämö, A-K., Toivonen, R. ja Tahvanainen, L. 2001. Yksityismetsänomistajien energiapuun tarjonta ja suhtautuminen puun energiakäyttöön. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen raportteja 175. 101 s.
- Räsänen, T. 2007. Informaation hallinta yrittäjävetoisessa puuhuollossa. Julkaisussa: Kariniemi, A. (toim.). Kehittyvä puuhuolto 2007. 14.–15.2.2007, Jyväskylä. Seminaarijulkaisu. Metsäteho Oy, s. 37–42.
- Saarinen, V-M. 2006. The effect of slash and stump removal on productivity and quality of forest regeneration operations – preliminary results. Biomass & Bioenergy 30 (2006), s. 349–356.
- Salminen, O. 2010. Energiapuun ja ainespuun hakkuumahdollisuudet. Valtakunnan metsien inventoinnin tiedotustilaisuus 22.6.2010. Esitys ladattavissa: <http://www.metla.fi/tiedotteet/2010/VMI/salminen-esitys.pdf>
- Seppänen, A., Harstela, P. ja Rantala, J. 2008. Informaatio- ja kommunikaatioteknologia (ICT) metsänhoitoyhdistysten metsäpalveluiden hallinnassa. Metlan työraportteja 82. 50 s.
- Seppänen, M., Lyly-Yrjänäinen, J., Jämsen, M., Kulmala, H.I., Lahikainen, T. ja Paranko, J. 2002. Kannattavuuden jäljillä – yritysverkoston kustannuslaskenta ja sen kehittäminen. MET-julkaisuja 1. 81 s.
- Sirén, M. 1998. Hakkukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 694. 179 s.
- Thek, G. ja Oberberger, I. 2001. Produktionskosten von Holzpellets gegliedert nach Prozessschritten und unter Berücksichtigung österreichischer Randbedingungen. In: Tagungsband zum 2. Europäischen Experten Forum Holzpellets, November 2001, Salzburg, Umbra GmbH (Hrsg.), St. Pölten, Austria, s. 33–40.
- Tilastokeskus 2009. Energiaennakko 2008. SVT Energia 2009. 42 s.
- Tilastokeskus 2010a. Tuottajahintaindeksit heinäkuu 2010. Saatavissa: [http://stat.fi/til/thi/2010/07/thi\\_2010\\_07\\_fi.pdf](http://stat.fi/til/thi/2010/07/thi_2010_07_fi.pdf)
- Tilastokeskus 2010b. Kuluttajahintaindeksi 2010. Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/khi/2010/08/khi\\_2010\\_08\\_2010-09-14\\_tau\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/khi/2010/08/khi_2010_08_2010-09-14_tau_001_fi.html)

- Työ- ja elinkeinoministeriö 2010. Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti. 10 s.
- UPM-Kymmene Oyj 2009. Toisen sukupolven biojalostamo. Ympäristövaikutusten arviointi.
- Vapo Oy 2010. Lähde:  
[http://www.vapo.fi/fin/yksityisasiakkaat/lammityspolttoaineet/pelletit/yleista\\_pelletista/?id=1688](http://www.vapo.fi/fin/yksityisasiakkaat/lammityspolttoaineet/pelletit/yleista_pelletista/?id=1688).
- Vesterinen, M. 2007. Laaja-alaiseen yrittämiseen siirtymisen haasteet. Julkaisussa: Kari- niemi, A. (toim.). Kehittyvä puuhuolto 2007. 14.–15.2.2007, Jyväskylä. Seminaa- rijulkaisu. Metsäteho Oy, s. 31–35.
- Viiri, H. ja Piri, T. 2008. Metsien terveys ja tuhot. Julkaisussa: Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. Ladattavissa: [http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti: 47–52](http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti:47-52).
- Väätäinen, K., Lappalainen, M., Asikainen, A. ja Anttila, P. 2008. Kohti kustannustehok- kaampaa puunkorjuuta – puunkorjuuyrittäjän uusien toimintamallien simulointi. Metlan työraportteja 73. 52 s.
- Väätäinen, K., Liiri, H., Asikainen, A., Sikanen, L., Jylhä, P., Rieppo, K., Nuutinen, Y. ja Ala-Fossi, A. 2007. Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa. Metlan työraportteja 48. 78 s.
- Väätäinen, K., Asikainen, A. ja Sikanen, L. 2006. Metsäkoneiden siirtokustannusten las- kenta ja merkitys puunkorjuun kustannuksissa. Metsätieteen aikakauskirja 3/2006, s. 391–397.
- Väätäinen, K., Asikainen, A. ja Eronen, J. 2005a. Improving the logistics of biofuel recep- tion at the power plant of Kuopio city. International Journal of Forest Engineering 16(1), s. 51–64.
- Väätäinen, K., Ovaskainen, H., Ranta, P. ja Ala-Fossi, A. 2005b. Hakkuukonekuljettajan hiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. Finnish Forest Re- search Institute Research Notes 937. 100 s.
- Wiik, C., Heiskanen, V.-P., Kallio, M. ja Anttila, P. 2009 Feasibility assessment: Wood pellets raw material from Canadian British Columbia. VTT. 43 s + liit. 6 s.
- Ylitalo, E. 2001. Puupolttoaineen käyttö energiantuotannossa vuonna 2000. Metsätilasto- tiedote 574. 5 s.



- Ylitalo, E. 2002. Puupolttoaineen käyttö energiantuotannossa vuonna 2001. Metsätilastotiedote 620. 5 s.
- Ylitalo, E. 2003. Puupolttoaineen käyttö energiantuotannossa vuonna 2002. Metsätilastotiedote 670. 5 s.
- Ylitalo, E. 2004. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa vuonna 2003. Metsätilastotiedote 719. 7 s.
- Ylitalo, E. 2005. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa vuonna 2004. Metsätilastotiedote 770. 7 s.
- Ylitalo, E. 2006. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa vuonna 2005. Metsätilastotiedote 820. 7 s.
- Ylitalo, E. 2007. Puun energiakäyttö 2006. Metsätilastotiedote 867. 10 s.
- Ylitalo, E. 2008. Puun energiakäyttö 2007. Metsätilastotiedote 15/2008. 6 s.
- Ylitalo, E. 2009. Puun energiakäyttö 2008. Metsätilastotiedote 15/2009. 7 s.
- Ylitalo, E. 2010. Puun energiakäyttö 2009. Metsätilastotiedote 16/2010. 7 s.



Tekijä(t) Juha Laitila, Arvo Leinonen, Martti Flyktman, Matti Virkkunen & Antti Asikainen		
Nimeke <b>Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet</b>		
Tiivistelmä <p>Työn tavoitteena oli luoda katsaus metsähakkeen käyttö- ja korjuumahdollisuuksiin vuonna 2020 ja selvittää asiantuntijakyselyn avulla metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan kehittämistarpeet, jotta metsähakkeen 13,5 milj. m<sup>3</sup>:n käyttötavoite voidaan saavuttaa vuonna 2020. Lisäksi perehdyttiin metsähakkeen nykyisiin korjuuketjuihin ja metsähakkeen hankinnan kustannusrakenteeseen, viljellyn energiapuun korjuuteknologiaan ja talouteen sekä pellettien ja torrefioidun puun tuotantoteknologiaan ja -kustannuksiin.</p> <p>Metsähakkeen korjuumahdollisuudet vuonna 2020 ovat 40,4 TWh eli 20,2 milj.m<sup>3</sup>, kun ainespuun korjuumäärä ja hakkuupoistuman rakenne ovat samat kuin vuosien 2004–2008 hakkuissa keskimäärin. Skenaariotarkastelun tuloksia tarkastellessa pitää muistaa, että käytännössä puunostajat ja metsänomistajat ratkaisevat puumarkkinoilla, miten metsiä vuonna 2020 hakataan ja hoidetaan. Metsähakkeelle asetettu 25 TWh:n suuruinen käyttötavoite voidaan saavuttaa yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa sekä erillisessä lämmöntuotannossa. Eniten metsähakkeen käyttöä voidaan lisätä yhdyskuntien CHP-laitoksissa (5,8 TWh) ja kivihiltä käyttävissä CHP-laitoksissa (4,1 TWh). Lisäksi Suomeen on suunnitteilla kolme biojalostamo, joiden kokonaistuotantokapasiteetti on noin 7 TWh liikenteen biopolttoainetta. Biopolttoaineiden tuotannossa syntyy paljon lämpöenergiaa, jota voidaan hyödyntää biojalostamoon integroituneen teollisuuden prosesseissa ja parantaa biopolttoaineiden tuotannon hyötysuhdetta.</p> <p>Asiantuntijakyselyn mukaan metsähakkeen hankinnan tärkeimmät kehitystarpeet liittyvät harvennuspöydällä korjuukustannusten alentamiseen, kuljettajien ammattitaidon edistämiseen, ammattitaitoisen työvoiman saatavuuden turvaamiseen ja korjuun integrointiin. Kannoilla tärkeimmät kehitystarpeet liittyvät kantomurskeen laadun ja käytettävyyden parantamiseen ja kaukokuljetustehokkuuden lisäämiseen. Metsänomistajien aktivoiminen energiapuukauppaan, samoin kuin kestävyys ja seurannaisvaikutusten huomioiminen energiapuun korjuussa, nousi korostetusti esille kaikilla metsähakelajilla. Pitkän kuljetusmatkan kuljetusmuotoja, samoin kuin yhdistettyjä kuljetusmuotoja, on kehitettävä ja metsähakkeen puutteellista toimitusvarmuutta ja laatua on parannettava.</p>		
ISBN 978-951-38-7677-7 (nid.) 978-951-38-7678-4 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinumero
Julkaisu-aika Joulukuu 2010	Kieli Suomi	Sivuja 143 s.
Projektin nimi PUUSKA		Toimeksiantaja(t)
Avainsanat Forest chips, young forests, stumps, logging residues, wood energy		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374



## VTT Tiedotteita – Research Notes

- 2551 Auli Kuusela-Lahtinen, Ulla-Maija Mroueh, Pasi Vahanne, Terhi Kling, Anu Kapanen, Maarit Priha, Eevaliisa Laine & Esko Rossi. Ympäristö- ja terveystieteiden arviointimenetelmien vertailu. 2010. 130 s. + liitt. 52 s.
- 2552 Eija Kaasinen, Mari Ainasoja, Elina Vulli, Heli Paavola, Riina Hautala, Pauliina Lehtonen & Esa Reunanen. User involvement in service innovations. 2010. 64 p.
- 2553 Kimmo K. Mäkelä, Jouni Huopana, Tomi Seppänen, Jari Ulkuniemi, Markku Kananen, Markku Valtonen, Jouko Heikkala & Jussi A. Karjalainen. Tyviko-  
projektin loppuraportti. 2010. 74 s. + liitt. 6 s.
- 2554 Mikko Malmivuo & Juha Luoma. Talvirenkaiden kunnan kehittyminen 2001–2010. 2010. 41 s. + liitt. 11 s.
- 2555 Anu Tuominen, Heidi Auvinen, Heikki Kanner & Toni Ahlqvist. Liikennejärjestelmän visiot 2100. Esiselvitys. 2010. 41 s. + liitt. 11 s.
- 2556 Sebastian Teir, Jens Hetland, Erik Lindeberg, Asbjørn Torvanger, Katarina Buhr, Tiina Koljonen, Jenny Gode, Kristin Onarheim, Andreas Tjernshaugen, Antti Arasto, Marcus Liljeberg, Antti Lehtilä, Lauri Kujanpää & Matti Nieminen. Potential for carbon capture and storage (CCS) in the Nordic region. 2010. 188 p. + app. 28 p.
- 2557 Veli-Pekka Kallberg. Linja-autojen paloturvallisuus Suomessa 2000-2009. 2010. 34 s. + liitt. 9 s.
- 2558 Ali Harlin & Minna Vikman (eds.). Developments in advanced biocomposites. 2010. 94 p.
- 2559 Anna Leinonen & Sirkku Kivisaari. Nanotechnology perceptions. Literature review on media coverage, public opinion and NGO perspectives. 2010. 55 p. + app. 1 p.
- 2560 Hanna Pihkola, Minna Nors, Marjukka Kujanpää, Tuomas Helin, Merja Kariniemi, Tiina Pajula, Helena Dahlbo & Sirkka Koskela. Carbon footprint and environmental impacts of print products from cradle to grave. Results from the LEADER project (Part 1). 2010. 208 p. + app. 35 p.
- 2562 Tuomo Rinne, Kati Tillander & Peter Grönberg. Data collection and analysis of evacuation situations. 2010. 46 p. + app. 92 p.
- 2563 Marja-Leena Haavisto, Kaarin Ruuhilehto & Pia Oedewald. Rautateiden liikenteenohjaus ratatöiden aikana ja ratatöiden hallinta. 2010. 79 s. + liitt. 7 s.
- 2564 Juha Laitila, Arvo Leinonen, Martti Flyktman, Matti Virkkunen & Antti Asikainen. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. 2010. 144 s.
- 2567 Tommi Kaartinen, Jutta Laine-Ylijoki, Auri Koivuhuhta, Tero Korhonen, Saija Luukkanen, Pekka Mörsky, Raisa Neitola, Henna Punkkinen & Margareta Wahlström. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. 2010. 98 s. + liitt. 8 s.
- 2569 Asko Talja. Ohjeita liikennetärinän arviointiin. 2011. 33 s. + liitt. 9 s.