

TP3. Tuorehakkeen käytön vaikutus metsähakkeen hankintaketjuihin Itä-Suomessa

Juha Laitila

Luonnonvarakeskus

4.10.2024



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Alkusanat

Tämä raportti on tehty EAKR-rahoitteisen ”Tuorehake – vähästä enemmän” hankkeen kolmannessa työpaketissa. Hanke jakautuu kaikkiaan neljään työpakettiin, joista ensimmäisessä työpaketissa (TP1) tutustuttiin tuorehakekonseptin toteutusperiaatteisiin Kauhavalla ja tehtiin vertailuanalyysi ko. toimintamallin toteutettavuudesta Pohjois-Karjalassa. Toisessa työpaketissa (TP2) perehdyttiin tuorehakkeen käytettävyyteen itäsuomalaisilla lämpö- ja voimalaitoksilla eri kattilakokoluokissa ja kattilatyypeillä. Neljännessä työpaketissa (TP4) arvioitiin puolestaan tuorehakkeen käyttöön siirtymisen vaikutuksia metsähakkeen riittävyteen Etelä- ja Pohjois-Savon sekä Pohjois-Karjalan maakunnissa. Työpakettien pdf-muotoiset raportit ovat ladattavissa ”Tuorehake – vähästä enemmän” hankkeen kotisivuilta: <https://www.luke.fi/fi/projektit/tuorehake>

Tässä raportissa (TP3) tarkastellaan tuoreen hakkeen käyttöön siirtymisen vaikutuksia metsähakkeen hankintalogistiikkaan, hankintakustannuksiin ja resurssitarpeisiin. Laskelmissa käytetyt toimitusketjujen tuottavuus- ja kustannusparametrit sekä eri energiapuulajien kuivumis- ja kuiva-ainetappiotiedot ovat koottu aiemmista aihepiiristä tutkimuksista. Koneiden ja ajoneuvojen kustannustiedot ovat puolestaan päivitetty ajan tasalle Metsäalan konekustannusindeksin avulla. Joensuuhun sijoittuvissa paikkatietopohjaisissa hankintakustannustarkasteluissa hyödynnettiin puolestaan olemassa olevia leimikko- ja VMI-koealatietoja Joensuun ympäristöstä 100 km säteellä tieverkkoa pitkin.

Tuorehakeella tarkoitetaan heti puunkorjuun jälkeen tehtyä haketta, jonka puuaineen kuiva-ainetappiot ovat 0 % ja kosteus on 53 % tai enemmän. Tuorehakkeen vastinparina vertailu analyyseissä oli ns. perinteinen toimintamalli, jossa puuta kuivatetaan varastopinossa ennen sen energiakäyttöä. Kuivattamisen kääntopuoli on, että pitkään varastossa säiden armoilla olevan puun lämpöarvo (MWh/m³) alkaa alentua kuiva-ainetappioita aiheuttavan lahoamisen takia. Harvennuksilta korjattava kokopuun ja rangan puuaineen kuiva-ainetappioiden (kg/m³) suuruudeksi arvioitiin vertailu analyyseissä 2,2 %, 6,6 % tai 10,7 %, ja toimituskosteudeksi 35 %, 40 % tai 45 %, kun varastointiajaksi oletettiin 9 kuukautta. Vastaavasti hakkuutähteellä kuiva-ainetappioiden suuruudeksi arvioitiin 10,5 %, 19,9 % tai 28,5 %, ja toimituskosteudeksi 40 %, 45 % tai 50 %, kun varastointiajaksi oletettiin 11 kuukautta.

Vertailuanalyysien laskelmissa kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutus hakkeen energiasisältöön (MWh/m^3) ja hankintakustannuksiin (€/MWh) eri toimintamalleilla laskettiin ylemmän (HHV) ja alemman (LHV) lämpöarvon mukaan. Ylemmän lämpöarvon (HHV) mukaan laskettu hakkeen energiasisältö toimituskosteudessa kuvaa toimintamallia, jossa hakkeen käyttöpaikka on varustettu kondensoivalla savukaasujen pesu- ja lämmöntalteenottojärjestelmällä ja kattila on lähtökohtaisesti soveltuva kosteiden polttoaineiden tehokkaaseen ja häiriöttömään käyttöön. Alemman lämpöarvon (LHV) mukaan laskettu hakkeen energiasisältö toimituskosteudessa huomioi puolestaan veden haihtumiseen kuluvan energiahävikin ja vastaa tilannetta, jossa käyttöpaikka ei ole varustettu em. kondensoivalla savukaasujen hukkalämmön talteenottojärjestelmällä.

Kondensoiva lämmön talteenottotekniikka perustuu siihen, että lämpimien savukaasujen sisältämä hukkaenergia muutetaan hyötykäyttöön tiivistämällä savukaasujen sisältämä vesihöyry takaisin vedeksi kaukolämmön paluuveden avulla. Jos paluuveden lämpötila on korkea, lauhduttimessa ei aliteta riittävästi savukaasujen kastepistelämpötilaa ja lauhtuminen jää vaatimattomaksi. Riittävä savukaasujen lauhtuminen on edellytys tehokkaalle lämmön talteenotolle, minkä vuoksi vertailu analyysien laskelmissa käytettyjä lukuarvoja metsähakkeen energiasisällöstä ylemmän lämpöarvon mukaan tulee arvioida lähinnä teoreettisena maksimina. Käytännössä lämmöntalteenotossa (LTO) on laitoskohtaista vaihtelua, samoin kuin on energiapuun kosteudessa ja kuiva-ainetappioiden suuruudessa varastotasolla.

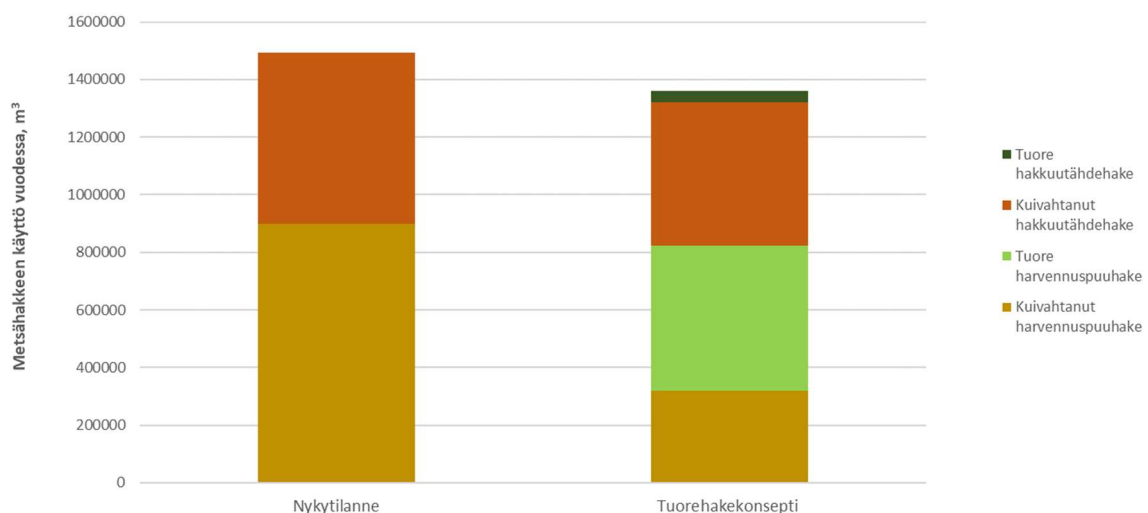
Sisällysluettelo

1. Tuorehakkeen käyttöpotentialiaali Itä-Suomessa	5
2. Metsähakkeen kustannusrakenne	7
3. Kuormien täyttöaste autokuljetuksessa	11
3.1. Ranka	12
3.2. Kokopuuhake.....	14
3.3. Hakkuutähdehake	16
4. Tuorehakekonseptin vaikutus resurssitarpeisiin	19
4.1. Varastoihin sitoutuneen pääoman tarve.....	19
4.2. Kuljetussuoritteiden tarve kaukokuljetuksessa.....	20
4.3. Korjuu- ja haketuskaluston tarve	22
5. Metsähakkeen kertymä ja energiasisältö	23
5.1. Kuiva-ainetappioiden vaikutus kertymään.....	23
5.2. Metsähakkeen energiasisältö	25
6. Metsähakkeen hankintakustannukset	32
7. Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	36
8. Kirjallisuus	41

1. Tuorehakkeen käyttöpotentialiaali Itä-Suomessa

TP 2:ssa tehdyssä tuorehakkeen käyttöpotentialikartoituksessa oli mukana 75 kappaletta metsähaketta käyttävää yli 1 MW:n tehoista kattilaa Pohjois-Karjalan sekä Etelä- ja Pohjois-Savon maakunnista (Leino ym. 2024). Näistä 19 kattilaa oli teholtaan yli 10 MW, 17 kpl oli teholuokassa 5–10 MW, 14 kpl teholuokassa 3–5 MW ja 25 kpl teholuokassa 1–3 MW. Savukaasupesuri oli asennettuna tai sitä oltiin asentamassa 22 kattilaan. Teholuokassa 1–3 MW pesuri oli asennettuna yhteen kattilaan, teholuokassa 3–5 MW neljään, teholuokassa 5–10 MW kymmeneen ja teholuokassa yli 10 MW seitsemään. Tämänhetkinen kokopuu- ja rankahakkeen käyttö em. maakuntien lämpö- ja voimalaitoksilla on 897 500 m³ vuodessa ja hakkuutähdehakkeen 595 500 m³ vuodessa (Kuva 1 ja Taulukko 1).

Ranka- ja kokopuuhakkeesta 70 % ja hakkuutähdehakkeesta noin 95 % käytettiin yli 10 MW:n teholuokan kattiloissa. Tuorehaketta ilmoitettiin nykyisellään poltettavan ainakin jonkin verran 23:ssa tarkastelun kohteena olleista 75 kattilasta mutta käyttömääristä ei ole olemassa tarkempaa tietoa. Laitosten oman ilmoituksen mukaan tuorehakkeen käytön arvioitiin olevan mahdollista nykyisellään 39 kattilassa, joista kahdeksan kohdalla mainittiin ”yhdessä kuivemman polttoaineen kanssa” tai ”osittain”. Käyttöpotentialikartoituksessa mukana olleista kattiloista 53 oli arinakattiloita ja 22 oli leijupetikattiloita. Yhteenlasketusta kattilatehosta leijupetikattiloiden osuus oli 84 % ja arinakattiloiden 16 % (Leino ym. 2024).



Kuva 1. Metsähakkeen nykykäyttö ja tuorehakekonseptin mukainen tarve Itä-Suomessa metsähakelajeittain.

TP 2:n tulosten mukaan hukkalämpöä hyödyntävä teknologia yhdessä kosteille polttoaineille sopivan kattilan, tuoreen metsähakkeen käytön ja kuiva-ainetappioiden minimoinnin sekä tiedossa olevan laitoskannan uusiutumisen sekä potentiaalisten LTO-investointien kanssa leikkaavat metsähakkeen tarvetta. Laskennassa varastoinnin aiheuttamien kuiva-ainetappioiden suuruus oli kokopuulla ja rangalla 6,75 % ja hakkuutähteellä 19,9 %, kun keskimääräiseksi varastointiajaksi oletettiin 9 ja 11 kuukautta. Em. oletuksilla ranka- ja kokopuuhaketta tarvittaisiin vuodessa 73 600 m³ ja hakkuutähdehaketta 58 000 m³ vähemmän, kuin mitä nyt käytetään Pohjois-Karjalan sekä Etelä- ja Pohjois-Savon maakunnissa (Kuva 1 ja Taulukko 1). Perinteisellä tavalla tuotetun metsähakkeen käyttömääriin suhteutettuna tuoreen ranka- tai kokopuuhakkeen osuus olisi em. tilanteessa 61 % ja vihreän hakkuutähdehakkeen 7 % (Kuva 1 ja Taulukko 1).

Taulukko 1. Metsähakkeen nykykäyttö ja tuorehakekonseptin mukainen tarve Pohjois-Karjalan sekä Etelä- ja Pohjois-Savon lämpö- ja voimalaitoksilla metsähakelajeittain.

	Nykytilanne, m ³	Tuorehakekonsepti, m ³
Kuivahtanut harvennuspuuhake	897500	318100
Tuore harvennuspuuhake	0	505800
Kuivahtanut hakkuutähdehake	595500	497400
Tuore hakkuutähdehake	0	39300
Yht.	1493000	1360600

TP 2:ssa tehdyssä tuorehakkeen käyttöpotentiaalikartoituksessa kävi ilmi, että jo nyt kaikilla suurilla laitoksilla on verrattain hyvät valmiudet käyttää kosteita polttoaineita, ja siten myös tuorehaketta (Leino ym. 2024). Toisaalta tuorehakkeen huomattava lisääminen voisi vääjäämättä myös johtaa siihen, että tuorehaketta kosteampien polttoainejakeiden osuutta lämpö- ja voimalaitosten polttoainepaletista pitäisi vähentää tai niiden kosteutta vastaavasti alentaa kuivaamalla, mikä voisi aiheuttaa merkittäviä alueellisia ongelmia mm. kuoren hyödyntämisessä energiantuotannossa.

Puun energiakäytöllä on pitkät perinteet ja vuosien kuluessa toimintamallit ja teknologiat ovat hioutuneet toimiviksi ja kustannustehokkaiksi soveltuen hyvin maakunnallisiin tarpeisiin ja tarjolla oleviin polttoainejakeisiin Suomessa. Huoltovarmuuden kannalta on selvä etu, että

paikalliset lämpö- ja voimalaitokset voivat hyödyntää erityyppisiä polttoainejakeita hyvällä hyötysuhteella ja pienin päästoin. Kaatotuoreen puun ja sen hyödyntämiseen soveltuvan energiateknologian ehdoton hyöty on, että puu on nopeasti siirrettävissä kannolta kattilaan olemattomin varastotappioin. Nopeutetun varastokierroin rinnalla on kuitenkin hyvä muistaa, että puupolttoaineiden varastohävikkiä voidaan tehokkaasti estää myös kuivattamalla hakkeen raaka-aine ennen varastointia. Tällöin polttoainetta kuluu kokonaisuudessaan vähemmän, kun kuivan hakkeen energiasisältö on korkeampi (MJ/kg) ja varastoinnin aiheuttamat kuiva-ainetappiot (kg/m^3) kohtuulliset (Leino ym. 2024).

Paikallisen energiantuotannon toimintamallit, polttoaineiden saatavuus ja kustannukset lopulta ratkaisevat, mikä on kaikkein taloudellisin tapa toimia kullakin metsähaketta tai muita puupolttoaineita käyttävällä lämpö- tai voimalaitoksella (Leino ym. 2024). Operaatio- ja investointipäätöksiin vaikuttavat paljon myös energiamarkkinan murros, jossa toimintaympäristöä muokkaavat valtiovallan ja EU:n päätökset. TP2:ssa tehdyn selvityksen yhteydessä tuli ilmi suurten energialaitosten aiesuunnitelmia hankkia mm. sähkökattiloita, lämpövarastoja ja lämpöpumppuja korvaamaan ja täydentämään polttoon perustuvaa energiantuotannon teknologiaa (Leino ym. 2024).

2. Metsähakkeen kustannusrakenne

Metsähakkeen hankinnan näkökulmasta raaka-aineen nopeutettu kierto pienentää varastoihin sitoutuneen pääoman kustannuksia ja kuiva-ainetappioita mutta nostaa autokuljetuksen kustannuksia, kun hake- tai puutavara-autoja ei voi kuormata täysin täyteen perinteistä toimintamallia korkeamman polttihakkeen tai rangan kuutiopainon takia (Kuvat 2 ja 3). Toisaalta laitostason hankintakustannustarkasteluissa hukkalämmön talteenottoa hyödyntävät teknologiat yhdessä tuorehakkeen käytön ja kuiva-ainetappioiden minimoinnin kanssa lyhentävät hankinta-alueen sädettä ja pienentävät hankintakustannuksia metsähakkeella tuotettua energiamäärää kohden (MWh/m^3).

Kuvassa 2 on esitetty tuoreen ja perinteisen hakkuutähde-, kokopuu- ja rankahakkeen suhteellinen kustannusrakenne työvaiheittain Joensuussa sijaitsevalle käyttöpaikalle, jonka

hankinta-alueen säde on 100 km tieverkkoa pitkin. Toimintamallien vertailulaskelmissa kokopuun ja hakkuutähteiden toimitusketju perustui tienvarsihaketukseen ja hakkeen autokuljetukseen. Rangalla haketus tehtiin käyttöpaikan polttoainekentällä, jonne rangat oli kuljetettu puutavara-autolla. Toimitusketjujen tuottavuus- ja kustannusparametrit koottiin aiemmista aihepiirin tutkimuksista (Laitila ym. 2016a, Laitila ym. 2016b, Laitila ym. 2017, Laitila & Väättäinen 2022) ja päivitettiin tuntikustannustietojen osalta ajan tasalle Metsäalan auto- ja konekustannusindeksin avulla (Tilastokeskus 2024). Vertailussa työvaiheittaiset kustannukset määritettiin kiintokuutiometriä ($\text{€}/\text{m}^3$) kohden ja esitettiin suhteellisina (Kuva 2) ja absoluuttisina lukuarvoina (Kuva 3).

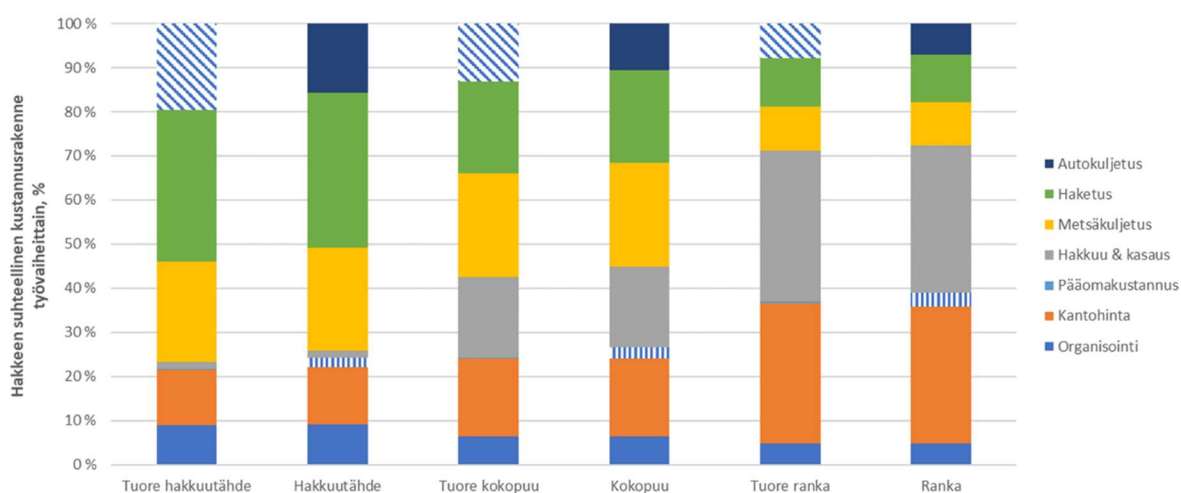
Metsähakkeen hankinnan organisointikustannusten ($3,44 \text{ €}/\text{m}^3$) oletettiin vastaavan kotimaisen raakapuun hankinnan yleiskustannustasoa (Strandström 2023). Kantohinnat määritettiin Luken tilastotietokannan (Energiapuun hinta...2024) avulla. Hakkuutähteellä kantohinta oli $4,25 \text{ €}/\text{m}^3$, kokopuulla $8,32 \text{ €}/\text{m}^3$ ja rangalla $19,39 \text{ €}/\text{m}^3$ (Kuva 3). Varastoihin sitoutuneen pääoman kustannukset laskettiin 5 %:n korkokannan mukaan. Varastoihin sitoutuneeseen pääomaan laskettiin kantohinnan ohella organisoinnin, hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannukset. Kokopuulla ja rangalla varastointiaika oli 9 kuukautta ja hakkuutähteillä 11 kuukautta. Tuorehakkeella haketoimituksen ja hakkeen käytön oletettiin tapahtuvan viimeistään kuukauden (1 kk) sisällä puiden kaatohetkestä.

Hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannukset määritettiin korjuuolosuhdetietojen (Taulukko 2) mukaan tuottavuus- ja kustannusmallien avulla (Laitila ym. 2016a, Laitila ym. 2017, Laitila & Väättäinen 2022). Korjuuolosuhteiden määrittämisessä käytettiin VMI:n koealatietoja ja toteutuneiden päätehakkuiden leimikkotietoja, jotka olivat koostettu em. käyttötarkoitusta varten aiemmissa tutkimushankkeissa (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004, Heikkilä ym. 2005). Laskennassa huomioituja korjuun olosuhdetekijöitä olivat mm. hakkuukertymä (m^3/ha) ja hakkuupoistuman järeys (m^3) sekä metsäkuljetusmatka (m). Päätehakuilla hakkuutähteiden kasaus oli liitetty hakkuun työtapaa muuttamalla osaksi ainespuuhakkuuta (Laitila ym. 2016a). Nuorista harvennusmetsistä korjattava kokopuu ja ranka hakattiin puolestaan joukkokäsittelymenetelmällä (Laitila ym. 2017, Laitila & Väättäinen 2022). Hakkuutähteiden ja harvennuspuun metsäkuljetus palstalta tievarteen tehtiin kuormatraktorilla. Hakkuutähteiden metsäkuljetuksessa kuormakoko oli $7,8 \text{ m}^3$, kokopuulla $7,1 \text{ m}^3$ ja rangalla $10,7 \text{ m}^3$ (Laitila ym. 2016a, Laitila ym. 2017, Laitila & Väättäinen 2022).

Taulukko 2. Hakkuutähteiden, kokopuun ja rangan korjuuolosuhteet.

	Metsäkuljetusmatka KA, m	Hakkuukertymä KA, m ³ /ha	Hakkuupoistuman järeys KA, dm ³	Hakkuupoistuman tiheys KA, kpl/ha
Hakkuutähde	171	76	-	-
Kokopuu	169	53	34	2262
Ranka	169	44	25	2256

Hakkuutähteiden ja kokopuiden tienvarsihaketuksen kustannus oli 11,57 €/m³ ja 9,83 €/m³ kuorma-autoalustaisella rumpuhakkurilla (Laitila ym. 2016a, Laitila ym. 2017, Prinz ym. 2019). Rangan haketuskustannus käyttöpaikan polttoainekentällä oli puolestaan 6,76 €/m³ em. tyyppisellä hakkurilla (Laitila ym. 2017). Autokuljetuksen hyötykuorma määritettiin rangan/hakkeen kuutiopainon perusteella, johon vaikutti työmaan puulajisuhteet, puun kuivatuoretiheys, toimituskosteus ja kuiva-ainetappioiden suuruus (Hakkila 1978, Laitila ym. 2016b, Laitila ym. 2017, Nurmi 2000, Routa ym. 2015).



Kuva 2. Tuoreen ja kuivahtaneen hakkeen suhteellinen kustannusrakenne (%) työvaiheittain, kun kaukokuljetusmatka on 67 km. Tuorehakkeen autokuljetus- ja pääomakustannukset ovat kuvioitu viivoituksella.

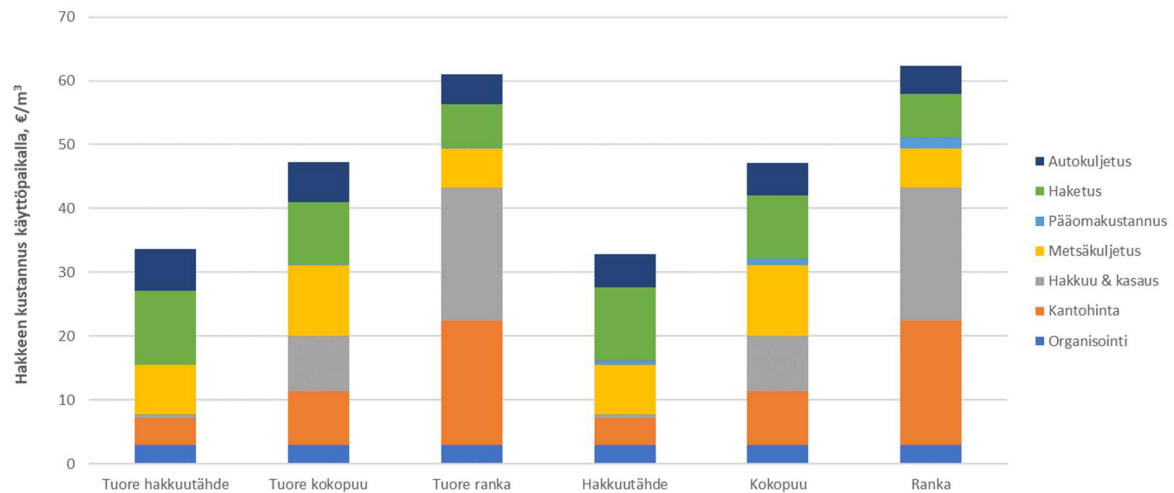
Kuvan 2 ja 3 vertailussa tuoreen puun kosteus oli 53 %. Varastoidun hakkuutähteen kosteus oli 45 % ja kuiva-ainetappioiden suuruus 19,9 % puun kuivatuoretiheydestä (kg/m³). Varastoidun rangan ja kokopuun kosteus oli puolestaan 40 % ja kuiva-ainetappiot 6,6 % puun kuivatuoretiheydestä (kg/m³). Tienvarsivarastolta ranka kuljetettiin käyttöpaikalle 76 tonnin

puutavara-autolla, jonka enimmäiskuormakoko oli 52 tonnia ja 63,8 m³ (Laitila ym. 2017). Kuivahtaneella rangalla kuorman täyttöaste oli 100 % ja tuoreella 93 %. Hakkuutähde- ja kokopuuhake kuljetettiin tienvarsivarastolta käyttöpaikalle puolestaan 69 tonnin hakeautolla, jonka enimmäiskuormakoko oli 42 tonnia ja 63,0 m³ (Laitila ym. 2016b). Kuivahtaneella hakkuutähteellä ja kokopuulla hakeautokuorman täyttöasteet olivat 100 % ja 98 %. Tuoreella hakkeella vastaavat täyttöasteet olivat hakkeen korkeamman painon takia 74 % ja 76 %.

Tulosten mukaan perinteisen ja tuorehakekonseptin mukaisten toimintamallien erot syntyvät pääoma- ja autokuljetuskustannuksissa, kun työvaiheittaiset yksikkökustannukset määritetään kiintokuutiometriä kohden (€/m³). Jos yksikkökustannukset määritettäisiin energiasisällön mukaan (€/MWh) olisi toimintamallien välistä kustannuseroa kaikissa työvaiheissa, koska kosteuden ja kuivatuoretiheyden vaikutus puukiintokuutiometrin lämpöarvoon (Taulukot 8, 9 ja 10) ja sitä kautta hankintakustannuksiin (Kuvat 20, 21, 22 ja 23) on merkittävä.

Kuvien 2 ja 3 vertailusta puuttui peittämiskustannus, mitä työvaihetta ei välttämättä tarvita, jos puu toimitetaan kaatotuoreena käyttöpaikalle. Lisäksi haketuskustannuksien oletettiin olevan samat, vaikka joissain tutkimuksissa on havaittu tuottavuuden olevan tuoreella puulla paremman kuin kuivahtaneella puulla (Asikainen ym. 2001). Palstalla kuivatus voi lisäksi aiheuttaa materiaalihävikkiä (m³/ha) ja alentaa metsäkuljetuksen tuottavuutta, kun kuorman täyteen keräämiseen tarvitaan suurempi pinta-ala (Asikainen ym. 2001). Käytännössä em. seikan merkitys ja vaikutus on kuitenkin lähinnä teoreettinen metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuuteen. Jos energiapuukasaa ei ole peitetty, päällä oleva lumi ja jää joutuvat helpommin hakkeen sekaan talvihaketuksessa ja kastelevat tuotettua puupolttoainetta, mikä heikentää hakkeen lämpöarvoa ja käytettävyyttä energiantuotannossa.

Pääomakustannusten osuus perinteisellä toimintamallilla oli 2–3 % suhteellisista hankintakustannuksista, kun tuorehakekonseptin mukaisella toimintatavalla pääomakustannusten osuus oli 0,19–0,34 % (Kuva 2). Vastaavasti autokuljetuskustannusten osuus oli perinteisellä toimintamallilla 7–16 % hankintakustannuksista, kun tuoreella puulla autokuljetuskustannusten osuus nousi 8–20 %:iin. Kuvan 2 ja 3 vertailussa autokuljetuksen keskiläpikuljetusmatka oli 67 km, kun koko hankinta-alueen säde oli 100 km tieverkkoa pitkin Joensuun ympäristössä (Asikainen ym. 2001).



Kuva 3. Tuoreen ja kuivahtaneen hakkeen keskimääräinen kustannusrakenne (€/m³) työvaiheittain Joensuun ympäristössä, kun keskikaukokuljetusmatka on 67 km.

Absoluuttisina lukuina ilmaisten tuorehakekonsepti leikkasi varastoinnin aiheuttamia pääomakustannuksia 0,6–1,6 €/m³ hakkuutähteiden, kokopuun ja rangan toimitusketjussa mutta vastaavasti lisäsi autokuljetuskustannuksia 1,4–0,3 €/m³ (Kuva 3). Rankahakkeen tuotantoketjussa tuorehakekonseptin edut olivat suurimmat, koska tuoreen rangen suurempi paino ei juuri pienennä 76 tonnin puutavara-auton hyötykuormaa. Rangalla kantohinta on lisäksi korkeampi, kuin hakkuutähteellä ja kokopuulla, minkä vuoksi nopeutetun varastokierron kustannushyödyt ovat pääomakustannusten osalta em. jakeita selvästi suuremmat. Hakkuutähteillä ja kokopuulla tuoreen hakkeen kustannus käyttöpaikalla oli 0,80 ja 0,18 €/m³ korkeampi kuin kuivahtaneella hakkeella, kun taas tuoreella rangalla hakkeen kustannus käyttöpaikalla oli 1,30 €/m³ alempi (Kuva 3).

3. Kuormien täyttöaste autokuljetuksessa

Autokuljetuksen hyötykuorma ja kuormien täyttöaste kuormatilan kehystilavuutta kohden määritettiin rangen kiintokuutiopainon (kg/m³) ja hakkeen irtokuutiopainon (kg/i-m³) perusteella, johon puulajisuhteiden ohella vaikutti puun kuivatuoretiheys (Hakkila 1978, Nurmi 2000), toimituskosteus ja kuiva-ainetappioiden suuruus (Routa ym. 2018). Hakkuutähdehakkeen puulajisuhteet perustuivat kuusivaltaisten päätehakkuiden leimikkotietoihin yhden vuoden ajalta (Asikainen ym. 2001). Rangan ja kokopuuhakkeen

puulajisuhteet nuorista kasvatusmetsistä Joensuun ympäristössä laskettiin puolestaan VMI:n koealatietojen pohjalta (Laitila ym. 2004, Heikkilä ym. 2005).

Harvennuksilta korjattava kokopuun ja rangan kuiva-ainetappioiden suuruudeksi arvioitiin 2,2 %, 6,6 % tai 10,7 %, ja toimituskosteudeksi 35 %, 40 % tai 45 %, kun varastointiajaksi oletettiin 9 kuukautta. Vastaavasti hakkuutähteellä kuiva-ainetappioiden suuruudeksi arvioitiin 10,5 %, 19,9 % tai 28,5 %, ja toimituskosteudeksi 40 %, 45 % tai 50 %, kun varastointiajaksi oletettiin 11 kuukautta. Ranka kuljetettiin tienvarsivarastolta käyttöpaikalle 76 tonnin puutavara-autolla, jonka enimmäiskuormakoko oli 52 tonnia ja 63,8 m³ (Laitila ym. 2017). Hakkuutähde- ja kokopuuhake kuljetettiin puolestaan 69 tonnin hakeautolla, jonka enimmäiskuormakoko oli 42 tonnia ja 63,0 m³, kun hakkeen tiiviyydeksi oletettiin 40 % (Laitila ym. 2016b).

Ranka- ja hakekuormien täyttöasteet (%) koottiin taulukoihin 3, 4 ja 5 kuiva-ainetappioiden ja toimituskosteuden mukaan. Kuormien täyttöasteen ohella määritettiin puun kuivatuoretiheydet (kg/m³) ja kuormakoko kuivamassana (kg). Kuvissa 4, 6 ja 8. verrattiin rangan ja hakkeen painon vaikutusta puutavara- ja hakeauton täyttöasteeseen. Vastaavasti kuvissa 5, 7 ja 9 verrattiin autokuljetuksen suhteellista kuormakokoa kuivamassan perusteella. Rangalla ja kokopuulla suhteellinen kuormakoko (Kuva 5 ja 7) kuivamassan perusteella oli 100 %, kun toimituskosteus oli 35 % ja kuiva-ainetappioiden suuruus 9 kuukauden varastointiajalla oli yhteensä 2,2 % (0,25 % per kk). Hakkuutähdehakkeella suhteellinen kuormakoko kuivamassana oli 100 %, kun kuiva-ainetappiot olivat 1,0 % per kk ja hakkuutähdehakkeen kosteus oli 40 % (Kuva 9).

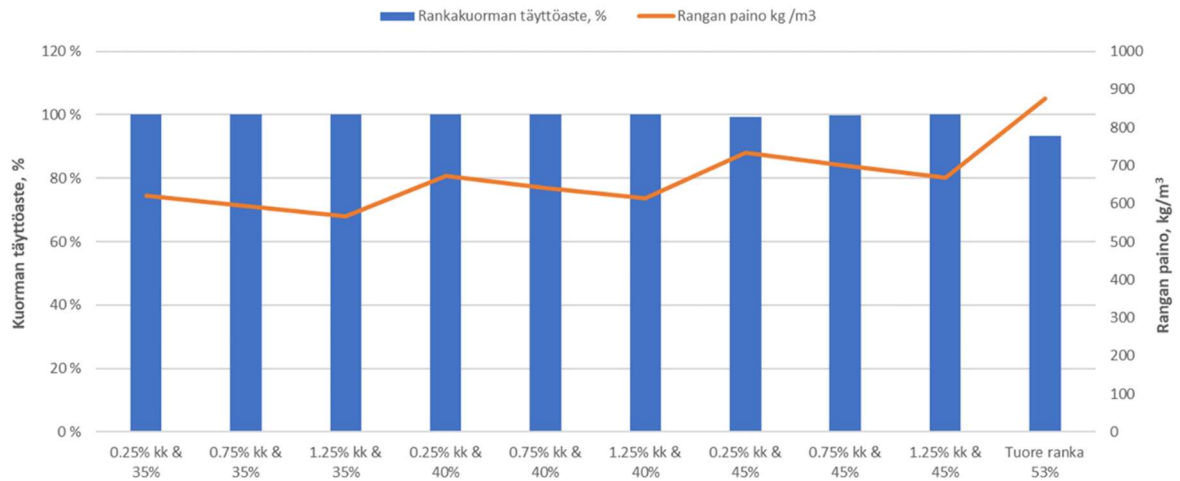
3.1. Ranka

Ranka kuljetettiin sekakuormina ja hankinta-alueen puulajisuhteiden perusteella autokuorman tilavuudesta mäntyä oli 40 %, kuusta 20 %, koivua 27 % ja muuta lehtipuuta 14 % (Heikkilä ym. 2005). Rankakuormien täyttöaste oli pääsääntöisesti 100 %, eli puuta pystyttiin ajamaan täysillä kuormilla (Taulukko 3 ja Kuva 4). Tuoreella puulla täyttöaste jäi 93 %:iin, mikä johtuu tuoreen puun korkeamman painon ohella siitä, että puutavarakuormain on mukana puutavara-autossa koko kuljetuksen ajan, mikä pienentää hyötykuormaa mutta on välttämätön rangan kuormaus-

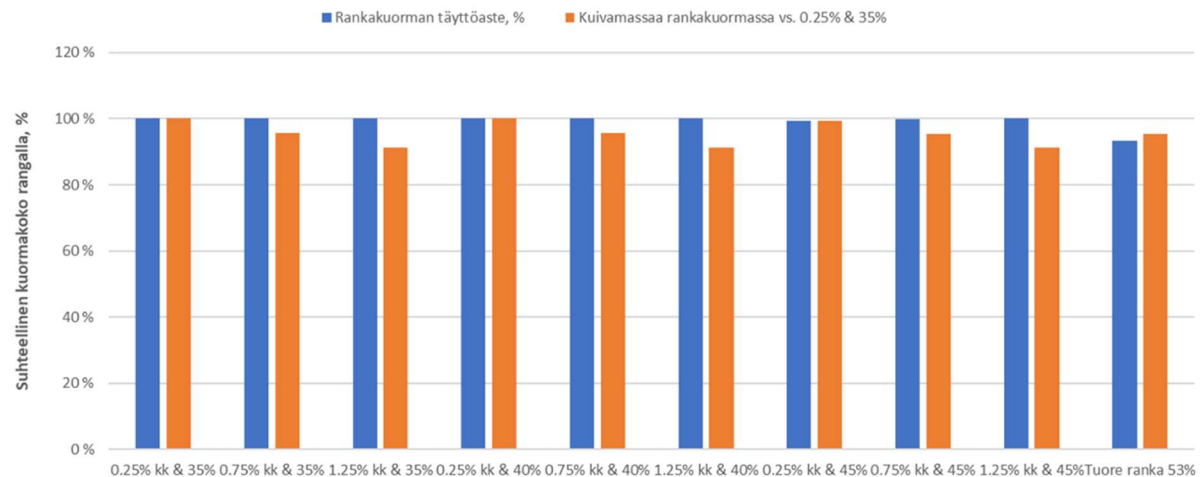
ja purkulogistiikan takia sekä tuoreella että kuivahtaneella puulla. Kuivamassan (24 538 kg) perusteella tuoreen rangan hyötykuorma oli samaa suuruusluokkaa kuin rangalla, jonka puuaineen kuiva-ainetappiot 9 kuukauden varastointiajalla olivat 0.75 % per kuukausi (Taulukko 3 ja Kuva 5) ja kosteus oli 35–45 %.

Taulukko 3. Sekarankakuorman täyttöaste (%) ja kuivamassa (kg) autokuljetuksessa sekä rangan paino toimituskosteudessa ja kuivana (kg/m³), kun kuiva-ainetappio per kuukausi on 0,25–1,25 % kuiva-ainetta ja toimituskosteus on 35–45 %. Tuoreen rankapuun kosteus 53 %.

	Rankakuorman täyttöaste	Rangan paino kg/m ³	Kuormakoko, kg kuivamassaa	Rangan kuivamassa, kg/m ³
0.25% kk &				
35%	100 %	620,0	25712	403,0
0.75% kk &				
35%	100 %	592,6	24575	385,2
1.25% kk &				
35%	100 %	566,3	23483	368,1
0.25% kk &				
40%	100 %	671,7	25712	403,0
0.75% kk &				
40%	100 %	642,0	24575	385,2
1.25% kk &				
40%	100 %	613,5	23483	368,1
0.25% kk &				
45%	99 %	732,7	25549	403,0
0.75% kk &				
45%	100 %	700,3	24540	385,2
1.25% kk &				
45%	100 %	669,2	23483	368,1
Tuorepuu				
53%	93 %	877,0	24538	412,2



Kuva 4. Kuiva-ainetappioiden ja kosteuden vaikutus rangin painoon (kg/m^3) ja puutavara-auton kuorman täyttöasteeseen (%).



Kuva 5. Rangan suhteellinen kuormakoko täyttöasteen ja kuivamassan perusteella. Kuormakoko kuivamassana on 100 %, kun kuiva-ainetappiot ovat 0,25 % per kk ja rangin kosteus on 35 %.

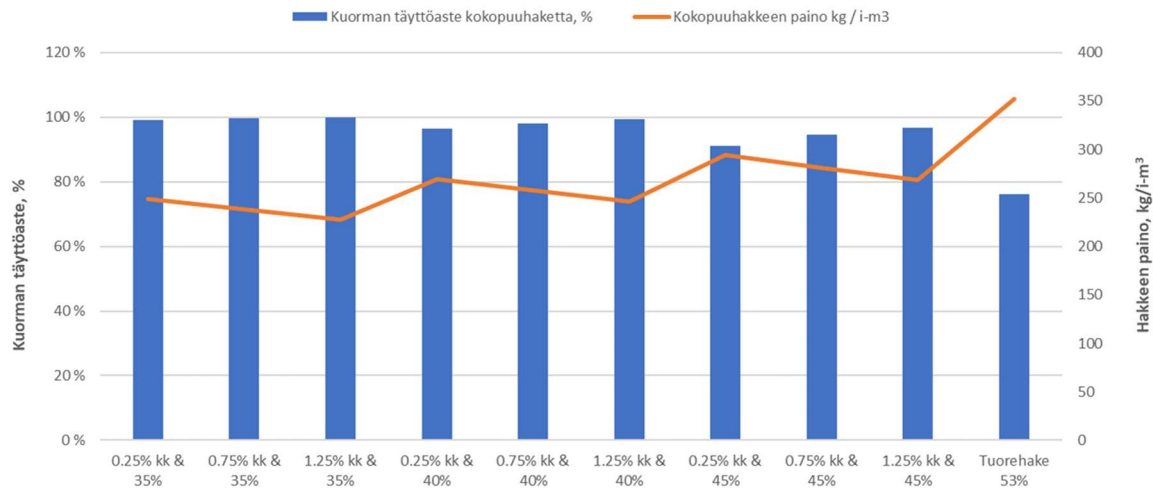
3.2. Kokopuuhake

Hankinta-alueen puulajisuhteiden perusteella männyn osuus kokopuuhakkeen tilavuudesta oli 24 %, kuusen 26 %, koivun 31 % ja muun lehtipuun 19 % (Laitila ym. 2005). Kokopuuhakkeella hakekuorman täysi (100 %) tai likimain täysi (99 %) täyttöaste oli mahdollista saavuttaa, kun hakkeen kosteus oli 35 % (Kuva 6). Kosteammalla 40 % hakkeella 99 % täyttöasteen saavuttaminen edellytti, että kuiva-ainetappiot (1,25 % per kuukausi) olivat keventäneet

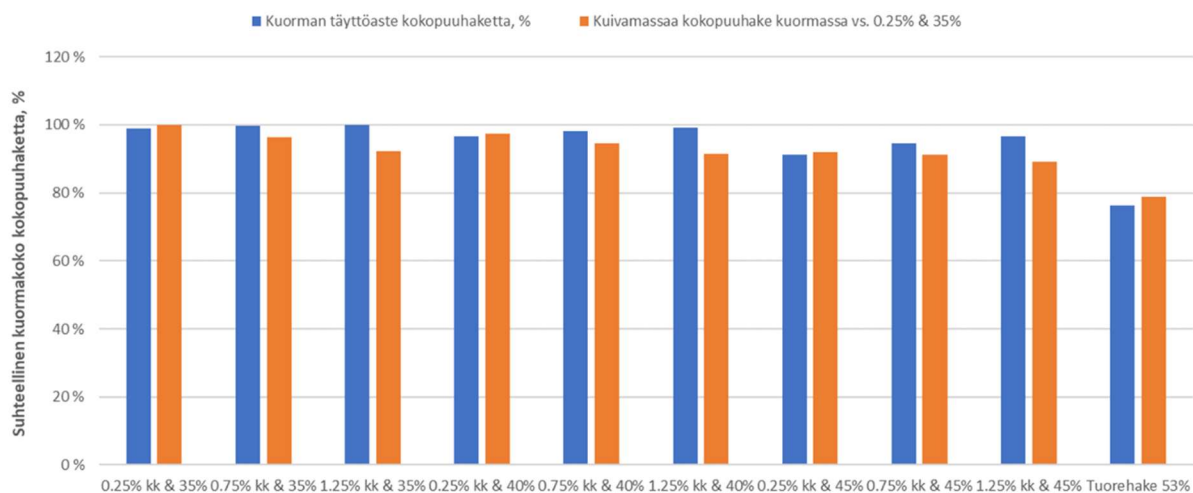
hakkeen kuutiopainoksi 246.4 kg/i-m³ (Taulukko 4). Tuoreella kokopuulla hakekuorman täyttöaste hakkeena oli keskimäärin 76 %, mikä vastaa 19873 kg kuormakokoa kuivamassana (Taulukko 4). Suurin kuormakoko kuivamassana (25 226 kg) saatiin kokopuuhakkeella, jonka kosteus oli 35 % ja kuiva-ainetappiot 0,25 % per kk. Em. kuormakokoon suhteutettuna tuoreen kokopuuhakkeen suhteellinen kuormakoko oli 79 % (Kuva 7). Kuivahtaneeseen kokopuuhakkeeseen verrattuna tuorehakkeen kuivamassana ilmaistu hyötykuorma jäi keskimäärin 2612–5352 kg pienemmäksi (Taulukko 4).

Taulukko 4. Sekakokopuuhake kuorman täyttöaste (%) ja kuivamassa (kg) autokuljetuksessa sekä kokopuuhakkeen paino toimituskosteudessa (kg/i-m³) ja kuivana (kg/m³), kun kuiva-ainetappiot per kuukausi ovat 0,25–1,25 % kuiva-ainetta ja kun toimituskosteus on 35–45 %. Tuorehakkeen kosteus 53 %.

	Hakekuorman täyttöaste	Kokopuuhakkeen paino kg/i-m ³	Kuormakoko, kg kuivamassaa	Kokopuun kuivamassa, kg/m ³
0.25% kk &				
35%	99 %	249,0	25226	404,7
0.75% kk &				
35%	100 %	238,0	24292	386,8
1.25% kk &				
35%	100 %	227,4	23270	369,6
0.25% kk &				
40%	96 %	269,8	24583	404,7
0.75% kk &				
40%	98 %	257,9	23878	386,8
1.25% kk &				
40%	99 %	246,4	23097	369,6
0.25% kk &				
45%	91 %	294,3	23227	404,7
0.75% kk &				
45%	94 %	281,3	23011	386,8
1.25% kk &				
45%	97 %	268,8	22485	369,6
Tuorehake				
53%	76 %	352,3	19873	413,9



Kuva 6. Kuiva-ainetappioiden ja kosteuden vaikutus kokopuuhakkeen irtokuutiometrin painoon (kg/i-m³) ja hakeauton kuorman täyttöasteeseen (%).



Kuva 7. Kokopuuhakkeen suhteellinen kuormakoko täyttöasteen ja kuivamassan perusteella. Kuormakoko kuivamassana on 100 %, kun kuiva-ainetappiot ovat 0,25 % per kk ja kokopuuhakkeen kosteus on 35 %.

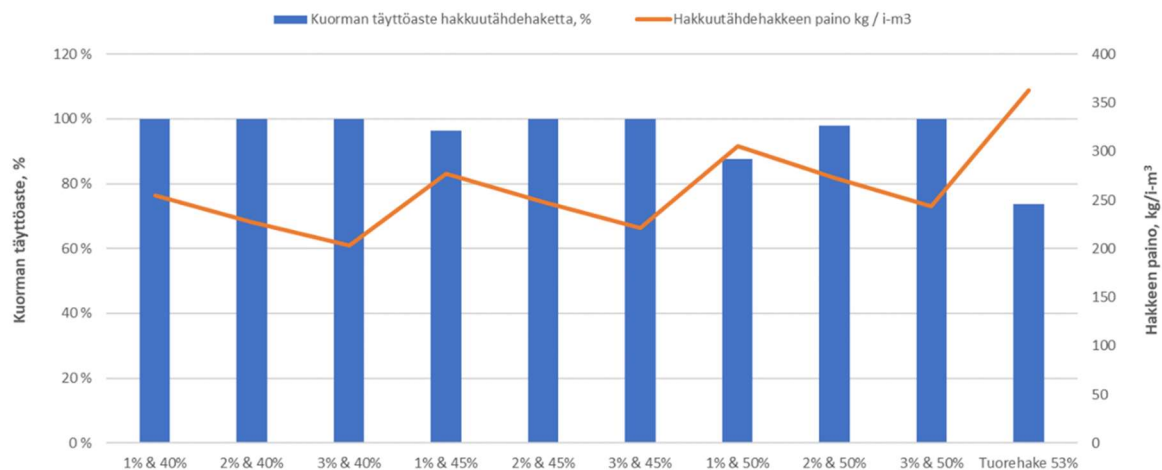
3.3. Hakkuutähdehake

Hakkuutähdehakkeen raaka-aineesta kuusen osuus oli 88 %, männyn 8 % ja koivun 4 %. Kuivahtaneella hakkuutähdehakeella hakekuormien täyttöasteet olivat pääsääntöisesti 100 % (Taulukko 5 ja Kuva 8). Kokopuuhakkeeseen verrattuna hakkuutähdehakeen puuaineen kuiva-ainetappiot (1–3 % per kk) olivat suuremmat, mikä selittää hakkuutähdehakkeen alemmaa kuutiopainoa (kg/i-m³), vaikka hakkuutähdehakkeen toimituskosteus (40–50 %) oli suurempi

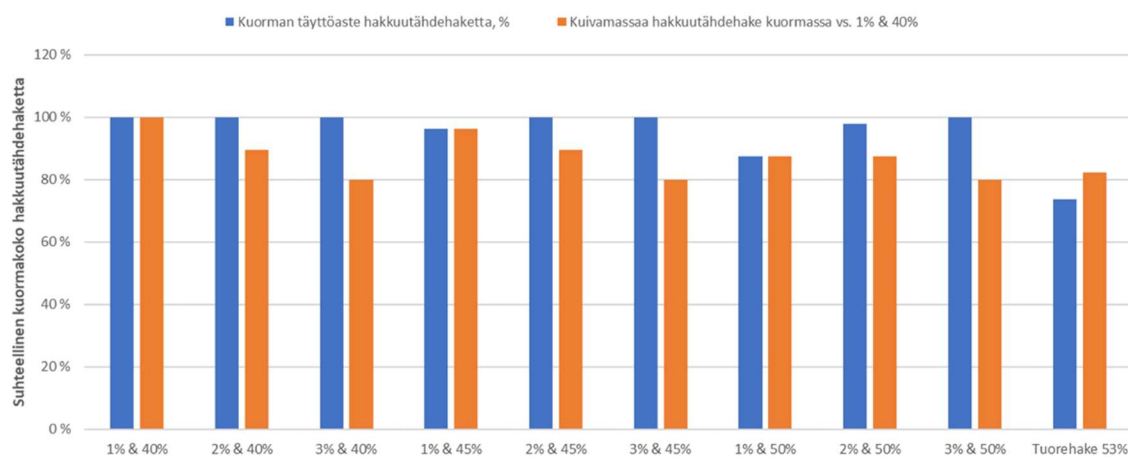
kuin kokopuuhakkeella (Taulukko 5). Tuoreella hakkuutähteellä hakekuorman täyttöaste hakkeena oli keskimäärin 74 %, mikä vastaa 19754 kg kuormakokoa kuivamassana (Taulukko 5). Kuivahtaneeseen hakkuutähdehakkeeseen verrattuna tuorehakkeen kuivamassana ilmaistu hyötykuorma jäi keskimäärin 1261–4263 kg pienemmäksi (Taulukko 5). Suurin kuormakoko kuivamassana (24 017 kg) saatiin hakkuutähdehakkeella, jonka kosteus oli 40 % ja kuiva-ainetappiot 1,0 % per kk. Em. kuormakokoon suhteutettuna tuoreen hakkuutähdehakkeen suhteellinen kuormakoko oli 82 % (Kuva 9). Pienin kuormakoko kuivamassana (19 187 kg) saatiin hakkuutähdehakkeella, jonka kuiva-ainetappiot olivat 3,0 % per kuukausi (Taulukko 5). Tuorehakkeeseen verrattuna em. hake-erän hyötykuorma oli kuivamassana 566 kg pienempi.

Taulukko 5. Hakkuutähdehake kuorman täyttöaste (%) ja kuivamassa (kg) autokuljetuksessa sekä hakkeen paino toimituskosteudessa (kg/i-m³) ja kuivana (kg/m³), kun kuiva-ainetappio per kuukausi on 1,0–3,0 % kuiva-ainetta ja toimituskosteus on 40–50 %. Tuorehakkeen kosteus 53 %.

	Hakekuorman täyttöaste	Hakkuutähdehakkeen paino kg/ i-m ³	Kuormakoko, kg kuivamassaa	Hakkuutähteen kuivamaassa, kg/m ³
1% kk &				
40%	100 %	254,3	24017	381,5
2% kk &				
40%	100 %	227,4	21479	341,2
3% kk &				
40%	100 %	203,2	19187	304,8
1% kk &				
45%	96 %	277,4	23116	381,5
2% kk &				
45%	100 %	248,1	21479	341,2
3% kk &				
45%	100 %	221,6	19187	304,8
1% kk &				
50%	88 %	305,2	21015	381,5
2% kk &				
50%	98 %	272,9	21015	341,2
3% kk &				
50%	100 %	243,8	19187	304,8
Tuorehake				
53%	74 %	362,6	19754	426,0



Kuva 8. Kuiva-ainetappioiden ja kosteuden vaikutus hakkuutähdehakkeen irtokuutiometrin painoon (kg/i-m³) ja hakeauton kuorman täyttöasteeseen (%).

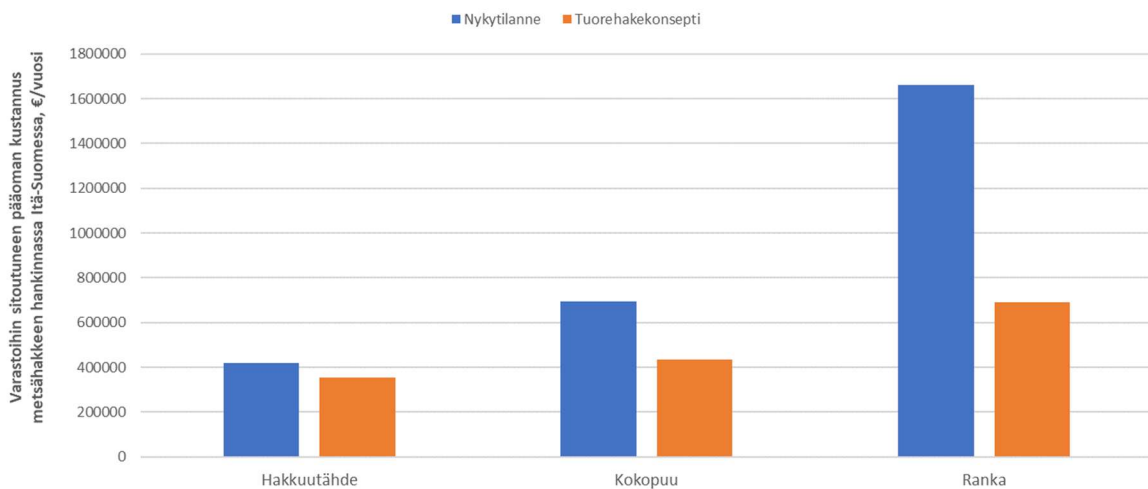


Kuva 9. Hakkuutähdehakkeen suhteellinen kuormakoko täyttöasteen ja kuivamassan perusteella. Kuormakoko kuivamassana on 100 %, kun kuiva-ainetappiot ovat 1,0 % per kk ja hakkuutähdehakkeen kosteus on 40 %.

4. Tuorehakekonseptin vaikutus resurssitarpeisiin

4.1. Varastoihin sitoutuneen pääoman tarve

Kuvassa 10 on esitetty varastoihin sitoutuneen pääoman vuotuinen kustannus nykyisellä kuivahtaneen hakkeen toimintamallilla tai kun osa hakkeesta voidaan käyttää tuoreena itäsuomalaisilla lämpö- ja voimalaitoksilla (tuorehakekonsepti). TP2:ssa (Leino ym. 2024) ei eritelty harvennuspuuhakkeen käyttömäärien jakautumista kokopuun ja rangan kesken, joten harvennuspuuhakkeen osalta tuloksissa esitetään lukuarvot sekä kokopuusta että rangasta tuotetulle harvennuspuuhakkeelle (Kuva 10). Tuoreen ja kuivahtaneen metsähakkeen tarve nykytilanteessa ja tuorehakekonseptilla perustuu TP2:ssa esitettyihin hakemääriin (Kuva 1 ja Taulukko 1). Pääomakustannus perustuu puolestaan Kuvassa 3 esitettyihin pääomakustannuksiin (€/m³) hakkuutähteelle, kokopuulle ja rangalle.

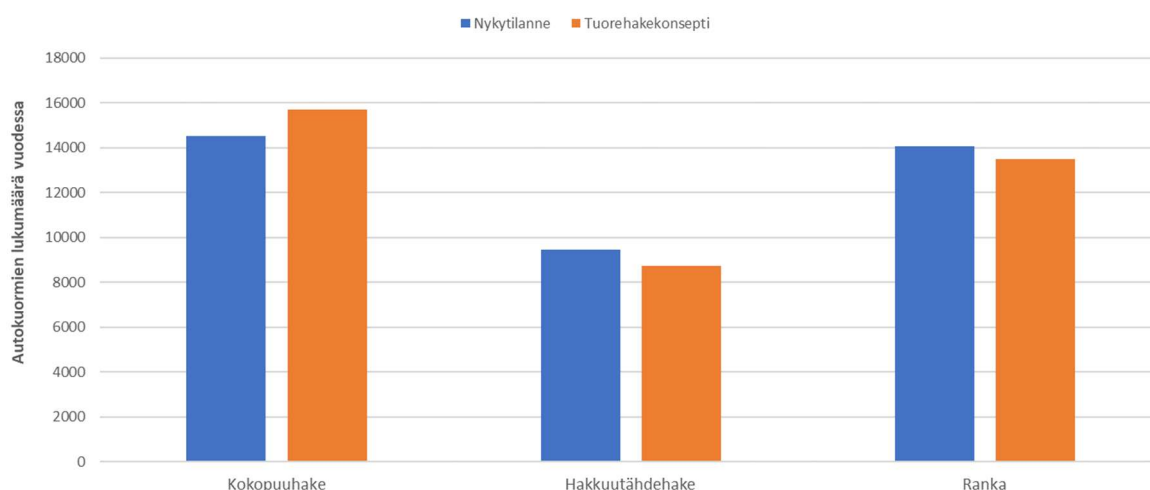


Kuva 10. Varastoihin sitoutuneen pääoman kustannus (€/vuosi) metsähakelajeittain nykyisellä kuivahtaneen hakkeen toimintamallilla tai kun osa hakkeesta voidaan käyttää tuoreena energiantuotannossa.

Tulosten mukaan tuorehakekonseptin mukaisilla metsähakkeen käyttömäärillä on mahdollista pienentää vuotuista pääomakustannusta 324 671–1 035 019 € verrattuna nykytilanteeseen sen mukaan, oletetaanko harvennuspuuhakkeen raaka-aineen olevan kokopuuta vai rankaa. Hakkuutähteellä vuotuinen pääomakustannusten säästöpotentiaali on 66 875 €, kokopuulla 257 795 € ja rangalla peräti 968 144 € (Kuva 10).

4.2. Kuljetussuoritteiden tarve kaukokuljetuksessa

Kuvassa 11 on esitetty autokuormien tarve hakkuutähde- ja harvennuspuuhakkeen kaukokuljetuksessa nykyisellä toimintamallilla sekä tuorehakekonseptin mukaisilla metsähakkeen käyttömäärillä ja sekä kuormien täyttöasteilla. Kuormien täyttöasteet vastaavat Kuvan 3 laskennoissa käytettyjä parametriarvoja ja kuljetuskalustoa. Rangan autokuljetukseen käytettiin 76 tonnin puutavara-autoa (Kuva 12) ja välivarastolla tuotettu hakkuutähde- ja kokopuuhake kuljetettiin käyttöpaikalle puolestaan 69 tonnin kääntyväaksellisella hakeautolla (Kuva 13). Kuivahtaneella rangalla ja hakkuutähdehakeella kuormien täyttöaste oli 100 % ja kokopuuhakeella vastaavasti 98 %. Tuoreella rangalla sekä hakkuutähde- ja kokopuuhakeella vastaavat täyttöasteet olivat 93 %, 74 % ja 76 %.



Kuva 11. Autokuormien tarve nykyisellä toimintamallilla sekä tuorehakekonseptin mukaisilla metsähakkeen käyttömäärillä ja sekä kuormien täyttöasteilla.

Tulosten mukaan tuorehakekonseptin mukaisilla metsähakkeen käyttömäärillä on mahdollista pienentää autokuljetusten tarvetta, jos energiantuotantoon käytettävä harvennuspuu korjataan ja kuljetetaan rankana. Nykytilaan verrattuna kuljetettavien autokuormien lukumäärä supistuu yhteensä 1296 autokuormalla, josta hakkuutähdehakekuormien osuus on 711 ja rankakuormien 585. Sen sijaan, jos tuore harvennuspuu hake tuotetaan välivarastolla ja kuljetetaan käyttöpaikalle hakeautolla, kasvaa metsähakekuormien yhteismäärä 438 autokuormalla, josta kokopuuhakkeen autokuormien lisäystä on 1149 autokuorman verran (Kuva 11).



Kuva 12. Rangan autokuljetukseen käytettiin 76 tonnin puutavara-autoa, jossa puutavarakuormain on mukana kuljetuksen ajan.



Kuva 13. Vertailuanalyyseissä hakkuutähde- ja kokopuuhaake kuljetettiin 69 tonnin kääntyväakselisella hakeautolla.

4.3. Korjuu- ja haketuskaluston tarve

Taulukossa 6 on esitetty arvio tuorehakekonseptiin siirtymisen vaikutuksesta korjuu- ja haketuskaluston tarpeeseen Itä-Suomessa, kun ranka- ja kokopuuhaketta tarvitaan vuosittain 73 600 m³ ja hakkuutähdehaketta 58 000 m³ vähemmän, kuin mitä nykykäyttö on Pohjois-Karjalan sekä Etelä- ja Pohjois-Savon maakunnissa (Kuva 1 ja Taulukko1). Korjuukoneiden vuosituotokset perustuvat 2500 käyttötunnin vuotuisen työaikaan kaksivuorotyössä kausivaihtelu huomioiden ja taulukossa 2 kuvailtuihin korjuuolosuhteisiin hakkuussa ja metsäkuljetuksessa.

Taulukko 6. Tuorehakekonseptiin siirtymisen vaikutus korjuu- ja haketuskaluston tarpeeseen verrattuna metsähakkeen nykykäyttöön Itä-Suomessa.

	Vuosituotos, m ³	Vapautuva konekapasiteetti, kpl
Hakkuutähteiden metsäkuljetus	28808	2,0
Harvennuspuun hakkuu	15667–33479	2,2–4,7
Harvennuspuun metsäkuljetus	20814–35664	2,1–3,5
Hakkuutähteiden välivarastohaketus	32593–97780	0,6–1,8
Kokopuiden välivarastohaketus	38073–114218	0,6–1,9
Rangan haketus polttoainekentällä	56977–170932	0,4–1,3

Harvennuspuun hakkuussa vuosituotokseen vaikuttaa hakkuupoistuman järeys (dm³), tiheys (kpl/ha) ja korjataanko harvennuspuu karsittuna vai karsimattomana. Em. seikat huomioiden tuorehakekonseptin käyttöönotolla olisi mahdollista vapauttaa hakkuukonekapasiteettia muuhun käyttötarkoitukseen 2–5 koneyksikön verran (Taulukko 6), mikä vastaa noin 4–10 hakkuukonekuljettajan vuotuista työsuoritetta. Metsäkuljetuksessa tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat hakkuukertymän ja metsäkuljetusmatkan ohella mm. kuljetettava materiaali sekä metsätraktorin kuormakoko. Em. seikat huomioiden tuorehakekonseptin käyttöönotolla olisi mahdollista vapauttaa hakkuutähteiden metsäkuljetuskapasiteettia muuhun käyttötarkoitukseen kahden kuormatraktorin verran ja harvennuspuun metsäkuljetuksessa

2,1–3,5 kuormatraktorin verran, mikä vastaa yhteensä noin 8–11 metsäkonekuljettajan vuotuista työsuoritetta. Korvaavaa työtä em. kone- ja kuljettajaresurssille on tarjolla kotimaan puunhankinnassa korvaamaan Venäjältä tuotuja ja edellä esitettyjä lukuarvioita selvästi suurempia aines- ja energiapuun määriä.

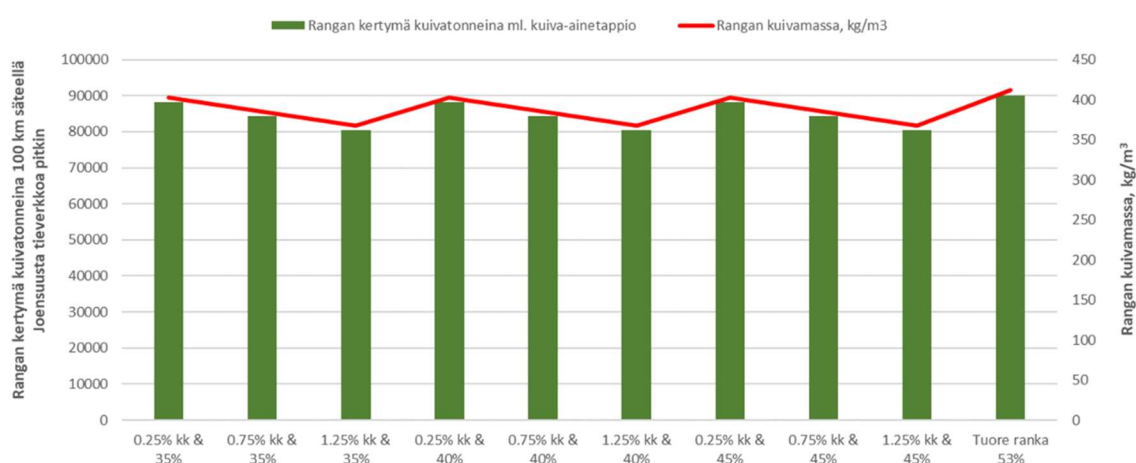
Hakkureille vuosituotokset hakkuutähteiden ja kokopuiden tienvarsihaketuksessa sekä rangan terminaalihaketuksessa käyttöpaikan polttoainekentällä arvioitiin 2500, 1250 ja 833 käyttötunnin mukaan. Vuosityömäärän mukaan hakkuutähteiden ja kokopuiden tienvarsihaketus ketjusta olisi molemmista mahdollista vapauttaa haketuskapasiteettia muuhun käyttötarkoitukseen 0,6–1,8 autoalustaisen rumpuhakkurin verran. Vastaavasti rangan haketuksesta voisi vähentää haketuskapasiteettia 0,4–1,3 autoalustaisen rumpuhakkurin verran (Taulukko 6), mikä vastaa yhteensä noin 2–6 kuljettajan työpanosta.

5. Metsähakkeen kertymä ja energiasisältö

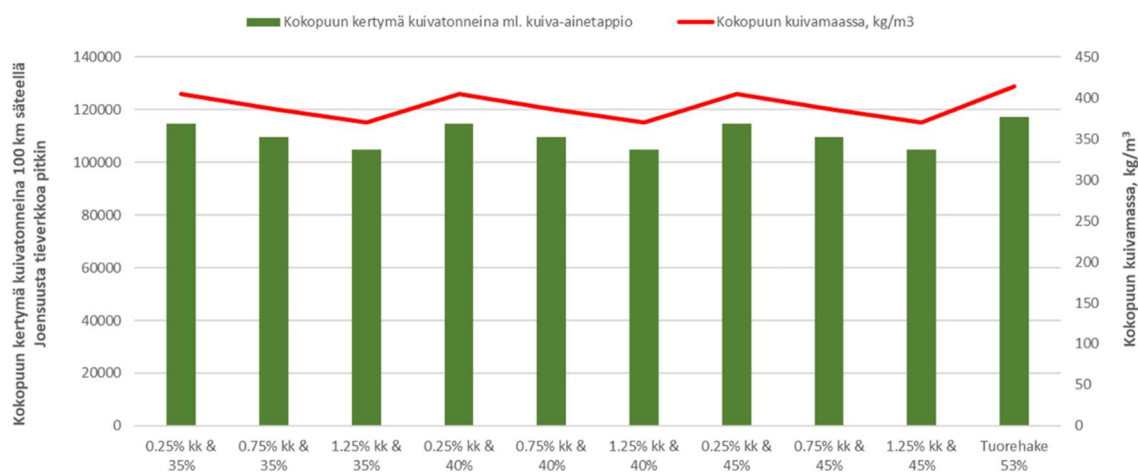
5.1. Kuiva-ainetappioiden vaikutus kertymään

Kuvissa 14, 15 ja 16 on esitetty rangan, kokopuun ja hakkuutähteiden kuiva-ainetappioiden vaikutus kertymään 100 km säteellä Joensuusta tieverkkoa pitkin sekä puuaineen kuivatuoretiheyteen (kg/m^3), kun varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus rangalla ja kokopuulla oli 0,25–1,25 % per kk (koko varastointiajalla yht. 2,2–10,7 %) ja hakkuutähteillä 1–3 % per kk (koko varastointiajalla yht. 10,5–28,5 %). Laskennassa käytetty leimikkoaineisto (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004, Heikkilä ym. 2005) ja laskentaperusteet olivat samat, joita käytettiin metsähakkeen kustannusrakenteen (Kuvat 2 ja 3) ja autokuljetuksen kuormien täyttöasteen määrittämisessä (Taulukko 3, 4 ja 5). Kiintokuutiometreinä rangan, kokopuun ja hakkuutähteiden korjuupotentiaali em. Joensuun hankinta-alueella oli 218 623 m^3 , 283 194 m^3 ja 348 870 m^3 vuodessa (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004, Heikkilä ym. 2005).

Rangalla kuiva-ainetappiot leikkasivat kuivamassakertymää kaatotuoreeseen puuhun verrattuna 2000–10000 kuivatonnilla ja vastaavasti alensivat rangan kuivatuoretiheyttä (kg/m^3) 9–44 kilogrammalla kuivamassaa per m^3 (Kuva 14). Kiintokuutiometreiksi muutettuna em. kuiva-ainetappiot vastasivat 4872–23411 m^3 kaatotuoretta rankaa vuodessa. Kokopuulla kuiva-ainetappioiden suuruus oli 2600–12500 kuivatonnia ja sitä vastaava puuaineen kuivatuoretiheyden alenema 9–44 kg/m^3 (Kuva 15). Kiintokuutiometreiksi muutettuna em. kuiva-ainetappiot vastasivat 6306–30304 m^3 kaatotuoretta kokopuuta vuodessa.



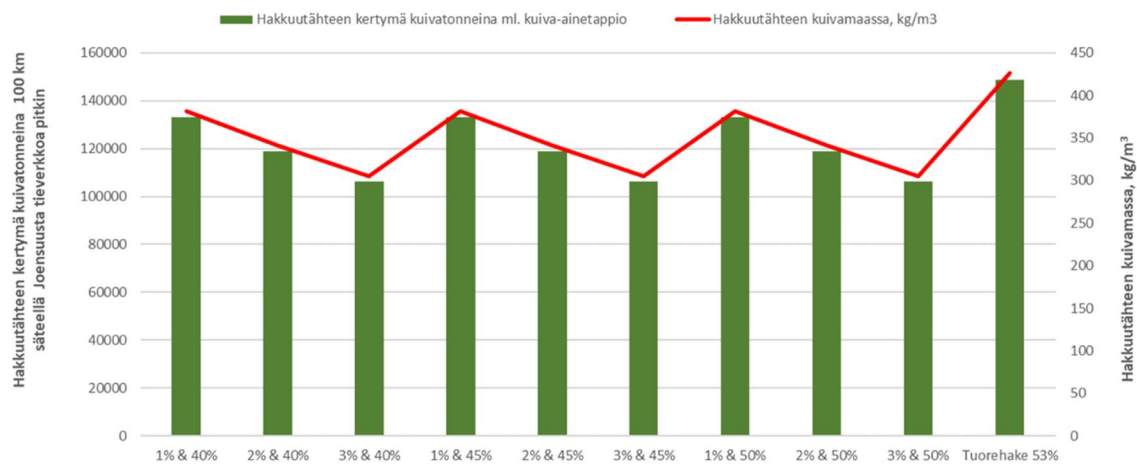
Kuva 14. Rangan kertymä kuivatonneina 100 km säteellä tieverkkoa pitkin Joensuusta, kun varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus on kuivahtaneella rangalla 0,25–1,25 % per kk.



Kuva 15. Kokopuun kertymä kuivatonneina 100 km säteellä tieverkkoa pitkin Joensuusta, kun varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus on kuivahtaneella kokopuulla 0,25–1,25 % per kk.

Hakkuutähteillä kuiva-ainetappioiden suuruus oli 15500–42300 kuivatonnia ja sitä vastaava puuaineen kuivatuoretiheyden alenema 45–121 kg/m^3 verrattuna tuoreeseen

hakkuutähteeseen (Kuva 16). Kiintokuutiometreiksi muutettuna em. kuiva-ainetappiot vastasivat 36518–99334 m³ kaatotuoretta hakkuutähdettä vuodessa.



Kuva 16. Hakkuutähteen kertymä kuivatonneina 100 km säteellä tieverkkoa pitkin Joensuusta, kun varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus on kuivahtaneella hakkuutähteellä 1,0–3,0 % per kk.

5.2. Metsähakkeen energiasisältö

Vertailulaskelmissa kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutus hakkeen energiasisältöön (MWh/m³) ja hankintakustannuksiin (€/MWh) eri toimintamalleilla laskettiin ylemmän (HHV) ja alemman (LHV) lämpöarvon mukaan. Ylemmän, eli kalorimetrinen lämpöarvon mukaan laskettu hakkeen energiasisältö toimituskosteudessa kuvaa toimintamallia, jossa hakkeen käyttöpaikka on varustettu kondensoivalla savukaasujen pesu- ja lämmöntalteenottojärjestelmällä ja kattila on lähtökohtaisesti soveltuva kosteiden polttoaineiden tehokkaaseen ja häiriöttömään käyttöön (Leino ym. 2024). Alemman, eli tehollisen lämpöarvo mukaan laskettu hakkeen energiasisältö toimituskosteudessa huomioi puolestaan veden haihtumiseen kuluva energiahävikin ja vastaa tilannetta, jossa hakkeen käyttöpaikkaa ei ole varustettu em. kondensoivalla savukaasujen hukkalämmön talteenottojärjestelmällä (Leino ym. 2024).

Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan tavallisesti kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona (MJ/kg) puu- ja metsähakelajeittain (Hakkila 1978, Nurmi 2000), minkä vuoksi kuiva-aineen

kalorimetrinen eli ylempi (HHV) lämpöarvo (Taulukko 7) määritettiin laskennallisesti kuiva-aineen tehollisen, eli alemman (LHV) lämpöarvon kaavaa soveltaen (Alakangas 2000, ks. kaava 2.4). Kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo on tehollista lämpöarvoa suurempi, koska polttoaineessa olevan vedyn palamisessa muodostuvan veden höyrystymiseen tarvittava energian ei oleteta vähentävän kuiva-aineen lämpöarvoa (Alakangas 2000). Tehollisessa lämpöarvossa em. veden höyrystymiseen tarvittava energia sitä vastoin laskee lämpöarvoa, eli tehollinen lämpöarvo on näin ollen vedyn palamisessa muodostuvan veden höyrystymiseen tarvittavan energiamäärän verran kalorimetrista lämpöarvoa alempi. Kuiva-aineen kalorimetrinen ja tehollinen lämpöarvo määritettiin puu- ja metsähakelajeittain ja saadut lukuarvot (MJ/kg) ovat esitetty Taulukossa 7.

Taulukko 7. Metsähakkeen kalorimetrinen (ylempi lämpöarvo, HHV) ja tehollinen (alempi lämpöarvo, LHV) kuiva-aineessa (MJ/kg) puu- ja metsähakelajeittain.

	Kalorimetrinen lämpöarvo, MJ/kg	Tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
Mänty hakkuutähde	21,81	20,5
Kuusi hakkuutähde	21,11	19,8
Koivu hakkuutähde	21,01	19,7
Mänty kokopuu	20,95	19,6
Kuusi kokopuu	20,55	19,2
Koivu kokopuu	20,35	19,0
Lehtipuu kokopuu	20,35	19,0
Mänty ranka	20,65	19,3
Kuusi ranka	20,45	19,1
Koivu ranka	20,85	19,5
Lehtipuu ranka	20,85	19,5

Puun kuiva-aineen kalorimetrisen ja tehollisen lämpöarvon perusteella määritettiin puolestaan rangan, kokopuun ja hakkuutähteen ylempi ja alempi lämpöarvo toimituskosteudessa (MWh/m³ & MJ/kg). Laskennassa metsähakkeen toimituskosteudet ja kuiva-ainetappiot olivat samat, joita käytettiin mm. autokuljetuksen kuormakokojen määrittämisessä (Taulukko 3, 4 ja 5) Joensuun hankinta-alueen työmaille (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004, Heikkilä ym. 2005).

Metsähakelajikohtaiset keskiarvoluvut Joensuun hankinta-alueelle toimituskosteuden ja kuiva-ainetappioiden mukaan ovat esitetty Taulukoissa 8, 9 ja 10. Toimituskostealle painolle (MJ/kg) laskettu metsähakkeen lämpöarvo oli sitä pienempi mitä enemmän puupolttoaine sisälsi vettä suhteessa puuaineen kuivamassaan (Taulukko 8, 9 ja 10). Kiintokuutiometrin energiasisältöön (MWh/m³) puolestaan vaikutti kosteuden ohella puuaineen kuivatuoretiheys (kg/m³) ja varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus (Kuva 17, 18 ja 19). Esimerkiksi rangalla (Taulukko 8 ja Kuva 17) ylemmän lämpöarvon mukaan määritetty kiintokuutiometrin energiasisältö vaihteli em. tekijöiden vaikutuksesta välillä 2.1–2.4 MWh/m³.

Taulukko 8. Sekapuu rangan ylempi ja alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa (MWh/m³ & MJ/kg) Joensuun hankinta-alueella keskimäärin, kun kuiva-ainetappio per kuukausi on 0,25–1,25 % kuiva-ainetta ja toimituskosteus on 35–45 %. Tuorehakkeen kosteus 53 %.

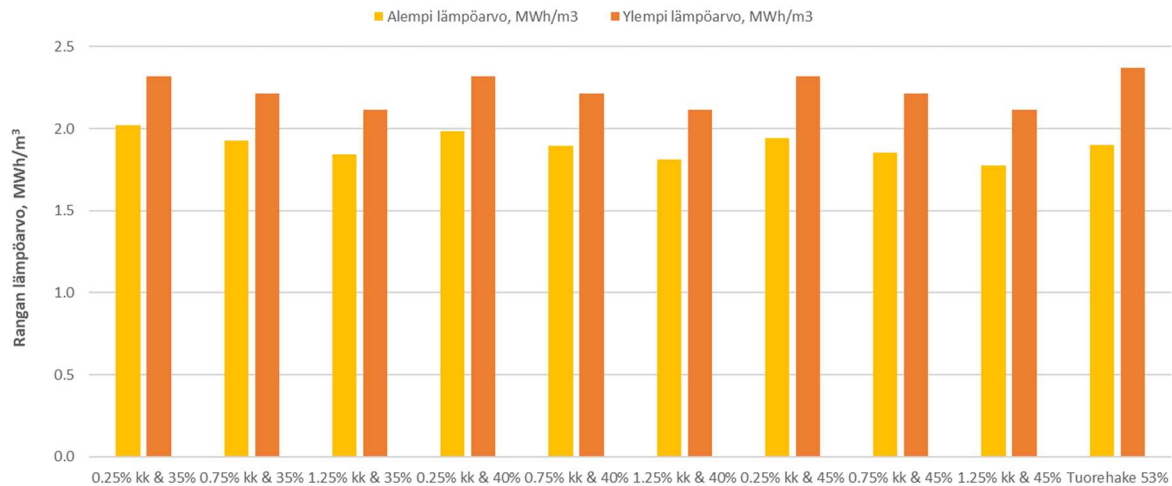
	Alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MWh/m ³	Ylempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MWh/m ³	Alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg	Ylempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg
Ranka				
0.25% kk & 35%	2,0	2,3	11,7	13,4
Ranka				
0.75% kk & 35%	1,9	2,2	11,7	13,4
Ranka				
1.25% kk & 35%	1,8	2,1	11,7	13,4
Ranka				
0.25% kk & 40%	2,0	2,3	10,6	12,4
Ranka				
0.75% kk & 40%	1,9	2,2	10,6	12,4
Ranka				
1.25% kk & 40%	1,8	2,1	10,6	12,4
Ranka				
0.25% kk & 45%	1,9	2,3	9,5	11,4
Ranka				
0.75% kk & 45%	1,9	2,2	9,5	11,4
Ranka				
1.25% kk & 45%	1,8	2,1	9,5	11,4
Ranka				
tuorehake 53%	1,9	2,4	7,8	9,7

Taulukko 9. Sekakokopuun ylempi ja alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa (MWh/m³ & MJ/kg) Joensuun hankinta-alueella keskimäärin, kun kuiva-ainetappio per kuukausi on 0,25–1,25 % kuiva-ainetta ja toimituskosteus on 35–45 %. Tuorehakkeen kosteus 53 %.

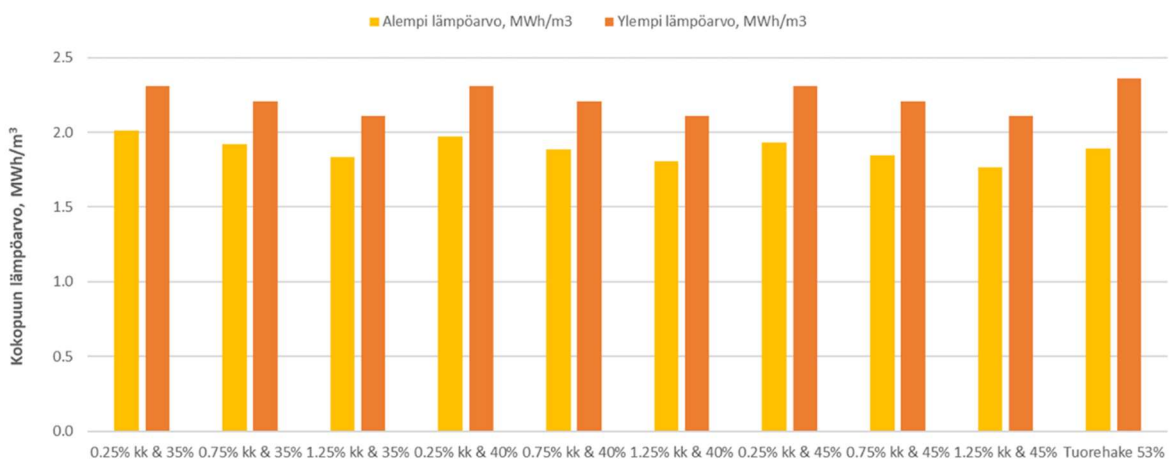
	Alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MWh/m ³	Ylempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MWh/m ³	Alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg	Ylempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg
Kokopuu 0.25% kk & 35%	2,0	2,3	11,6	13,4
Kokopuu 0.75% kk & 35%	1,9	2,2	11,6	13,4
Kokopuu 1.25% kk & 35%	1,8	2,1	11,6	13,4
Kokopuu 0.25% kk & 40%	2,0	2,3	10,5	12,3
Kokopuu 0.75% kk & 40%	1,9	2,2	10,5	12,3
Kokopuu 1.25% kk & 40%	1,8	2,1	10,5	12,3
Kokopuu 0.25% kk & 45%	1,9	2,3	9,5	11,3
Kokopuu 0.75% kk & 45%	1,8	2,2	9,5	11,3
Kokopuu 1.25% kk & 45%	1,8	2,1	9,5	11,3
Kokopuu tuorehake 53%	1,9	2,4	7,7	9,7

Taulukko 10. Kuusivaltaisen hakkuutähteen ylempi ja alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa (MWh/m³ & MJ/kg) Joensuun hankinta-alueella keskimäärin, kun kuiva-ainetappio per kuukausi on 0,25–1,25 % kuiva-ainetta ja toimituskosteus on 35–45 %. Tuorehakkeen kosteus 53 %.

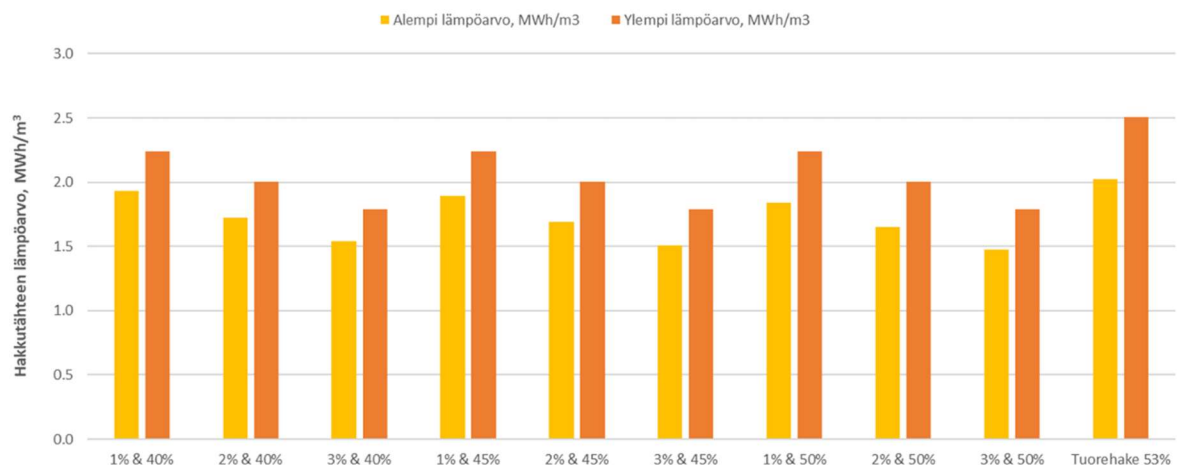
	Alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MWh/m ³	Ylempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MWh/m ³	Alempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg	Ylempi lämpöarvo saapumiskosteudessa, MJ/kg
Hakkuutähde				
1% kk & 40%	1,9	2,2	10,9	12,7
Hakkuutähde				
2% kk & 40%	1,7	2,0	10,9	12,7
Hakkuutähde				
3% kk & 40%	1,5	1,8	10,9	12,7
Hakkuutähde				
1% kk & 45%	1,9	2,2	9,8	11,6
Hakkuutähde				
2% kk & 45%	1,7	2,0	9,8	11,6
Hakkuutähde				
3% kk & 45%	1,5	1,8	9,8	11,6
Hakkuutähde				
1% kk & 50%	1,8	2,2	8,7	10,6
Hakkuutähde				
2% kk & 50%	1,6	2,0	8,7	10,6
Hakkuutähde				
3% kk & 50%	1,5	1,8	8,7	10,6
Hakkuutähde				
tuorehake 53%	2,0	2,5	8,0	9,9



Kuva 17. Kuiva-ainetappioiden, kosteuden ja lämpöarvon laskentaperusteen (LHV & HHV) vaikutus ranka kiintokuutiometrin energiasisältöön Joensuun hankinta-alueella keskimäärin.



Kuva 18. Kuiva-ainetappioiden, kosteuden ja lämpöarvon laskentaperusteen (LHV & HHV) vaikutus kokopuu kiintokuutiometrin energiasisältöön Joensuun hankinta-alueella keskimäärin.

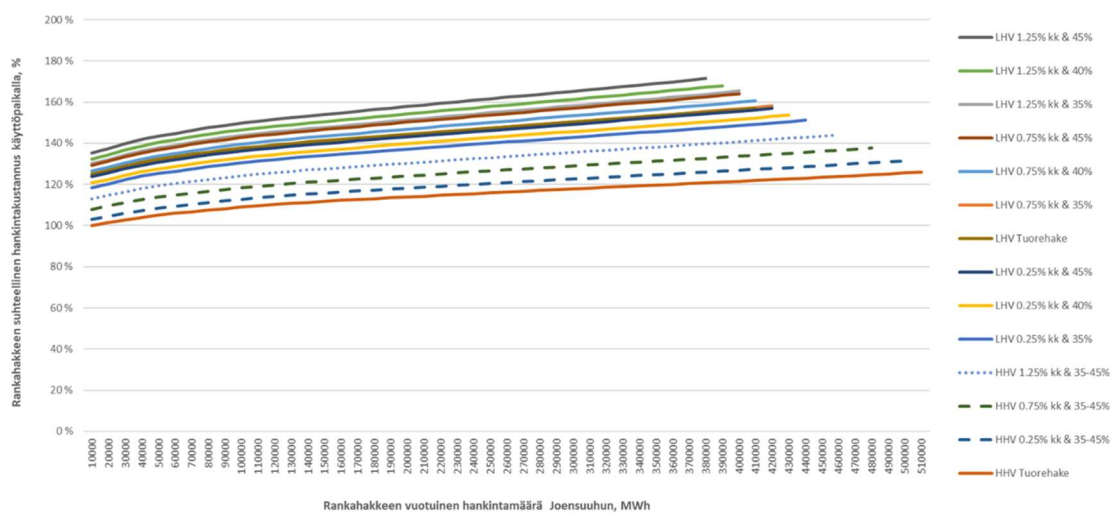


Kuva 19. Kuiva-ainetappioiden, kosteuden ja lämpöarvon laskentaperusteen (LHV & HHV) vaikutus kuusivaltaisen hakkuutähde kiintokuutiometrin energiasisältöön Joensuun hankinta-alueella keskimäärin.

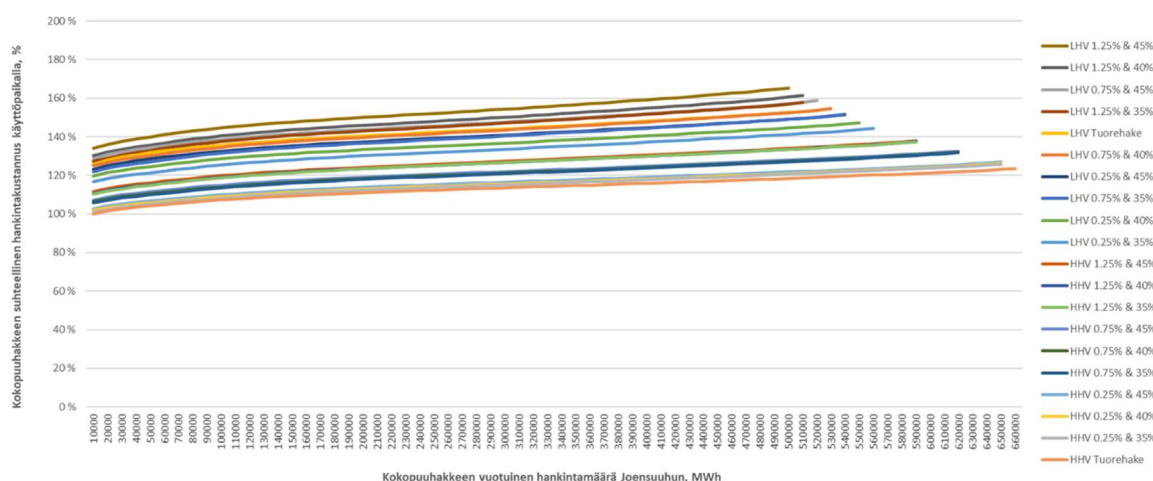
6. Metsähakkeen hankintakustannukset

Ranka- kokopuu- ja hakkuutähdehakkeen hankintakustannukset Joensuussa sijaitsevalle käyttöpaikalle laskettiin vuotuisen hankintamäärän mukaan, kun hankinta-alueen säde oli 100 km tieverkkoa pitkin (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2004, Heikkilä ym. 2005). Em. hankinta-alueen työmaille laskettiin metsähakkeen korjuukustannukset käyttöpaikalle toimitettuna ylemmän (HHV) ja alemman (LHV) lämpöarvon mukaan työmaakohtaisen paikkatiedon perusteella. Työmaatasolla metsähakkeen kustannuksiin (€/MWh) sisältyi hankinnan organisointi, energiapuun kantohinta, hakkuu & kasausta, metsäkuljetus, varastoinnin pääomakustannus, haketus sekä puumateriaalin autokuljetus tienvarsivarastolta käyttöpaikalle. Työmaatasolla metsähakkeen energiasisältöön (MWh/m³) sekä autokuljetuksen hyötykuormiin vaikutti puulajisuhteiden ohella puuaineen kosteus (%) ja varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus (kg/m³). Hankintakustannustarkasteluissa metsähakkeen ylemmän ja alemman lämpöarvon mukaisen energiasisällön laskentaperusteet hankinta-alueen hakkuutyömaille olivat samat, mitä käytettiin lämpöarvojen määrittämisessä Taulukoihin 8, 9 ja 10.

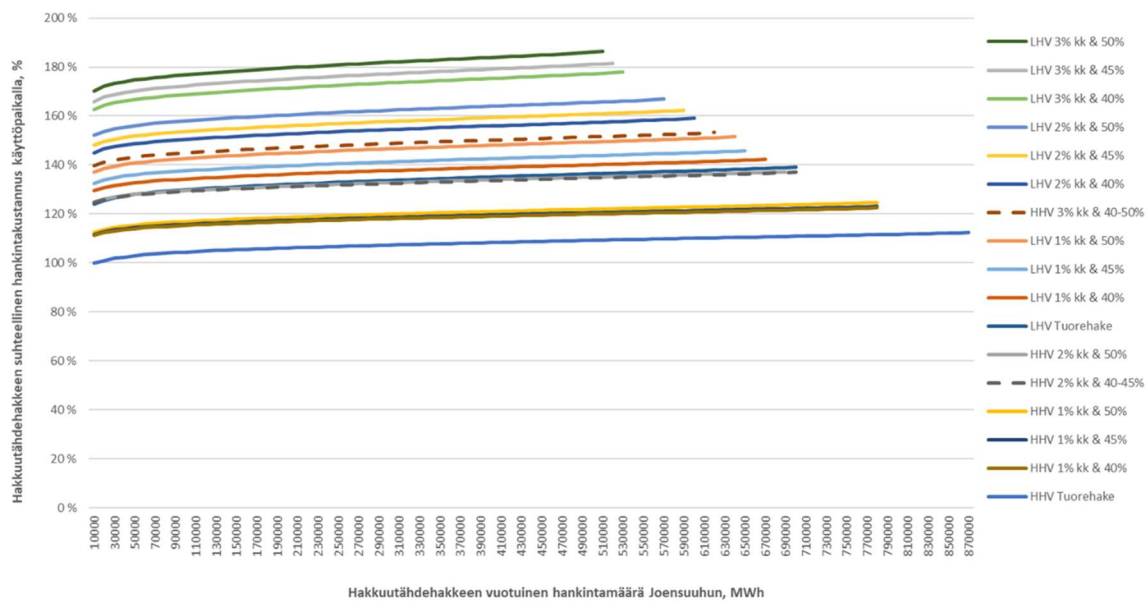
Tuloslaskennassa hankinta-alueen työmaat per metsähakelaji järjestettiin korjuukustannusten (€/MWh) mukaan halvimmasta kalleimpaan ja niille määritettiin kumulatiivinen keskihinta työmaakohtaisten hankintakustannusten perusteella kullekin vertailussa mukana olevalle toimintamallille ja metsähakelajille vuotuisen hankintamäärän mukaan (Kuva 20, 21 ja 22). Lopullisissa tuloksissa kuiva-ainetappioiden, kosteuden ja lämpöarvon (HHV vs. LHV) vaikutus hankintakustannuksiin käyttöpaikalla ilmaistiin suhdeluvun avulla tulosten vertailtavuuden helpottamiseksi. Tuloksissa rangasta, kokopuusta ja hakkuutähteestä tehdyllä tuorehakeella (HHV Tuorehake) ylemmän lämpöarvon mukainen suhteellinen hankintakustannus oli 100 %, kun metsähakkeen vuotuinen hankintamäärä oli 10 000 MWh (Kuva 20, 21 ja 22).



Kuva 20. Rangan suhteellinen hankintakustannus Joensuuhun hankintamäärän mukaan.



Kuva 21. Kokopuuhakkeen suhteellinen hankintakustannus Joensuuhun hankintamäärän mukaan.



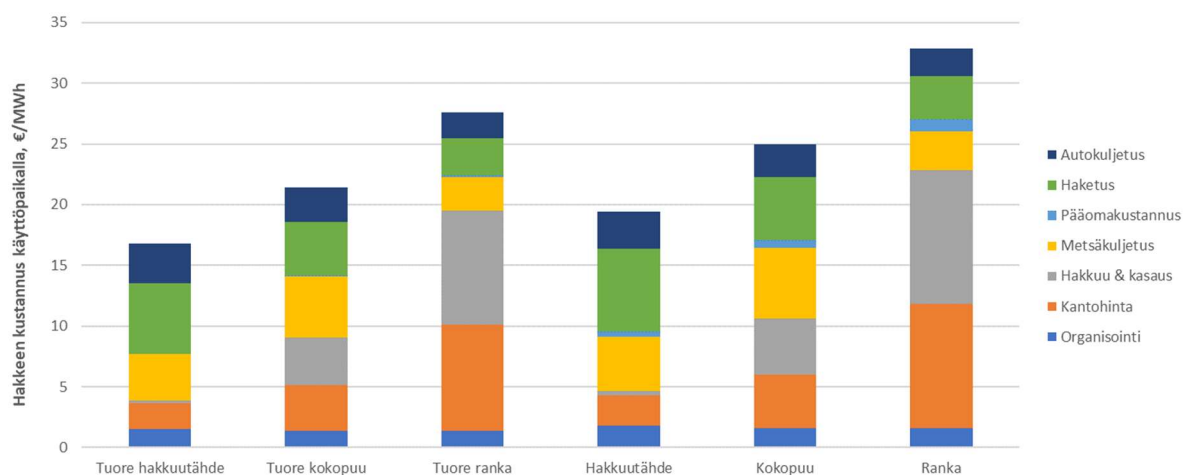
Kuva 22. Hakkuutähdehakkeen suhteellinen hankintakustannus Joensuuhun hankintamäärän mukaan.

Hankintamäärien kasvu nosti ranka-, kokopuu- ja hakkuutähdehakkeen hankintakustannusta käyttöpäikalla (Kuva 20, 21 ja 22), koska hankintamäärien kasvaessa korjuu on ulotettava entistä epäedullisemmille kohteille ja laajemmalle alueella käyttöpaikan ympäristössä. Vastaavasti hankintakustannukset olivat sitä korkeammat, mitä suuremmat varastoidun energiapuun kuiva-ainetappiot olivat tai mitä kosteampaa metsähake oli. Energiapuun kuiva-ainetappiot laskevat puuaineen tiheyttä (kg/m^3) ja pienentävät kuiva-aineen määrän vähenemisen kautta metsähakkeen energiasisältöä (MWh/m^3). Lisäksi kosteus pienentää metsähakkeen energiasisältöä (MJ/kg) ja nostaa autokuljetuksen kustannuksia etenkin kokopuun ja hakkuutähteiden tienvarsihaketukseen perustuvalla toimitusketjulla.

Kaatotuoreella puulla tai hakkuutähteillä ei ole varastoinnista johtuvia kuiva-ainetappioita tai pääomakustannuksia, minkä vuoksi metsähakkeen ylemmän lämpöarvon mukaan lasketut hankintakustannukset olivat toimintamallivertailun alimmat (Kuva 20, 21, 22 ja 23). Savukaasujen lämmöntalteenottojärjestelmästä oli hyötyä myös metsähakkeen perinteisellä hankintaketjulla, koska metsähakkeesta saadaan sen avulla enemmän energiaa (MWh/m^3), kun piipusta katoava hukkalämpö muuttuu hyötylämmöksi kaukolämpöverkkoon (Kuva 20, 21 ja 22). Paremman energiatehokkuuden ansiosta metsähakkeen hankintakustannukset ovat luonnollisesti alemmat verrattuna käyttöpäikkaan, jota ei ole varustettu em. kondensoivalla savukaasujen hukkalämmön talteenottojärjestelmällä (Kuva 20, 21 ja 22), koska tarvittava

energia voidaan tuottaa pienemmällä puumäärällä ja hankkia em. syystä lyhyemmän hankinta-alueen säteen sisältä tai otollisemmilta korjuukohteilta.

Rangalla tuorehakkeen hankintakustannukset olivat 3–12 % alemmat verrattuna perinteiseen toimintamalliin, kun metsähakkeen energiasisältö lasketaan ylemmän lämpöarvon (HHV) mukaan ja hankintamäärä on 150 000 MWh rankahaketta vuodessa (Kuva 20). Kun perinteisellä toimintamallilla tuotetun metsähakkeen energiasisältö lasketaan alemman lämpöarvon (LHV) mukaan, on ero hankintakustannuksissa vastaavalla 150 000 MWh hankintamäärällä 17–27 % tuorehakekonseptin eduksi (Kuva 20). Kokopuuhakkeen toimitusketjulla vastaavat erot hankintakustannuksissa olivat 1–11 % ja 15–26 % (Kuva 21) sekä hakkuutähdehakkeella 9–28 % ja 22–41 % ylemmän lämpöarvon mukaan lasketun tuorehakekonseptin eduksi (Kuva 22).



Kuva 23. Tuoreen ja kuivahtaneen metsähakkeen keskimääräinen kustannusrakenne (€/MWh) Joensuun ympäristössä, kun keskikaukokuljetusmatka on 67 km. Tuorehakeella lämpöarvo on laskettu ylemmän (HHV) ja kuivahtaneella hakeella alemman (LHV) lämpöarvon mukaan.

Kuvassa 23 on esitetty tuoreen ja perinteisellä toimintamallilla tuotetun kuivahtaneen metsähakkeen keskimääräinen kustannusrakenne Joensuun hankinta-alueella, kun tuorehakeella lämpöarvo on laskettu ylemmän (HHV) ja kuivahtaneella hakeella alemman (LHV) lämpöarvon mukaan. Metsähakkeen energiasisältöä lukuun ottamatta kuvan 23 vertailuperusteet ovat samat kuin kuvissa 2 ja 3, eli kuivahtaneella hakkuutähdehakkeella toimituskosteus oli 45 % ja kuiva-ainetappioiden suuruus 19,9 % puun kuivatuoretiheydestä (kg/m^3). Kuivahtaneella rangalla ja kokopuulla toimituskosteus oli puolestaan 40 % ja kuiva-ainetappiot 6,6 % puun kuivatuoretiheydestä (kg/m^3).

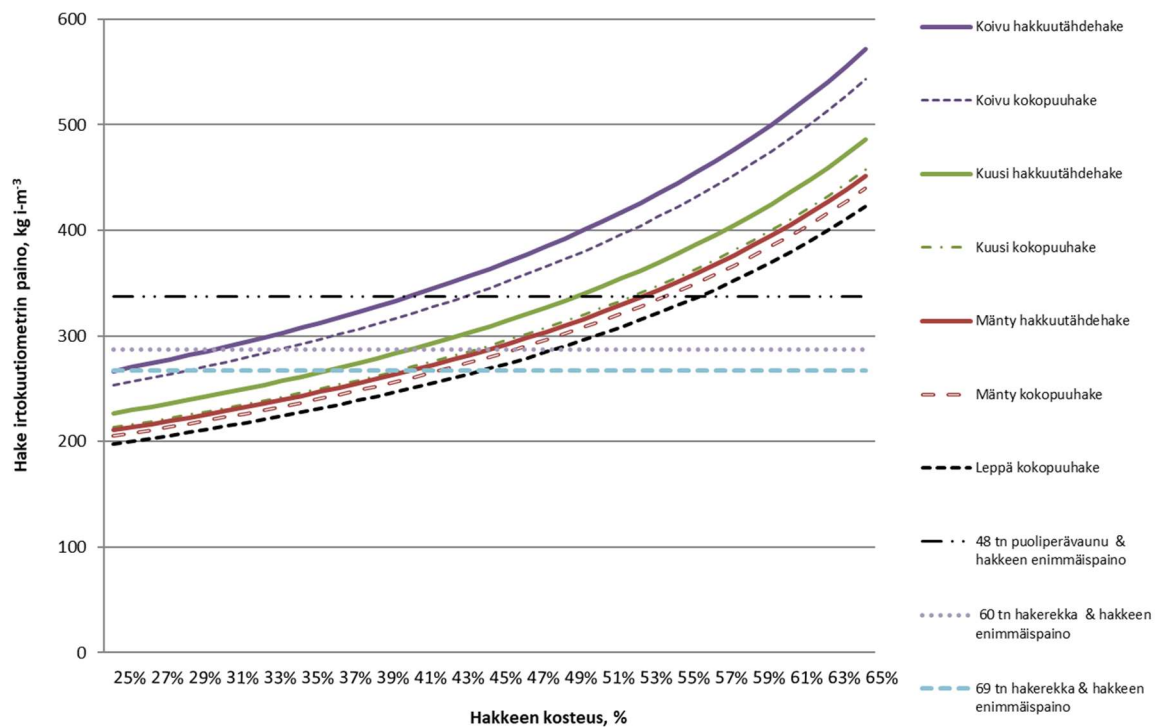
Kuvan 23 tulosten perusteella tuoreella rangalla tuotetun metsäenergian hankintakustannukset olivat Joensuun hankinta-alueella keskimäärin 5,3 €/MWh alemmat, kuin toimintamallilla, jossa varastoidusta rangasta tuotettu hake toimitetaan käyttöpaikalle, jota ei ole varustettu kondensoivalla savukaasujen hukkalämmön talteenottojärjestelmällä. Kokopuuhakkeen toimitusketjulla vastaava ero hakkeen hankintakustannuksissa oli 3,5 €/MWh ja hakkuutähdehakkeella 2,6 €/MWh (Kuva 23).

7. Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Käytännön puunhankinnassa leimikoiden välillä on vaihtelua puulajisuhteissa, samoin kuin on yrittäjäkohtaista vaihtelua metsähakkeen autokuljetukseen käytettävässä kuljetuskalustossa. Kuvassa 24 on esitetty puu- ja metsähakelajin sekä kosteuden vaikutus hakeauton 100 % täyttöasteeseen metsähakkeen irtokuutiometrin painon mukaan, kg/i-m^3 , kun kuiva-ainetappiot ovat 0 %. Koivulla puuaineen kuivatuoretiheys (kg/m^3) on korkea, minkä vuoksi sekä koivu hakkuutähdehakkeen että kokopuuhakkeen irtokuutiometrin paino (kg/i-m^3) on kymmeniä kiloja korkeampi, mitä havupuilla ja lepällä samassa kosteudessa. Käytännön kuljetusoperaatioissa em. ero näkyy siinä, että ylikuormien välttämiseksi koivuhakekuorma on jätettävä vajaammaksi, kuin muilla puulajeilla, vaikka kuivamassaksi muutettuna (kg) em. kuormakoko sekä energiasisältö olisivatkin likimain samat, jos hakkeen kosteuden ja tiiviyn (40 %) oletetaan olevan samat kaikilla puulajeilla.

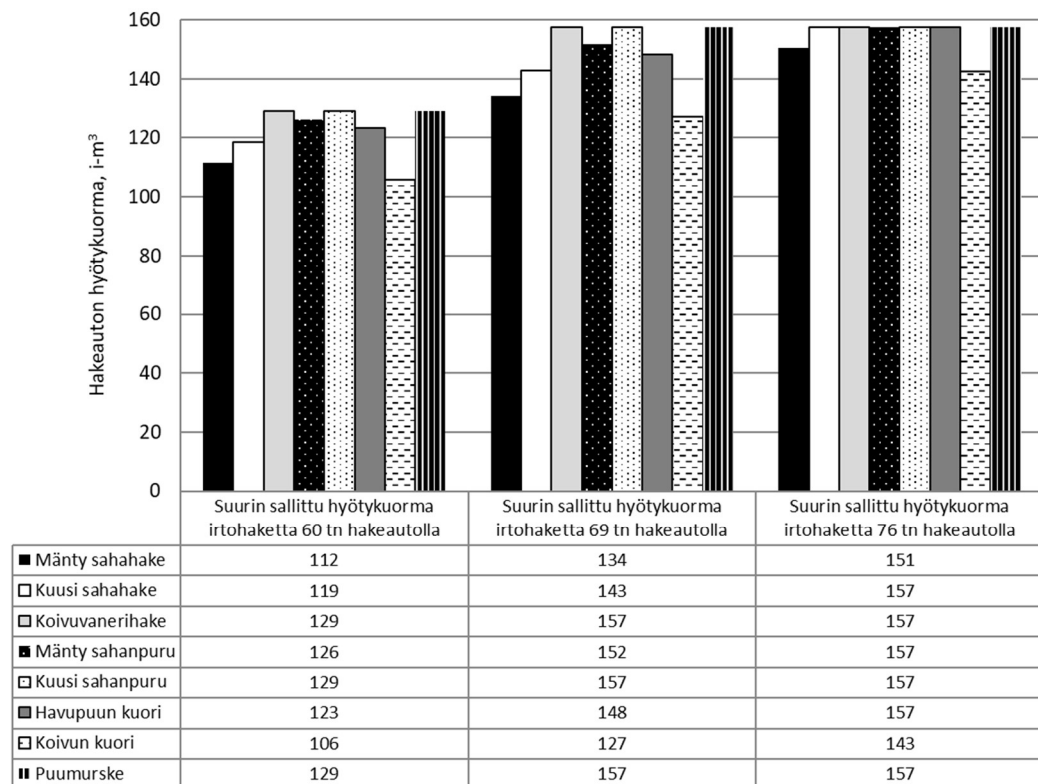
Hakeautotyypeistä 48-tonnin puoliperävaunut soveltuvat parhaiten raskaan hakkeen kaukokuljetukseen, eli ne voidaan kuormata täyteen hakkeella, jonka irtokuutiometrin paino (kg/i-m^3) on 50–70 kg korkeampi kuin 60- tai 69-tonnin hakeautoilla (Kuva 24). Em. hakeautoista 60-tonnin hakeauto vastaa hakeautotyyppiä, joka oli yleisesti käytössä ennen vuonna 2013 tapahtunutta autokuljetusten enimmäismassarajojen muutosta (Laitila ym. 2016b). Suurempi 69-tonnin hakeauto on puolestaan sama moderni kääntyväkselinen hakeautotyyppi (Kuva 13), jota on käytetty tämä raportin vertailuanalyysissä. Puoliperävaunujen heikkous hakkeen autokuljetuksessa on mm. niiden pieni kuormatilan kehystilavuus (kuormakoko hakkeena, i-m^3), minkä vuoksi ne eivät ole kovin yleisiä

metsähakkeen autokuljetuksessa ja käytetään lähinnä lyhyillä kuljetusmatkoilla (Laitila ym. 2016b) käyttöpaikan tai haketerminaalin läheisyydessä. Muuhun kuljetuskalustoon suhteutettuna puoliperävaunun kuormatilan kehystilavuus vastaa lähinnä 69-tonnin hakeauton perävaunun kuormatilan kehystilavuutta (Laitila ym. 2016b).



Kuva 24. Puu- ja metsähakelajin sekä kosteuden vaikutus hakeauton 100 % täyttöasteeseen metsähakkeen irtokuutiometrin painon mukaan, kg/i-m³ (Laitila ym. 2016b).

Metsähakkeen ohella lämpö- ja voimalaitokset käyttävät energiantuotannossa sahauksen tms. sivutuotteita, kuten ennen kaikkea kuorta ja sahanpurua. Puutuoteteollisuuden sivutuotteiden autokuljetukseen käytetään 76-tonnin hakeautoja, joiden kantavuus ja kuormatilojen mitoitus sopivat hyvin tuoreiden puuperäisten jakeiden kaukokuljetukseen (Kuva 25). Metsähakkeen toimituksissa em. suurten hakeautojen käytettävyyttä rajoittaa niiden huono liikennöitävyys ja maastokelpoisuus metsäautotieverkostolla, minkä vuoksi niiden käyttö metsähaketoimituksissa on rajoittunut lähinnä haketerminaalien ja käyttöpaikkojen väliseen liikennöintiin (Laitila ym. 2016b).

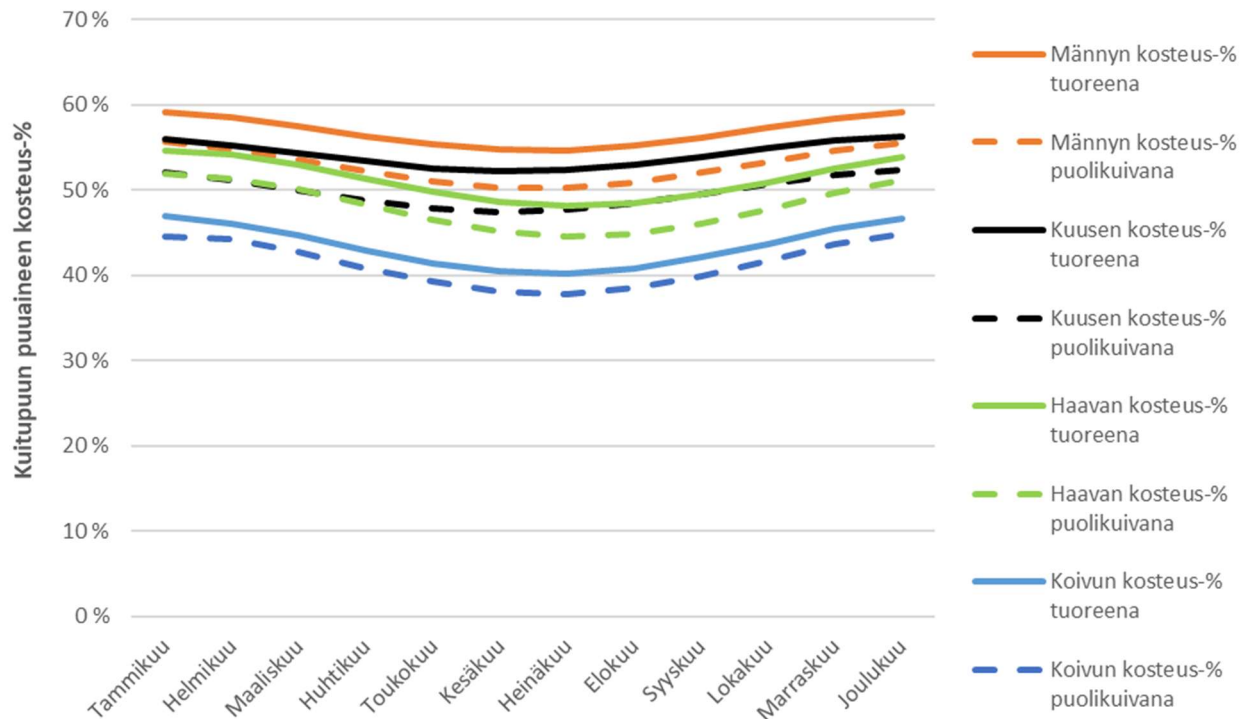


Kuva 25. Puutuoteteollisuuden sivutuotteiden suurimmat sallitut hyötykuormat (i-m³) 60, 69 ja 76-tonnin hakeautoilla (Laitila ym. 2016b).

Puuaineen tiheyden ohella puuaineen kosteudella on puulajista ja vuodenaikasta johtuvaa vaihtelua. Kuvassa 26 on laskettu tuoreiden ja puolikuivien puutavarapölkkyjen (latvaläpimitta ≥ 7 cm) kosteudet puulajin ja vuodenaikan mukaan, kun mänty, kuusi, koivu ja haapa pölkkyjen kuivatuoretiheyksiksi oletettiin 490, 390, 380 ja 400 kg/m³ (Hakkila 1978, Hytönen ym. 2018). Laskenta-aineistona käytettiin puutavaran mittauslain mukaisia tuoretiheyslukuja (kg/m³) pieniläpimittaisille puutavarapölkkyille Etelä-Suomessa (Ajantasainen määräys 2023). Ko. virallisia tuoretiheyslukuja käytetään puutavaran painon ja tilavuuden välisissä muunnoissa puutavaran kuormainvaaka tms. mittauksissa kauko- tai metsäkuljetuksen yhteydessä. Puolikuiva tarkoittaa puutavaraa, jota on varastoitu kesäaikana (1.5.–30.9.) yli kuusi viikkoa.

Kuvasta 26 käy hyvin ilmi, että pieniläpimittainen mänty on selvästi kosteampaa rankahakkeen raaka-ainetta kuin koivu. Koivusta tehdyn hakkeen kosteus on alle 53 % kaikkina vuodenaikoina kaatotuoreena ja kuivahtaneena, kun taas männyllä ko. kosteusraja ylittyy kaatotuoreella puulla aina (55–59 %) ja puolikuivanakin talvikaudella (marras-maaliskuu 54–56 %). Kaatotuoreella kuusella puuaineen 53 %:n kosteusraja alittuu touko-elokuussa, jolloin puiden kasvu ja haihtumisimu ovat voimakkaimmillaan. Puolikuivalla kuusella puuaineen

kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan välillä 47–52 %. Haavalla tuoreen puun kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan välillä 48–55 % ja puolikuivana välillä 45–52 %. Kuivimmillaan haapa, aivan kuten muutkin puulajit, on kesäkaudella touko-elokuussa (Kuva 26).



Kuva 26. Puulajin ja vuodenajan vaikutus tuoreen ja puolikuivan kuitupuun kosteuteen.

Metsähakkeen hankinnan näkökulmasta otollisin puulaji tuorehakekonseptin mukaiseen puunhankintaan on koivu, koska sen puuaineen kosteus kaatotuoreena on alempi kuin muilla puulajeilla. Lisäksi tuohipäällinen koivu on havupuita selvästi alttiimpi varastolaholle ja siitä aiheutuville kuiva-ainetappioille, mikä myös puoltaa nopeutettua varastokiertoa ja toimitusketjua. Vastaavasti havupuilla kesäkauden yli menevällä varastoinnilla voi alentaa puuaineen kosteutta, eikä pihkoittuva havupuu toisaalta ole yhtä altis varastoinnin aiheuttamalle laholle kuin koivu ja muut lehtipuut ovat. Kesäkaudella korjattu tai varastoitu puu kuivahtaa vääjäämättä, koska tarve on pieni kesäkauden energiantuotannossa. Talvikaudella korjatuissa kaatotuoreissa puissa mukana tuleva lumi ja jää voivat aiheuttaa ongelmia poltossa, vaikka kaatotuore puuainees sinällään on varsin tasalaatuista polttoainetta. Sama lumi- ja kosteusongelma koskee myös varastolla kuivahtanutta puuta, jos haketetun puubiomassan sekaan päätyy ylimääräistä lunta tai jäätä, eikä kasaa ole peitetty.

Talvikauden hakkuissa puiden oksiin ja runkoon tarttuneen jään ja lumen takia puu kannattaa kokopuuna korjuun sijasta korjata rankana ja mielellään mahdollisimman järeiltä tai koivuvaltaisilta kohteilta, jotta voidaan vähentää märän hakkeen aiheuttamia ongelmia polttoprosessissa. Lumi- ja jää ongelman eliminoimiseksi tuoreena toimitettavan kokopuuhakkeen raaka-aine kannattaa korjata syyskaudella koivuvaltaisilta kohteilta ja varastoida suuriin pinoihin odottamaan haketusta. Vastaavasti havupuilla kokopuuna korjuu on mielekästä tehdä talvi- ja kesäkaudella ja toimittaa kokopuusta tehty hake kuivahtaneena ja mahdollisimman pienin kuiva-ainetappioiden energiantuotantoon. Hakkuutähteillä korjuusuositukset ja voimalaitoskattiloiden korroosioriski puoltavat talvikauden lumi ongelman ohella perinteistä ns. ruskean eli kuivahtaneen hakkeen toimintamallia peitetyistä varastopinoista. Hakkuutähteiden palstalla kuivattaminen on perinteinen keino karistaa ravinnerikkaat neulaset palstalle ja samalla parantaa materiaalin varastoitavuutta sekä pienentää kuiva-ainetappioiden määrää. Varastotilan puute voi myös rajoittaa tuoreeseen hakkuutähteeseen perustuvaa toimintamallia, kun samalle varastopaikalle pitää yrittää mahduttaa sekä ainespuu että tilaa vievät hakkuutähteet samalla kertaa.

Tuoreen hakkeen poltto ei ole itsetarkoitus, mutta sen hyödyntämiseen soveltuvan energiateknologian hyöty on, että puu ja sen sisältämä kuivamassa on nopeasti siirrettävissä kannolta kattilaan pienin varastotappioiden, jos puskurivarastot ovat pienet ja polttoaineen tarve suuri. Rankahakkeen tuotantoketjussa tuorehakekonseptin edut ovat suurimmat, koska tuoreen rangan suurempi paino ei juuri pienennä 76 tonnin puutavara-auton hyötykuormaa, toisin kuin hakkuutähde- ja kokopuuhakkeen autokuljetuksessa nykyisellä hakeautokalustolla. Rangalla kantohinta on lisäksi korkeampi, kuin hakkuutähteellä ja kokopuulla, minkä vuoksi nopeutetun varastokierron kustannushyödyt ovat pääomakustannusten osalta em. jakeita selvästi suuremmat.

8. Kirjallisuus

- Ajantasainen määräys. 2023. Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista. Ajantasainen määräys 9.6.2023.
<https://www.luke.fi/fi/documents/luonnonvarakeskuksen-maarays-puutavaran-mittaukseen-liittyvista-yleisista-muuntoluvuista-0>
- Alakangas E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. 172 s.
- Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J., Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. 229 s.
- Asikainen A., Ranta T., Laitila J., Hämäläinen J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavaisen hankinnan logistiikka. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Energiapuun hinta neljännesvuosittain [verkkajulkaisu] 2024. Luonnonvarakeskus
<https://www.luke.fi/fi/tilastot/energiapuun-kauppa>
- Hakkila P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Folia Forestalia 342. 38 s.
- Heikkilä J., Laitila J., Tanntu V., Lindblad J., Sirén M., Asikainen A., Pasanen K., Korhonen K.T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s.
- Hytönen J., Beuker E., Viherä-Aarnio A. 2018. Clonal variation in basic density, moisture content and heating value of wood, bark and branches in hybrid aspen. Silva Fennica vol. 52 no. 2 article id 9938. 15 s. <https://doi.org/10.14214/sf.9938>
- Laitila J., Asikainen A., Sikanen L., Korhonen K.T., Nuutinen Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Metlan työraportteja 3. 57 s.
- Laitila J., Lehtonen E., Ranta T., Anttila P., Rasi S., Asikainen A. 2016a. Procurement costs of cereal straw and forest chips for biorefining in South-East Finland. Silva Fennica vol. 50 no. 5 article id 1689. 21 s. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1689>
- Laitila J., Asikainen A., Ranta T. 2016b. Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland. Biomass and Bioenergy 90: 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.011>.
- Laitila J., Ahtikoski A., Repola J., Routa J. 2017. Pre-feasibility study of supply systems based on artificial drying of delimbed stem forest chips. Silva Fennica vol. 51 no. 4 article id 5659. 18 s. <https://doi.org/10.14214/sf.5659>

Laitila J., Väättäinen K. 2022. The productivity and cost of harvesting whole trees from early thinnings with a felling head designed for continuous cutting and accumulation. *International Journal of Forest Engineering*, 34(1):76–89.
<https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2094192>

Leino T., Raitila J., Korpijärvi K. 2024. TP2. Tuorehakkeen teknistaloudellinen käytettävyys itäsuomalaisilla lämpö- ja voimalaitoksilla. Asiakasraportti 15.3. 2024. VTT-CR-00048-24. 34 s.

Nurmi J. 2000. Characteristics and storage of whole-tree biomass for energy. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 956. 42 s.

Prinz R., Väättäinen K., Laitila J., Sikanen L., Asikainen A. 2019. Analysis of energy efficiency of forest chip supply systems using discrete-event simulation. *Applied Energy* 235: 1369–1380.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.053>

Routa J., Kolström M., Sikanen L. 2018. Dry matter losses and their economic significance in forest energy procurement. *International Journal of Forest Engineering* 29(1):53–62.
<https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1421332>

Strandström M. 2023. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2022. Metsätehon tulostalvosarja 12/2023. 32 s. <https://www.metsateho.fi/puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2022/>

Tilastokeskus [verkkojulkaisu] 2024. Metsäalan kone- ja autokustannusindeksi.
<https://stat.fi/tup/kustannusindeksit/metsaalan-kone-ja-autokustannusindeksi.html>