



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 70/2025

Varastoinnin vaikutus metsähakkeen ominaisuuksiin ja hankinnan energiatehokkuuteen

Metsästä energiaksi – MENER

Jari Lindblad, Jaakko Repola ja Juha Laitila

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 70/2025

Varastoinnin vaikutus metsähakkeen ominaisuuksiin ja hankinnan energiatehokkuuteen

Metsästä energiaksi – MENER

Jari Lindblad, Jaakko Repola ja Juha Laitila



Euroopan unionin
osarahoittama



LAANIA



KAINUUN VOIMA OY

Viittausohje:

Lindblad, J., Repola, J. & Laitila, J. 2025. Varastoinnin vaikutus metsähakkeen ominaisuuksiin ja hankinnan energiatehokkuuteen : Metsästä energiaksi – MENER. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 70/2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 50 s.

Jari Lindblad ORCID ID, <https://orcid.org/0009-0003-6766-6587>



ISBN 978-952-419-102-9 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-102-9>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Jari Lindblad, Jaakko Repola ja Juha Laitila

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2025

Julkaisuvuosi: 2025

Kannen kuva: Erkki Oksanen

Tiivistelmä

Jari Lindblad¹, Jaakko Repola² ja Juha Laitila¹

¹ Luonnonvarakeskus, Joensuun toimipaikka

² Luonnonvarakeskus, Rovaniemen toimipaikka

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin hakkuutähdehakkeen toimituskosteuden ja varastoinnin aikaisen kuiva-ainetappion vaikutuksia energiasisältöön, hankintakustannuksiin ja logistiikka-ketjun hiilidioksidipäästöihin. Lisäksi kerättiin laaja empiirinen aineisto metsähakekuormista, minkä perusteella tarkasteltiin metsäenergian keskeisiä määrä- ja laatusuureita ja muuntoker-toimia hyödyttämään paikallista metsäenergiakauppaa. Tutkimus toteutettiin Kainuun alu-eella, ja se perustui sekä laskennallisiin analyysiin että operatiivisiin mittaustietoihin.

Tulokset osoittavat, että hakkuutähteiden varastointiaika ja kosteuden vaihtelu vaikuttavat merkittävästi hakkuutähdehakkeen hankinnan energiatehokkuuteen ja toimitusketjun talou-dellisuuteen. Kun varastoinnin aikaiset kuiva-ainetappiot olivat 1–3 % kuukaudessa, oli niiden vaikutus hankintakustannuksiin suurempi kuin hakkeen toimituskosteuden vaihtelu. Hukka-lämmön talteenottojärjestelmällä varustetut laitokset pystyivät hyödyntämään hakkeen ener-giasisältöä tehokkaammin, mikä pienensi sekä hankintakustannuksia että CO₂-päästöjä tuo-tettua energiamäärää kohden.

Empiirinen aineisto mahdollisti metsähakkeen palakokojakauman, tiiviyden, kosteuden, kuiva-tuoretiheyden, tuoretiheyden ja energiatihyden tarkastelun. Metsähakkeen tiiviyden kes-kiarvo oli kokopuu- ja rankahakkeella 0,40 ja hakkuutähdehakkeella 0,42. Palakokojakauman analyysi osoitti, että pienimpien jakeiden osuus kasvaa varastointiajan pidentyessä, mikä voi vaikuttaa hakkeen tiiviyteen ja kuljetustehokkuuteen. Kuivatuoretiheys aleni varastointiajan myötä, mikä indikoi kuiva-ainehävikin suuruutta ja hakkeen laadun ja käyttöarvon muutosta.

Metsähakkeen kosteudella ja kuivatuoretiheydellä havaittiin negatiivinen korrelaatio, eli vas-taanottoajankohdan kosteus aleni kuivatuoretiheyden kasvaessa. Tämän tarkoittaa sitä, että otantaan perustuvassa kosteusmäärityksessä tulokseen vaikuttaa paitsi kosteuden, myös kui-vatuoretiheyden vaihtelu. Lisäksi kosteuden ja kuivatuoretiheyden yhteisvaihtelu tulisi ottaa huomioon muun muassa tuoretiheyden tai energiatihyden määrityksessä.

Tutkimuksessa kehitettiin menetelmiä metsähakkeen tuoretiheyden ennustamiseen varastoin-tiajan ja sääolosuhteiden perusteella. Tulokset osoittavat, että erityisesti varastoinnin loppu-vaiheen säämuuttujilla, kuten lämpötilalla ja ilman kosteudella, on merkittävä vaikutus hak-keen kosteuteen ja tuoretiheyteen.

Asiasanat: metsäenergia, hakkuutähde, logistiikka, CO₂-päästöt, kosteus, kuiva-ainetappio, tiiviyys, energiatiheys, kuivatuoretiheys, tuoretiheys

Abstract

Jari Lindblad¹, Jaakko Repola² ja Juha Laitila¹

¹ Natural Resources Institute Finland (Luke), Joensuu

² Natural Resources Institute Finland (Luke), Rovaniemi

This study examined the effects of the delivery moisture content and dry matter loss during storage of logging residue chips on energy content, procurement costs, and carbon dioxide emissions in the logistics chain. Additionally, a large empirical dataset of forest chip loads was collected to analyze key quantity and quality parameters and conversion factors to support local forest energy trade. The research was conducted in the Kainuu region and was based on both computational analyses and operational measurement data.

The results show that the storage duration and moisture variation of logging residues significantly affect the energy efficiency and economic viability of logging residue chip procurement. With dry matter losses averaging 1–3% per month, their impact on procurement costs was greater than that of moisture variation. Facilities equipped with waste heat recovery systems were able to utilize the energy content of the chips more efficiently, reducing both procurement costs and CO₂ emissions per unit of energy produced.

The empirical data enabled the examination of particle size distribution, bulk density, moisture content, basic density, green density, and energy density of forest chips. The average bulk density was 0,40 for chips produced from whole trees, and 0,42 for logging residue chips. Analysis of particle size distribution showed that the proportion of smaller fractions increases with longer storage time, which may affect chip bulk density and transport efficiency. Basic density decreased over time, indicating the magnitude of dry matter loss and changes in chip quality and usability.

A negative correlation was observed between forest chip moisture content and basic density, meaning that moisture content at the time of delivery decreased as basic density increased. This implies that moisture determination is influenced not only by moisture content but also by variation in basic density. Furthermore, the joint variation of moisture and basic density should be considered when determining green density or energy density.

The study developed methods for predicting the green density of forest chips based on storage time and weather conditions. The results show that especially weather variables during the final phase of storage, such as temperature and air humidity, have a significant impact on chip moisture content and green density.

Keywords: forest energy, logging residues, CO₂ emissions, moisture content, dry matter loss, bulk density, energy density, basic density, green density

Sisällys

1. Johdanto	6
2. Aineistot ja menetelmät.....	9
2.1. Hakkuutähteiden kertymä.....	9
2.2. Hakkuutähteiden varastointiaika	9
2.3. Hakkuutähdehakkeen energiasisältö	10
2.4. Hakkuutähdehakkeen hankintakustannukset.....	11
2.5. Hakkuutähdehakkeen logistiikkaketjun CO ₂ -päästöt.....	12
2.6. Metsähakkeen empiiriset tutkimusaineistot	13
2.6.1. Metsähakekuormien mittaustiedot.....	13
2.6.2. Metsähakekuormien alkuperätiedot	13
2.6.3. Kuivatuoretiheyden ja palakokojakauman määrittäminen.....	14
2.6.4. Säähavainnot ja säämuuttujien muodostaminen.....	14
2.6.5. Mittaussuureiden ja mittayksiköiden väliset muuntokertoimet	15
3. Tulokset.....	17
3.1. Hakkuutähteiden kertymä ja energiasisältö	17
3.2. Autokuljetuksen hyötykuorma	17
3.3. Kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutus hankintakustannuksiin	19
3.4. Kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutus logistiikkaketjun CO ₂ -päästöihin.....	20
3.5. Hukkalämmön talteenoton vaikutus logistiikkaketjun CO ₂ -päästöihin.....	23
3.6. Metsähakkeen palakokojakauma	25
3.7. Metsähakkeen tiiviys	26
3.8. Metsähakkeen kuivatuoretiheys	28
3.9. Metsähakkeen kosteus.....	29
3.10. Tuoretiheyden, kuivatuoretiheyden ja kosteuden yhteisvaihtelu	33
3.11. Energiatiheyden, kuivatuoretiheyden ja kosteuden yhteisvaihtelu	35
3.12. Metsähakkeen tuoretiheyden ennustaminen	36
4. Tulosten tarkastelu	42
Viitteet.....	46

1. Johdanto

Metsäenergian toimitusketjulle metsästä käyttöön ovat ominaisia useat omistajanvaihdokset, verraten pitkä aikaväli ja useissa eri muodoissa käsiteltävä raaka-aine. Pitkään aikaväliin ja useisiin omistajanvaihdoksiin liittyy tarve oikea-aikaisen mittaustiedon tuottamiseen siten, että kauppahintojen määrittäminen on mahdollista toimitusketjun eri vaiheissa. Toisaalta metsäenergian määrän, laadun ja näiden muutosten tunteminen on tarpeellista hankinta- ja toimitusketjun ohjaamisen kannalta. Määrän ja laadun hallinta – mukaan lukien näissä tapahtuvat muutokset varastointiaikana ja määräsuureiden väliset laskennalliset muunnokset – on oleellista varastomäärien hallinnassa ja kuljetusten ohjauksessa. Isommassa kuvassa varastointiin liittyvät raaka-ainehävikit ja niiden vaikutukset metsäenergian hankintakustannuksiin ja logistiikkaketjun CO₂-päästöihin ovat merkityksellisiä toimitusketjun kokonaisuuden suunnittelussa ja hiilijalanjäljen määrittelyssä.

Tyypillisiä metsäenergian määrää kuvaavia suureita ovat muun muassa kiinto- ja kehystilavuus, paino ja kuivapaino sekä energiasisältö. Siihen, minkä suureen käyttö tulee kulloinkin kysymykseen, vaikuttavat monet tekijät:

1) Käyttötarkoitus ja tarkoituksenmukaisuus:

Kaupallisessa mittauksessa metsänomistajat ja puunhankintaorganisaatiot käyttävät kiintotilavuutta kaupan perusteena. Koska tukin ja kuitupuun kauppahintojen perusteena käytetään vakiintuneesti kiintotilavuutta, mahdollistaa saman suureen käyttö energiapuulla kauppa- ja yksikköhintojen paremman vertailun. Logistiikassa tonnimäärä kuvaa urakointisuorituksen määrää parhaiten, kun taas toimitusketjun loppupäässä esimerkiksi energiasisältö ja kuivapaino kuvaavat raaka-aineen käyttöarvoa tilavuussuureita paremmin.

2) Puutavaralaji ja toimitusketjun vaihe:

Metsäenergian puutavaralaji (ranka, kokopuu, hakkuutähde, edellisistä valmistettu hake) yhdistettynä siihen, mistä korjuu- ja logistiikkaketjun vaiheesta on kysymys, vaikuttaa oleellisesti siihen, mitä suureita on mahdollista käyttää. Korjuun yhteydessä pystytään yleensä tuottamaan arviot metsäenergian tilavuudesta, mutta ei esimerkiksi energiasisällöstä. Kaukokuljetuksen yhteydessä on mitattavissa paino, mutta edes kohtuullisen luotettava tilavuus on määritettävissä yleensä vain hakkeelle. Toimituskohteissa on yleensä määritettävissä energiasisältö.

Mittaussuureita voidaan muuntaa toisiksi laskennallisesti käyttämällä muuntokertoimia. Muuntokertoimia käytetään erityisesti silloin, kun kaupan perusteena oleva mittaustulos täytyy esittää toisen suureen arvoina. Esimerkiksi metsäenergian paino voidaan muuntaa kiintotilavuudeksi tuoretiheyskertoimella. Lisäksi niitä tarvitaan esimerkiksi silloin, kun yksikköhintoja halutaan vertailla eri suureiden välillä. Tuoretiheyden lisäksi tyypillisiä metsäenergiaan liittyviä muuntokertoimia ovat esimerkiksi hakkeen tiiviys (kiinto- ja kehystilavuuden suhde), lämpöarvo (energia painoyksikköä kohti) ja energiatiheys (energia tilavuusyksikköä kohti). Jotkut muuntokertoimet, kuten kuivatuoretiheys (kuivapaino tilavuusyksikköä kohti) tai kosteus (vettä painoyksikköä kohti), kuvaavat myös raaka-aineen laatua ja käyttöarvoa. Kuivatuoretiheys kertoo suoraan kiintotilavuuden sisältämän hyödynnettävissä olevan raaka-aineen

määrän silloin, jos tuotantoprosessia voidaan kuvata painoperusteiseksi. Kosteus puolestaan on linkki raaka-aineen kuivapainon ja energiasisällön määrittämiseen. Yhdessä kuivatuoretiheyden ja kosteuden kautta pystytään määrittämään energiatiheys.

Tavallisesti muuntokertoimia ei pystytä määrittämään mittauseräkohtaisesti, vaan on käytettävä mittausaineistoihin perustuvia keskimääräisiä, yleisesti hyväksytyjä arvoja. Metsäenergian kohdalla keskeiset muuntokertoimet ovat eritavoin puutteellisia. Esimerkiksi metsähakkeen kiinto- ja kehystilavuuden välisissä muunnoissa käytettävät kertoimet perustuvat vanhoihin tutkimusaineistoihin, eivätkä siten välttämättä vastaa nykyisiä käytäntöjä. Vastaavasti metsäenergian painon ja kiintotilavuuden välisissä muunnoissa käytettävät tuoretiheyskertoimet eivät kata kaikkia puutavaralajeja. Kaikissa tapauksissa muuntokerrointen tarkkuudessa ja todenmukaisuudessa on havaittu puutteita.

Metsäenergian kosteus on usein määritettävissä toimituskohteessa, joko kosteusotannalla tai kosteusmittauslaitteilla. Kuten edellä todettua, kosteuden avulla pystytään määrittämään muun muassa vastaanotetun metsähakkeen kuivapaino ja energiasisältö. Metsähakkeen kosteudella on yhteys tuoretiheyteen ja energiatiheuteen. Tuoretiheys on oleellinen paitsi painoperusteisen määrän mittauksen, myös logistiikan näkökulmasta, sillä se vaikuttaa kuljetuskaluston paino- ja tilavuuskapasiteetin hyödyntämiseen. Energiatiheys puolestaan toimii raaka-aineen laadun mittarina energiantuotannossa. Se mahdollistaa myös yksikköhintojen vertailun silloin, kun hinnoittelu tai kustannukset perustuvat tilavuuteen tai energiasisältöön.

Metsäenergian kosteuden mittaaminen ennen käyttöpaikkaan toimittamista ei ole käytännössä mahdollista. Tekniset ja menetelmälliset ratkaisut voisivat olla löydettävissä (esim. Ronkainen ym. 2014), mutta kustannussyiden ja monien käytännöllisten syiden vuoksi soveltaminen ei ole edennyt kokeiluja pidemmälle. Periaatteessa ainoaksi keinoksi jää metsäenergian kosteuden arviointi tai tilastollinen ennustaminen. Metsäenergian kosteuskäyttäytymistä ja kosteuden ennustamista on tutkittu melko laajasti, sekä Suomessa että kansainvälisesti, erityisesti 2000-luvulla (esim. Hakkila 1962, Jirjis 1995, Persson ym. 2002, Pettersson ym. 2007, Filbakk ym. 2011, Erber ym. 2012, Gautam ym. 2012, Jahkonen ym. 2012, Routa ym. 2012, 2015a, 2015b, 2018, Lindblad ym. 2018). Mallinnuksessa on tapauskohtaisesti keskitytty tiettyihin puutavaralajeihin (ranka, hakkuutähde, kokopuu, kuitupuu) ja hankintaketjun vaiheisiin (palsta- tai tienvarsivarastointi). Usein tavoitteena on ollut metsäenergiavarastojen kosteuden ennustaminen puutavaralajin, tarkasteluajankohdan ja varastointiajan sekä mahdollisesti varastointipaikan säähavaintotietojen perusteella.

Kosteusennustemallien pohjalta on laadittu metsäenergian kaupalliseen mittaukseen liittyviä painomittausmenetelmiä. Huomattavasti vähemmän kosteusennustemalleja on pystytty hyödyntämään metsäenergiavarastojen käytön ja logistiikan ohjauksessa. Syyt hitaaseen edistymiseen kosteusennustemallien käytössä metsäenergian laadun hallinnassa liittyvät yhtäältä mallien käytön edellyttämiin järjestelmävaatimuksiin ja muihin vastaaviin teknisluonteisiin vaatimuksiin, mutta toisaalta puutteisiin kosteusennustemallien käytettävyydessä, soveltuvuudessa ja luotettavuudessa. Kosteusennustemallit eivät muodosta yhtenäistä kokonaisuutta eri metsäenergiatavaralajien suhteen. Olemassa olevissa kosteusennustemalleissa on usein niiden käyttöalueeseen liittyviä merkittäviä rajoitteita, jotka käytännössä estävät niiden hyödyntämisen puunhankinnan operatioissa. Tällaisia rajoitteita voivat olla esimerkiksi mallien soveltumattomuus tiettyinä vuodenaikoina tehtävään kosteuden ennustamiseen. Kosteusennustemallien soveltuvuuteen liittyvät puutteet johtuvat yleistäen siitä, että niiden toteutuksessa ei ole riittävästi otettu huomioon operatiivisen käytön käyttöaluetta ja vaatimuksia. Tämä on

voinut johtaa yhtäältä liian yksinkertaistettuihin ratkaisuihin mallinnuksessa ja toisaalta sellaisen tiedon käyttöön mallien laadinnassa, jota ei ole käytettävissä mallien soveltamisvaiheessa. Vähintään osasyö kosteusennustemallien edellä kuvattuihin rajoitteisiin ovat olleet mallien laadinnassa käytettävät laskenta-aineistot. Laskenta-aineistojen pienet havaintomäärät, edustavuuden puutteet ja havaintoarvojen heikko luotettavuus ovat merkittävästi vaikeuttaneet yleistettävien ja käyttökelpoisten mallien laadintaa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli:

- a) Analysoida toimituskosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutuksia hakkuutähdehakkeen energiasisältöön, hankintakustannuksiin ja logistiikkaketjun CO₂-päästöihin.
- b) Kerätä empiirinen tutkimusaineisto metsäenergiakuormien ominaisuuksista katkaen keskeiset metsäenergian määrää ja laatua kuvaavat suureet.
- c) Määrittää empiirisen tutkimusaineiston perusteella muuntokertoimia metsähakkeen määrän mittausta tai eri suureiden vertailua varten paikallisessa metsäenergiakaupassa.

2. Aineistot ja menetelmät

2.1. Hakkuutähteiden kertymä

Arvio päätehakkUILta korjattavissa olevan hakkuutähteen määrästä (m³) perustui olemassa olevaan laskenta-aineistoon (Asikainen ym. 2001), mikä pohjautui kolmen suuren metsäyhtiön leimikkotietoihin vuodelta 2000. Laskennassa hankinta-alueeseen kuuluivat kaikki ne työmaat, joista autokuljetusmatka Kajaanissa sijaitsevalle käyttöpaikalle oli enintään 100 km tieverkkoa pitkin. Työmaakohtaisissa leimikkotiedoissa oli hakkuutavan (päätehakkuu) ja sijaintitiedon ohella kerrottu mm. työmaan pinta-ala (ha), metsäkuljetusmatka (m), hakkuun ajankohta (kk), sekä ainespuukertymä puu- ja puutavaralajeittain (m³).

Kertymälaskelmassa hakkuutähteiden korjuu rajattiin työmaille, joissa kuusen osuus ainespuun kertymästä oli vähintään 50 % ja metsäkuljetusmatka oli enintään 300 m. Lisäksi työmaan hakkuutähteiden kertymän tuli olla vähintään 40 m³ ja hehtaarikertymän yli 30 m³/ha.

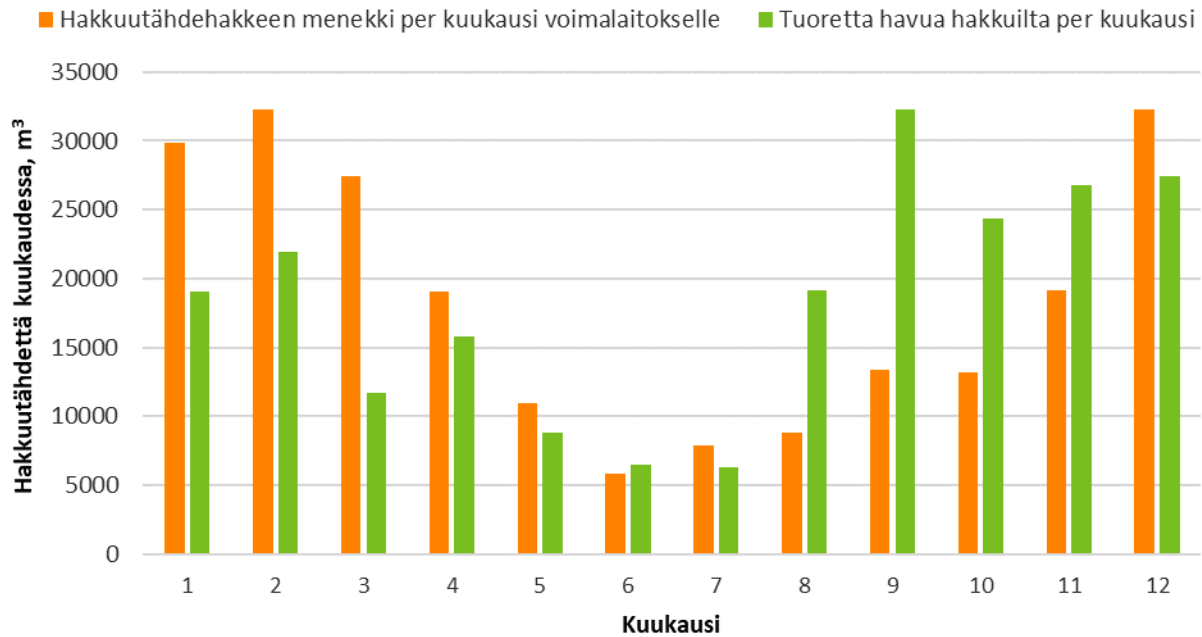
Taulukko 1. Hakkuutähteen tilavuuskertymä suhteessa ainespuun tilavuuteen, kun korjuun talteen saanto on 70 % (Asikainen ym. 2001).

	Etelä-Suomi hakkuutähde / ainespuu	Pohjois-Suomi hakkuutähde / ainespuu
Kuusi hakkuutähde	0,31	0,48
Mänty hakkuutähde	0,15	0,20
Koivu hakkuutähde	0,15	0,25

Hakkuutähteiden osuus suhteessa ainespuumäärään laskettiin Taulukon 1 kertoimien mukaan siten, että Pohjois-Suomen alueeseen kuuluivat Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan maakuntien kunnat ja Etelä-Suomen alueeseen vastaavasti Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan maakuntien kunnat, joiden päätehakkuutyömailta matkaa Kajaaniin oli enintään 100 km tieverkkoa pitkin. Hakkuutähteiden talteen saanto korjuussa oli puolestaan metsänhoitosuosituksen mukaisesti 70 % (Koistinen ym. 2019) hakkuutähteen kokonaisbiomassasta työmaalla (Taulukko 1).

2.2. Hakkuutähteiden varastointiaika

Hakkuutähteiden arvioitu kierto kaatohetkestä energiantuotantoon oli 4–15 kuukautta, koska syyskaudella, eli elokuusta eteenpäin kasoille hakattujen hakkuutähteiden annettiin kuivahtaa seuraavan vuoden kesäkauden yli. Lisäksi kesäkuukausina hakkuutähteiden tarve yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa oli talvikauden kysyntään verrattuna matala, mikä myös pidentäisi varastointiaikoja verrattuna vaihtoehtoon, että kausivaihtelua ei olisi huomioitu varastointiaikojen laskennassa. Keskimäärin hakkuutähteiden varastokierto em. oletuksilla oli 11 kuukautta.



Kuva 1. Hakkuutähdehakkeen arvioitu tarve energiantuotannossa ja päätehakuilta korjattavien hakkuutähteiden kertymä (m^3) hakkuuajankohdan mukaan.

Hakkuutähdehakkeen käytön jakautuminen eri kuukausille arvioitiin kirjallisuuden perusteella (Koskelainen ym. 2006). Hakkuun ajankohta oli puolestaan ilmoitettu leimikkotiedoissa (Kuva 1). Hakkuutähteiden palstalla kuivattaminen on perinteinen keino karistaa ravinnerikkaat ja voimalaitoskattiloiden korroosioriskiä lisäävät neulaset palstalle sekä samalla parantaa materiaalin varastoitavuutta ja laatua.

Kuvassa 1 näkyvä kuusivaltaisten päätehakkuiden painottuminen syyskauteen johtunee normaalin suhdannevaihtelun ohella harvennushakkuiden painottumisesta talvikaudelle suurten metsäyhtiöiden puunkorjuussa. Kevät- ja kesäkaudella tukkivaltaisten päätehakkuiden määrää leikkaa kelirikkokauden ohella sahojen kesälomat ja huoltoseisokit sekä puutavaran kesäkaudella varastointiin liittyvät laaturiskit, kuten mahdolliset väriviat ja hyönteisten aiheuttamat pintavauriot puuainekseen.

2.3. Hakkuutähdehakkeen energiasisältö

Hakkuutähteiden kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutukset hakkeen energiasisältöön (MWh/m^3), hankintakustannuksiin ($€/MWh$) ja logistiikkaketjun CO_2 -päästöihin (kg/MWh) laskettiin tehollisen ja kalorimetrin lämpöarvon (Alakangas 2000) mukaan (Taulukko 2). Tehollisen lämpöarvo mukaan laskettu hakkeen energiasisältö toimituskosteudessa huomioi veden haihtumiseen kuluvan energiahävikin ja vastaa tilannetta, jossa hakkeen käyttöpaikkaa ei ole varustettu kondensoivalla savukaasujen hukkalämmön talteenottojärjestelmällä (Laitila 2024, Leino ym. 2024). Kalorimetrinen, eli ylempään lämpöarvon mukaan määritetty lämpöarvo toimituskosteudessa, kuvaa puolestaan toimintamallia, jossa hakkeen käyttöpaikka on varustettu kondensoivalla kosteiden savukaasujen pesu- ja lämmöntalteenottojärjestelmällä (Laitila 2024, Leino ym. 2024).

Taulukko 2. Hakkuutähdehakkeen tehollinen (alempi lämpöarvo) ja kalorimetrinen (ylempi lämpöarvo) kuiva-aineessa (MJ/kg) puulajeittain (Hakkila 1978, Laitila 2024).

	Tehollinen lämpöarvo MJ/kg	Kalorimetrinen lämpöarvo MJ/kg
Kuusi hakkuutähde	20,5	21,8
Mänty hakkuutähde	19,8	21,1
Koivu hakkuutähde	19,7	21,0

Suomessa lämpöarvo ilmoitetaan tavallisesti kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona (MJ/kg) puu- ja metsähakelajeittain, minkä vuoksi hakkuutähdehakkeen kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo Taulukossa 2 määritettiin laskennallisesti (Laitila 2024) tehollisen lämpöarvon (Hakkila 1978) pohjalta. Kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo on tehollista lämpöarvoa suurempi, koska polttoaineessa olevan vedyn palamisessa muodostuvan veden höyrystymiseen tarvittava energia ei oleteta vähentävän kuiva-aineen lämpöarvoa (Alakangas 2000).

Vertailuanalyseissa hakkuutähdehakkeen toimituskosteus oli 40, 45 tai 50 %. Varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden suuruus oli puolestaan 1–3 % kuukaudessa (Routa ym. 2015, Routa ym. 2018). Taulukossa 3 on esitetty kaatotuoreen hakkuutähdehakkeen puulajikohtaiset kuivatuoretiheydet (kg/m^3) (Hakkila 1978).

Taulukko 3. Hakkuutähdehakkeen kuivatuoretiheys (kg/m^3) puulajeittain kaatotuoreena ilman kuiva-ainehävikkiä (Hakkila 1978).

	Puuaineen kuivatuoretiheys kg/m^3
Kuusi hakkuutähde	395
Mänty hakkuutähde	425
Koivu hakkuutähde	500

2.4. Hakkuutähdehakkeen hankintakustannukset

Hakkuutähdehakkeen hankintakustannukset laskettiin hakkuutähdeiden tienvarsihaketuksen perustuvalla toimitusketjulle työvaiheittain (Kuva 2). Toimitusketjun tuottavuus- ja kustannusparametrit koottiin aiemmista aihepiirin tutkimuksista (Laitila ym. 2016a, 2016b, 2017, Pekkarinen ym. 2024) ja päivitettiin kustannustietojen osalta ajan tasalle metsäalan auto- ja konekustannusindeksin avulla (Tilastokeskus 2024). Vertailuanalyseissä hakkuutähdehakkeen toimitusketjun tuottavuus ja kustannukset määritettiin työmaakohtaisten korjuuolosuhdetietojen (luku 2.1) sekä hakkeen energiasisällön ja painon (luku 2.3) mukaan.

Hakkuutähdeiden oston ja hankinnan organisoinnin ($3,2 \text{ €/m}^3$) oletettiin vastaavan kotimaisen raakapuun hankinnan yleiskustannustasoa (Strandström 2023). Hakkuutähdeiden kantohinta oli $4,3 \text{ €/m}^3$ ja se määritettiin Luken Kainuu-Pohjanmaa hinta-alueen tilastotietokannan avulla (Laitila 2024). Varastoihin sitoutuneen (4–15 kk) pääoman kustannukset laskettiin puolestaan 5 % korkokannan mukaan. Varastoihin sitoutuneeseen pääomaan laskettiin kantohinnan ohella organisoinnin, hakkuutähdeiden kasoille hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannukset (€/m^3).



Kuva 2. Hakkuutähdehakkeen toimitusketju työvaiheittain.

Hakkuutähteen kasaus oli liitetty osaksi ainespuuhakkuuta ja työtavan muutoksen aiheuttama lisäkustannus oli 0,5 €/m³ hakattua ainespuun kiintotilavuutta kohden (Pekkarinen ym. 2024). Suuremman hakkuutähdesaannon ansiosta kasoihin hakkuun kustannus oli kuusikoilla alempi kuin sekametsissä (vrt. kertoimet Taulukko 1). Hakkuutähteille kohdistettuna em. kassakustannus vaihteli työmaan puulajisuhteitten mukaan 1,0–2,1 €/m³ (KA 1,5 €/m³).

Hakkuutähteen metsäkuljetus tievarsivarastolle tehtiin keskiraskaalla kuormatraktorilla, jonka käyttötuntikustannus oli 89 €/h. Metsäkuljetuksen tuottavuudet hakkuutähteen korjuutyömailla laskettiin Asikainen ym. (2001) ajanmenekkimallilla, jossa kuormakohtaista ajanmenekkiä selitettiin kertymällä (m³/ha), metsäkuljetusmatkalla (m) ja kuormatraktorin kuormakoolla (7,8 m³). Edellisellä menetelmällä laskettu tehotuntituottavuus muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,2.

Tienvarteen peittämättömänä varastoitu hakkuutähde hakettiin kuorma-autoalustaisella hakkurilla, ja tuotettu hake kuljetettiin käyttöpaikalle 69 tonnin hakeautoyhdistelmällä (Laitila ym. 2016b). Hakkuutähteen tienvarsihaketuksen tuottavuus oli 132 m³ kehystilavuutta tunnissa (Föhr ym. 2010, Kärhä ym. 2011b) ja haketuskuostannus 14,2 €/m³ (Laitila ym. 2017). Autokuljetuksen hyötykuorma sekä haketusajan ajanmenekki määritettiin hakkeen kuutiopainon perusteella, johon vaikutti työmaan puulajisuhteet, hakkuutähteen kuivatuoretiheys, kuiva-ainetappioiden suuruus, toimituskosteus, hakkeen tiiviys (40 %) ja autokuljetuksen enimmäispainoraja. Hakeautoyhdistelmän kantavuus oli 42 tonnia ja kuormatilan kehystilavuus 157,4 m³ haketta (Laitila ym. 2016b).

Hakkeen autokuljetuksen ajanmenekki kuormattuna ja tyhjänä laskettiin kuljetusmatkan mukaan ajonopeusmalleilla (Nurminen & Heinonen 2007). Kuormakohtaiseen ajanmenekkiin vaikutti lisäksi hakeauton ja perävaunun järjestelyihin haketuksen yhteydessä tienvarsivarastolla kulunut aika (25 minuuttia) sekä hakekuorman purkuun ja punnitukseen käyttöpaikalla kulunut aika (30 minuuttia). Hakeautoyhdistelmän ajotuntikustannus oli 88 €. Hakeauton kuormaukseen (haketus aika), sekä hakekuorman purkuun ja punnitukseen kuluneen ajan tuntikustannus oli puolestaan 58 €.

2.5. Hakkuutähdehakkeen logistiikkaketjun CO₂-päästöt

Hakkuutähdehakkeen hankintaketjun CO₂-päästöt Kajaanin ympäristön työmailla laskettiin kulutetun polttoainemäärän sekä puun varastoinnista aiheutuneiden kuiva-ainetappioiden perusteella. Metsäkoneiden ja hakkurin käyttämästä polttoaineesta kertyi 2 657, hakeautoyhdistelmän käyttämästä polttoaineesta 2 339 grammaa CO₂-päästöjä litraa kohden. Työmatkojen ja työkonien siirtojen aiheuttamat CO₂-päästöt eivät sisällyneet analyysiin. Laskennassa käytetyt polttoaineiden CO₂-päästöluvut olivat peräisin Lipasto-järjestelmästä (LIPASTO 2017).

Päähakkuussa hakkuukoneen tuottavuutena käytettiin 25 m³ ainespuuta, ja polttoaineen kulutuksena 17,3 litraa polttoainetta käyttötunnissa (Laitila & Repola 2023). Kasoillehakuun

arvioitiin alentavan päätehakuun tuottavuutta 10 % (Jylhä ym. 2019), mikä nosti em. tuottavuus- ja kulutusluvuilla polttoaineen kulutusta 0,07 litraa ainespuukuutiometriä kohti (Pekkarinen ym. 2024). Hakkuutähteille kohdistettuna kasaustyön aiheuttama polttoaineen kulutus oli työmaan puulajisuhteitten ja siitä johdetun hakkuutähdekertymän perusteella 0,15–0,3 l/m³ (KA 0,22 l/m³).

Hakkuutähteiden metsäkuljetuksessa kuormatraktorin polttoaineen kulutus oli 12 litraa käytötunnissa (Laitila & Repola 2023), mikä hakkuutähteille kohdistettuna tarkoitti 0,8–1,4 l/m³ (KA 1,1 l/m³) polttoaineen kulutusta Kajaanin ympäristön työmailla. Hakkurin polttoaineen kulutus käytötunnissa oli 59 litraa, eli 1,1 litraa tuotettua hakekiintokuutiometriä (m³) kohden (Kärhä ym. 2011a). Hakeautoyhdistelmän polttoaineen kulutus oli ajossa 62 litraa per 100 km (Laitila ym. 2016b). Hakkeen kuormaukseen, sekä hakekuorman purkuun ja punnitukseen kuuluneen ns. terminaaliajan osalta hakeauton polttoaineen kulutus oli 8 litraa tunnissa (Fjeld ym. 2021).

Varastoinnin aiheuttamien CO₂-päästöjen laskenta perustui oletukseen, että hakkuutähteiden kuiva-aineesta 50 % on hiiltä, joka vapautuu hiilidioksidina varastoinnin aikana tapahtuvassa lahoamisessa. Hiilen määrä tilavuusyksikköä kohti määritettiin hakkuutähteen kuivatuoretiheyden arvosta (kg/m³). Tämä hiilen määrä muunnettiin lahoamisessa vapautuvaksi hiilidioksidiksi kertoimella 3,7 (Laitila ym. 2023). Näin ollen yhdestä kiintokuutiometristä kuusen hakkuutähdettä vapautuisi lahotessaan hiilidioksidia enimmillään 425*0,5*3,7=786 kg. Vertailuanalyseissa kuiva-ainetappioiden suuruus oli 1–3 % per kuukausi ja hakkuutähteiden varastointiaika 4–15 kuukautta (luku 2.2).

2.6. Metsähakkeen empiiriset tutkimusaineistot

2.6.1. Metsähakekuormien mittaustiedot

Tutkimusaineiston rungon muodostivat voimalaitoksille toimitettavien metsähakekuormien mittaustiedot. Tutkimusaineisto koostettiin Kajaanin (Kainuun Voima) ja Oulun (Oulun Energia) voimalaitoksille suoraan tienvarsivarastoista toimitettujen metsähakekuormien vastaanotto- ja mittaustiedoista. Metsähakekuormien vastaanottomittauksen voimalaitoksilla toteutti Prometec Oy, joka myös koosti ja toimitti mittaustiedot Luonnonvarakeskukselle. Mittaustiedot sisälsivät kuormien painon, kehystilavuuden ja kosteuden, sekä taustatietoina kuormanumeron, metsähakelajin ja vastaanottoajankohdan. Kosteus määritettiin kuormakohtaisella kosteusotantamittauksella, jossa hakkeen kokoomanäyte otetaan kuormasta automaattisella näytteenottolaitteella (Q-Robot). Varsinainen kosteuden määrittäminen metsähakkeen analyysinäytteestä tehtiin standardin mukaisella uunikuivausmenetelmällä. Metsähakekuormien mittaustietoja koostettiin projektin alussa takautuvasti ja edelleen projektin aikana siten, että kokonaisuudessaan 3219 kuorman vastaanottoajankohdat olivat välillä 8.9.2022–30.3.2025 (Taulukko 4).

2.6.2. Metsähakekuormien alkuperätiedot

Metsähakekuormien mittaustiedot (kohta 2.6.1) koostettiin Laania Oy:n ja osin MotoTeam Tauriainen Oy:n toimittamista kuormista. Tiedonkeruun rajaaminen suoriin tienvarsitoimituksiin mahdollisti sen, että metsähakekuormille pystyttiin kuormanumeron perusteella hakeamaan alkuperätietoja toimittajan järjestelmästä. Näistä keskeisiä oli tienvarsivaraston

sijaintikunta, korjuuajankohta ja mahdolliset puutavaralajiin liittyvät tarkennukset. Korjuu- ja vastaanottoajankohtien perusteella pystyttiin määrittämään metsähakkeen varastointiaika. Metsähakekuormia, joille määritettiin sijaintikunta, oli 1 118 kappaletta (Taulukko 4).

2.6.3. Kuivatuoretiheyden ja palakokojakauman määrittäminen

Metsähakekuormista otettiin automaattisella näytteenottolaitteella kokoomanäyte, josta otetusta analyysinäytteestä määritettiin kosteus normaalin operatiivisen toimintamallin mukaisesti (kohta 2.6.1.). Kajaanin voimalaitoksella otettujen kosteusnäytteiden rinnakkaisnäytteet – käytännössä kokoomanäytteen kosteusmäärityksestä ylijäävä osa - toimitettiin Luonnonvarakeskuksen Joensuun toimipaikan laboratorioon puuaineen kuivatuoretiheyden määrittämistä varten. Rinnakkaisnäytteiden keruu ja kuivatuoretiheyden määrittäminen kuitenkin rajattiin niihin metsähakekuormiin, joille pystyttiin määrittämään alkuperätiedot (kohta 2.6.2.). Näiden metsähakekuormien vastaanottoajankohdat ja hakenäytteiden keruuajankohdat olivat joulukuu 2023 – maaliskuu 2024 ja syyskuu 2024 – maaliskuu 2025. Kuivatuoretiheyden määrittäminen tehtiin SCAN-standardin mukaisella menetelmällä (SCAN-CM 43:95; Lindblad & Verkasalo 2001) yhteensä 323 metsähakekuorman näytteestä (Taulukko 4).

Kuivatuoretiheyden määrittämisen jälkeen analyysinäytteistä koottiin näytteitä palakokojakauman määrittämistä varten. Riittävän suuri palakokonäyte saatiin yhdistämällä 5–6 samasta puutavaralajista valmistetun hakkeen kuivatuoretiheysnäytettä. Palakokojakauman määrittäminen tehtiin SCAN-standardin (SCAN-CM 40:01) mukaisella menetelmällä 44 näytteestä, joista 40 oli kopuu- ja rankahaketta ja neljä hakkuutähdehaketta.

2.6.4. Säähavainnot ja säämuuttujien muodostaminen

Luonnonvarakeskuksen hankkii Ilmatieteen laitokselta sääaineistoa tutkimuskäyttöön keskinäisen sopimuksen perusteella. Sääaineisto on hilamuotoista (1x1 km) kattaen koko Suomen. Siinä käytetään eri aikaresoluutioita, ja vuorokausiaineiston keskeisiä muuttujia ovat muun muassa keski-, minimi- ja maksimilämpötilat, sadesumma ja ilman suhteellinen kosteus.

Säähavaintoaineisto haettiin rajaamalla haku niihin kuntiin, jotka esiintyvät metsähakekuormien alkuperätiedoissa (kohta 2.6.2.). Aikaväliksi määritettiin aikaisin korjuuajankohta ja viimeisin metsähakekuorman vastaanottoajankohta (30.3.2025). Kuntakohtainen sääaineisto haettiin kuntakeskuksen koordinaattisijaintia lähimmästä hilapisteestä. Kokonaisuudessaan muodostettu säähavaintoaineisto sisälsi havainnot 15 säämuuttujasta. Repola ym. (2021) käyttivät samaa menetelmää määrittäessään kuitupuuerien varastointiajan ja -paikan säähavaintomuuttujia.

Edellä kuvatun säähavaintoaineiston perusteella määritettiin metsähakekuormien säämuuttujat kuorman alkuperän sijainnin ja varastointiajankohdan mukaan. Säämuuttujat laskettiin metsähakekuorman vastaanottoajankohdasta taaksepäin eripituisille aikaväleille (1, 3, 6 ja 12 kuukautta). Määritetyt säämuuttujat olivat ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvot, tehollinen lämpösusma ja sadesumma. Lisäksi määritettiin omina muuttujinaan niiden varastointipäivien lukumäärät, jolloin maassa oli lunta tai vuorokauden maksimilämpötila ylitti +20 celsiusastetta. Kuivumisolosuhdetta kuvaavaksi muuttujaksi määritettiin ilman vesihöyryvaje, joka tässä laskettiin seuraavasti; ilman vesihöyryn kyllästymispaine (hPa) laskettiin vuorokauden keskilämpötilan perusteella käyttämällä laskennassa Tetensin (1930) yhtälöä Sonntagin (1990) määrittämällä parametreilla. Edelleen ideaalikaasun lain (esimerkiksi Atkins ym.,

2018) perusteella laskettiin kyllästymispainetta vastaava suurin mahdollinen vesihöyryn tiheys ilmassa (g/m^3), ja tästä ilman suhteellisen kosteuden perusteella vesihöyryn tiheys. Vesihöyryvaje laskettiin suurimman mahdollisen ja havaitun vesihöyryn tiheyden erotuksena (g/m^3).

Taulukko 4. Metsähakekuormien määrät empiirisessä aineistossa puutavaralajeittain. Kaikista kuormista on kosteusmittaustieto, kuormien osajoukosta alkuperätieto ja edelleen näiden osajoukosta kuivatuoretiheystieto.

	Kuormat, joista kosteusmääritys kpl	Kuormat, joista alkuperätieto kpl	Kuormat, joista kuivatuoretiheysmääritys kpl
Kokopuu- ja rankahake	2 652	935	292
Hakkuutähdehake	463	120	31
Kanto	72	63	0
Puupuru tai puutähde	32	0	0
Yhteensä	3 219	1 118	323

2.6.5. Mittaussuureiden ja mittayksiköiden väliset muuntokertoimet

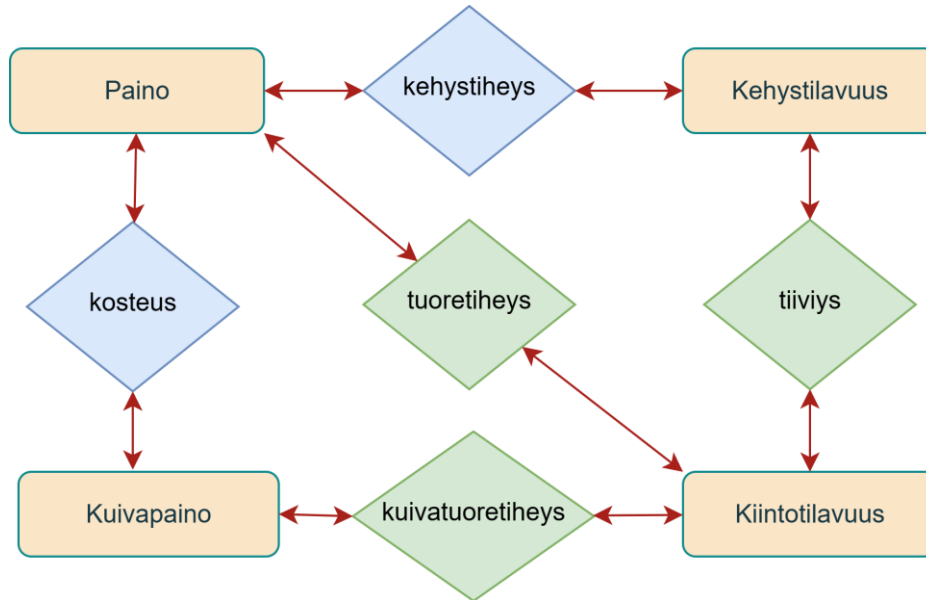
Kuvan 3 kaaviossa on esitetty tämän tutkimuksen aineistossa esiintyviä, sekä aineiston perusteella tarkasteltavia ja määritettäviä metsähakkeen mittaussuureita, sekä näiden välisiä muuntokertoimia. Kaavion kulmien suorakaiteissa ovat metsähakkeen määrää kuvaavat suureet. Muuntokertoimet sinänsä voivat olla myös metsähakkeen ominaisuuksia tai laatua kuvaavia suureita.

Aineiston metsähakekuormien vastaanoton yhteydessä niistä punnittu on *paino* (mittayksikkö kg tai t) ja mitattu *kehystilavuus* (mittayksikkö m^3). Kehystilavuudella tarkoitetaan kuorman, tässä metsähakkeen, ulkomittojen määräämää tilavuutta siten, kuorman sisään jäävä ilmatila on mukana tilavuuden arvossa. Kehystilavuudesta käytetään yleisesti myös nimitystä *irtotilavuus*, yksikkönä m^3 . Mainittakoon, että toimialalla melko tavallinen käytäntö merkitä irtotilavuutta suureet ja yksiköt sekoittavalla lyhenteellä $i\text{-m}^3$ ei ole SI-järjestelmän mukainen (mittayksikkölaki 1156/1993; VNa 1015/2014). Yksikön (m^3) merkintään voi liittää kymmenjärjestelmän mukaisiin kerrannaisiin liittyvän etuliitteen, mutta ei muita merkintöjä. Kuormien painon ja kehystilavuuden suhteena voidaan määrittää *kehystiheys*, yksikkönä kg/m^3 .

Kuormista määritettiin *kosteus* (yksikkönä %) märkäperusteisena (wet basis), eli analyysinäytteen veden painon osuutena puun ja veden kokonaispainosta. Suureen arvot voidaan laskennallisesti muuntaa kuivaperusteisiksi (dry basis), siis veden painon osuudeksi puun painosta. Kuorman *painon* ja *kosteuden* perusteella määritettiin kuorman *kuivapaino* (yksikkö kg tai t).

Kuormille määritettiin *kuivatuoretiheys* (kohta 2.6.3.), jolla tarkoitetaan puun kuivapainon ja tuoreena määritetyn kiintotilavuuden suhdetta (yksikkö kg/m^3). Kuormien *kuivapainon* ja *kuivatuoretiheyden* perusteella määritettiin *kiintotilavuus* (yksikkö m^3). Näistä ovat edelleen määritettävissä metsähakkeen *tiiviyys*, jolla tarkoitetaan kiinto- ja kehystilavuuksien suhdetta (yksikötön suhdeluku). Tiiviyys voidaan määrittää myös prosenttiosuutena, ja siitä käytetään myös nimitystä kiintotilavuusprosentti. *Painon* ja *kiintotilavuuden* suhteena määritettiin *tuoretiheys*

(yksikkö kg/m^3). Nimityksestään huolimatta tuoretiheydellä ei puutavaranmittauksessa tarkoiteta pelkästään kaatotuoreen puun tiheyttä, vaan vakiintuneesti tarkasteluhetken (esimerkiksi vastaanottoajankohta voimalaitoksella) mukaisen puutavaran painon ja kiintotilavuuden suhdetta.

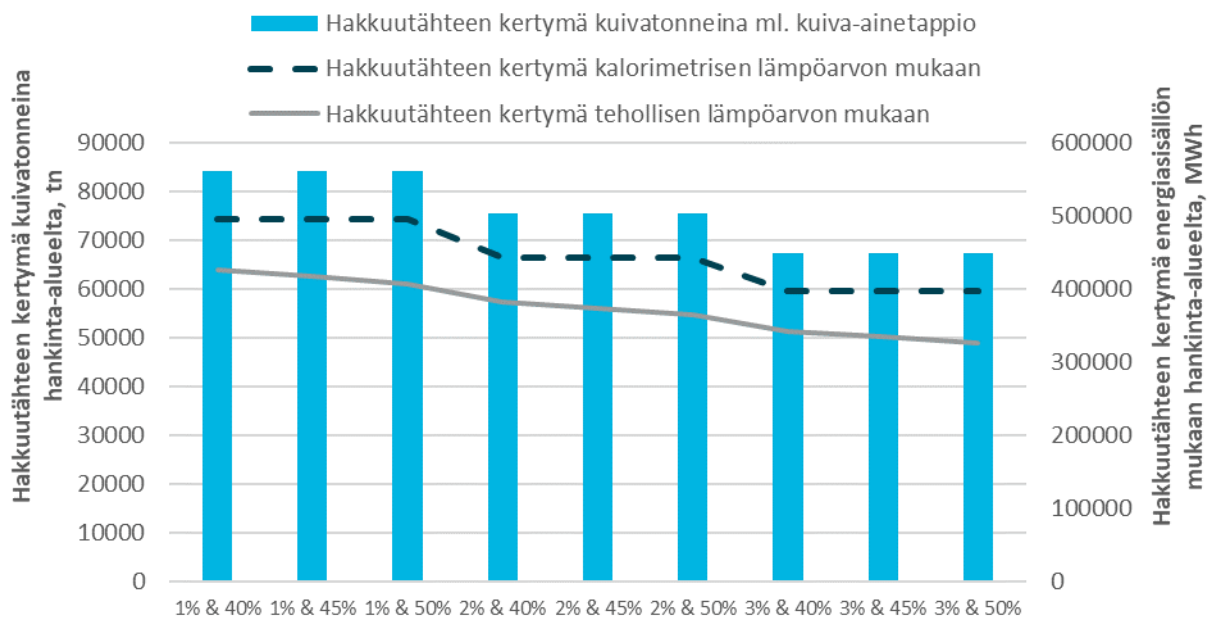


Kuva 3. Metsähakkeen määrää, laatua ja ominaisuuksia kuvaavat mittaussuureet ja niiden väliset yhteydet.

3. Tulokset

3.1. Hakkuutähteiden kertymä ja energiasisältö

Hakkuutähteiden kertymä hankinta-alueelta oli 220 000 m³, mikä hakkuutähteiden kuiva- tuoretiheyden ja puulajisuhteiden perusteella vastasi 94 000 kuivatonna hakkuutähdettä vuodessa, jos kuiva-ainetappioiden vaikutusta ei lasketa. Varastoinnin aiheuttamat kuiva-ainetappiot (1–3 % per kuukausi) huomioiden korjuupotentiaali oli joko 84 000, 75 000 tai 67 000 kuivatonna hakkuutähdettä vuodessa (Kuva 4).



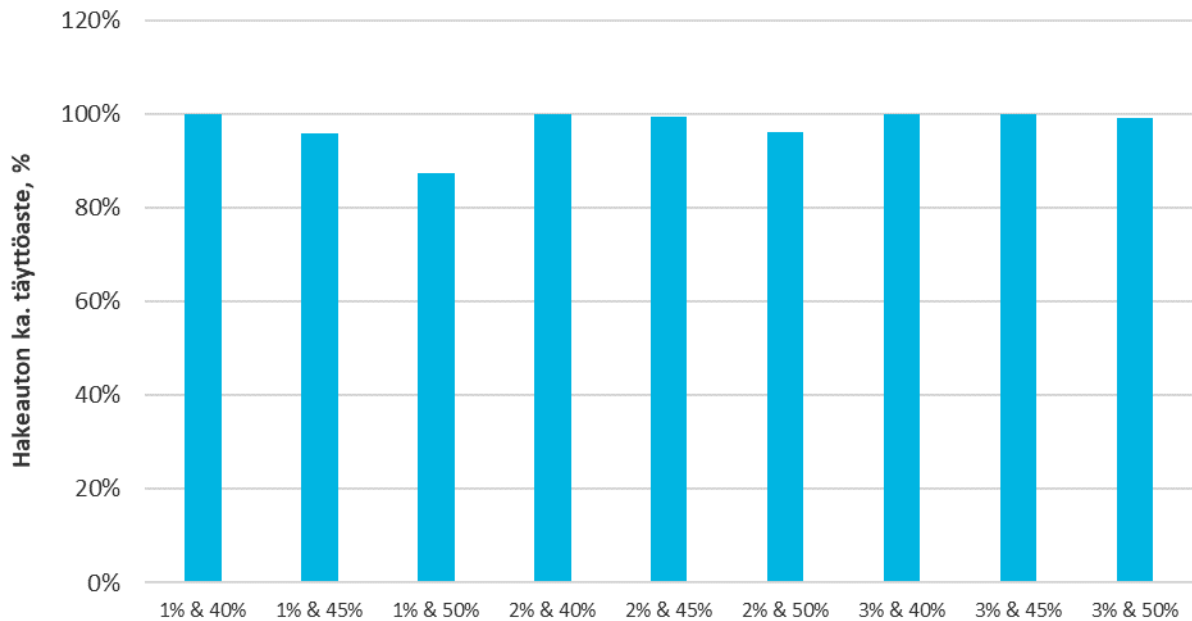
Kuva 4. Hakkuutähteen kertymä hankinta-alueella kuivatonneina sekä hakkeen tehollisen ja kalorimetrin lämpöarvon mukaan, kun kuiva-ainetappiot ovat 1–3 % kuukaudessa ja hakkeen toimituskosteus on 40, 45 tai 50 %.

Hakkuutähteiden kuiva-ainetappiot ja toimituskosteus huomioiden tehollisen lämpöarvon mukainen energiasisältö hankinta-alueella oli 326 000–427 000 MWh vuodessa (Kuva 4), eli kiintokuutiometrin energiasisältö oli 1,5–1,9 MWh/m³. Hakkuutähteiden kalorimetriseen lämpöarvoon vaikutti yksinomaan hakkuutähteiden kuiva-ainetiheys (kg/m³). Tällöin kuiva-ainetappioiden suuruuden mukaan energiasisältö oli 1,8–2,2 MWh/m³ ja hankinta-alueen hakkuutähteiden energiasisältö 397 000–495 000 MWh vuodessa (Kuva 4).

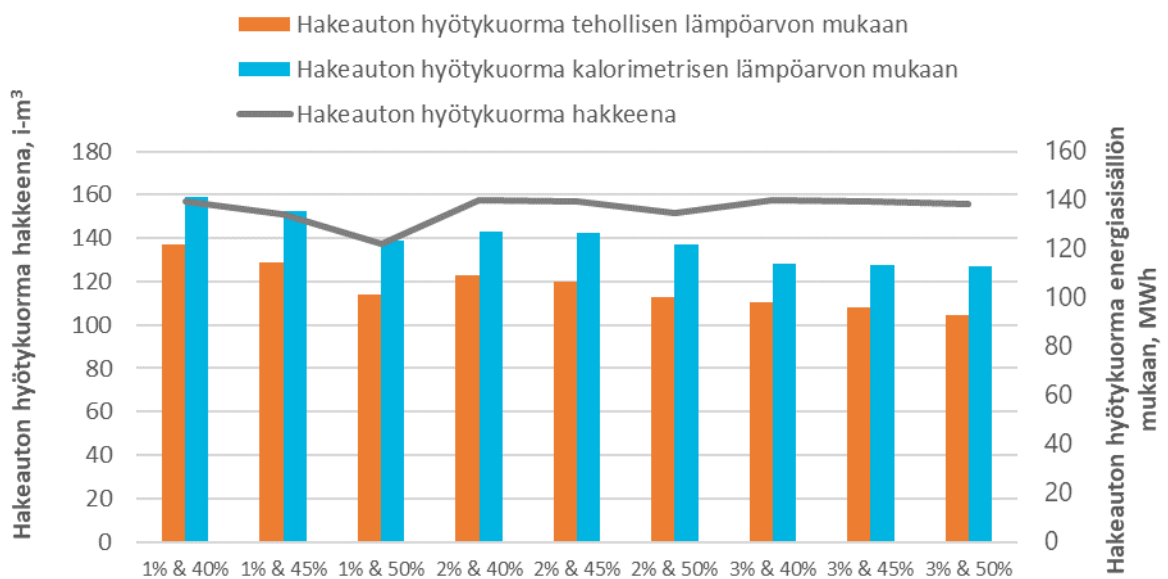
3.2. Autokuljetuksen hyötykuorma

Hakeauton kuormatilan keskimääräinen täyttöaste hakkeen painon mukaan oli 87–100 % (Kuva 5), mikä hakekuutiometreinä (= irta) tarkoitti 137,3–157,4 m³ kehystilavuuden mukaista kuormakokoa (Kuva 6). Hakkeen ollessa kostea (50 %) tai kun varastoinnista johtuvat kuiva-ainetappiot olivat pienet (1 % kuukaudessa), hakekuormat piti jättää hieman vajaiksi. Energiasisällön mukaan mitattuna suurimmat hyötykuormat saatiin, kun varastoidun hakkuutähteen kuiva-ainetappiot olivat pienet ja toimituskosteus matala. Tehollisen lämpöarvon mukaan

mitattuna hakeauton ka. hyötykuorma oli 93–122 MWh ja kalorimetrisen lämpöarvon mukaan mitattuna 113–141 MWh (Kuva 6).



Kuva 5. Hakeauton kuormatilan ka. täyttöaste hakkuutähdehakkeella, %.

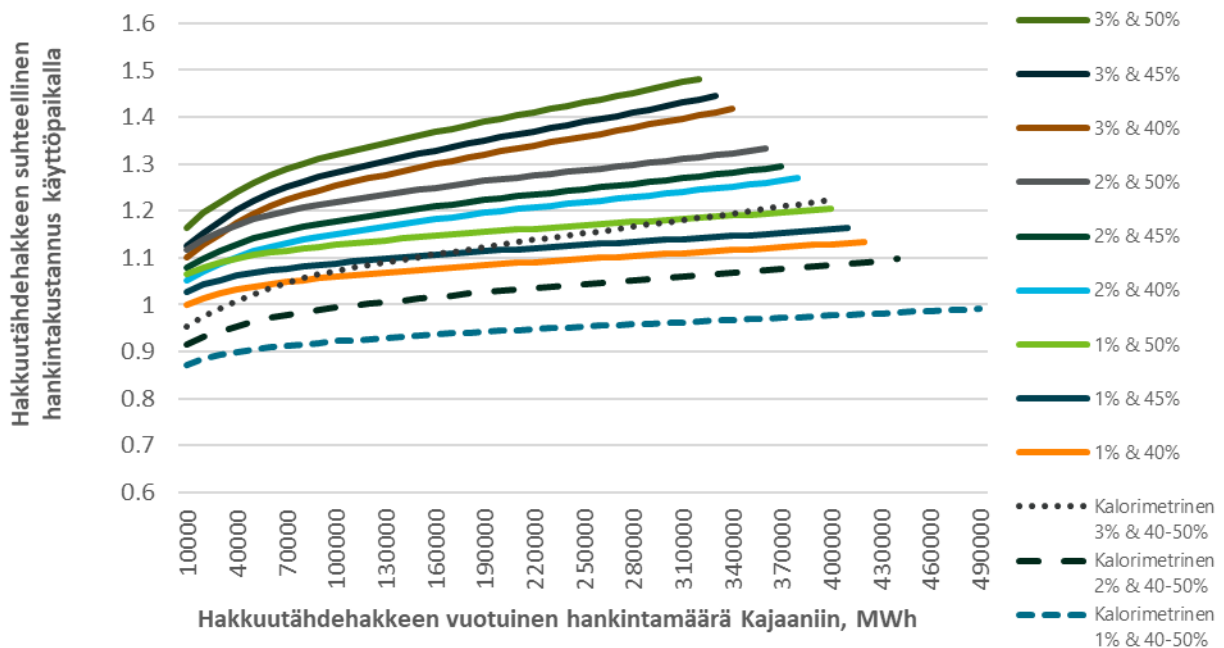


Kuva 6. Hakeauton keskimääräinen hyötykuorma hakkeena (i-m³) sekä hakkeen tehollisen ja kalorimetrisen lämpöarvon (MWh) mukaan.

3.3. Kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutus hankintakustannuksiin

Hankintakustannuslaskennassa hankinta-alueen päätehakkuu työmaat järjestettiin taulukko-laskentapohjassa korjuu- ja kuljetuskustannusten mukaan edullisimmasta kalleimpaan. Tämän jälkeen laskettiin hakkeen hankintamäärien mukainen hankintakustannus (€/MWh), eli margi-naalikustannus työmaakohtaisten kertymien ja kustannusten perusteella. Vertailtavuuden pa-rantamiseksi hankintakustannukset ilmaistiin suhdeluvun avulla niin, että hankintakustannus oli 100 %, kun hakkuutähdehakkeen vuotuinen hankintamäärä oli 10 000 MWh tehollisen lämpöarvon mukaan ja kun hakkeen toimituskosteus oli 40 % sekä varastoinnin kuiva-aine-tappiot 1 % per kuukausi.

Hankintamäärien kasvu nosti hakkuutähdehakkeen hankintakustannusta (Kuva 7), koska han-kintamäärien kasvaessa korjuu on ulotettava entistä epäedullisemmille kohteille ja laajem-malle alueella käyttöpaikan ympäristössä. Vastaavasti hankintakustannukset olivat sitä korke-ammatt, mitä suuremmat varastoidun hakkuutähdehakkeen kuiva-ainetappiot olivat tai mitä kos-teempaa käyttöpaikalle toimitettu hake oli.



Kuva 7. Hakkuutähdehakkeen suhteelliset hankintakustannukset Kajaaniin hankintamäärän mukaan, kun hakkeen toimituskosteus oli 40–50 % ja varastoinnin aiheuttamat kuiva-ainetap-piot 1–3 % kuukaudessa.

Kosteus ja kuiva-ainetappiot pienensivät hakkuutähdehakkeen energiasisältöä, mikä laski au-tokuljetuksen hyötykuormaa ja nosti kaukokuljetuksen kustannuksia. Lisäksi märkää ja lahon-nutta hakkuutähdehaketta oli hankittava laajemmalla alueella verrattuna tilanteeseen, että hakkeen energiasisältö olisi ollut suurempi. Keskinäisessä vertailussa hakkuutähdehakkeen kuiva-ainetappioilla oli pääsääntöisesti suurempi vaikutus hankintakustannuksiin, kuin hakkeen toi-mituskosteudella pl. alle 40 000 MWh hankintamäärät (Kuva 7).

Kuiva-ainetappioiden nousu 1 %:sta 2 %:iin nosti hakkuutähdehakkeen hankintakustannusta käyttöpaikalla 8 %, kun hakkeen toimituskosteus oli 45 % ja vuotuisen hankintamäärän oli 100 000 MWh. Vastaavasti kuiva-ainetappioiden noustessa kolmeen prosenttiin kuukaudessa,

hankintakustannus oli 18 % suurempi (Kuva 7). Vastaavalla 100 000 MWh hankintamäärällä kosteuden vaikutus hankintakustannuksiin oli maltillisempi, eli toimituskosteuden nousu 40 prosentista 45 prosenttiin nosti hakkuutähdehakkeen hankintakustannusta 2–3 % ja 5–6 %, kun toimituskosteus oli 50 % (Kuva 7).

Paremmen energiatehokkuuden ansiosta hukkalämmön talteenotolla varustettu CHP-laitos tarvitsi kuivamassoina mitaten vähemmän haketta, minkä ansiosta polttoaine oli hankittavissa maantieteellisesti pienemmältä alueelta, otollisemmilta korjuukohteilta ja tavanomaista pienemmin hankintakustannuksin (Kuva 7). Tehollisen lämpöarvon mukaan laskettuihin hankintakustannuksiin verrattuna kalorimetrinen lämpöarvon mukaan lasketut hankintakustannukset olivat noin 16–17 % alemmat (Kuva 7).

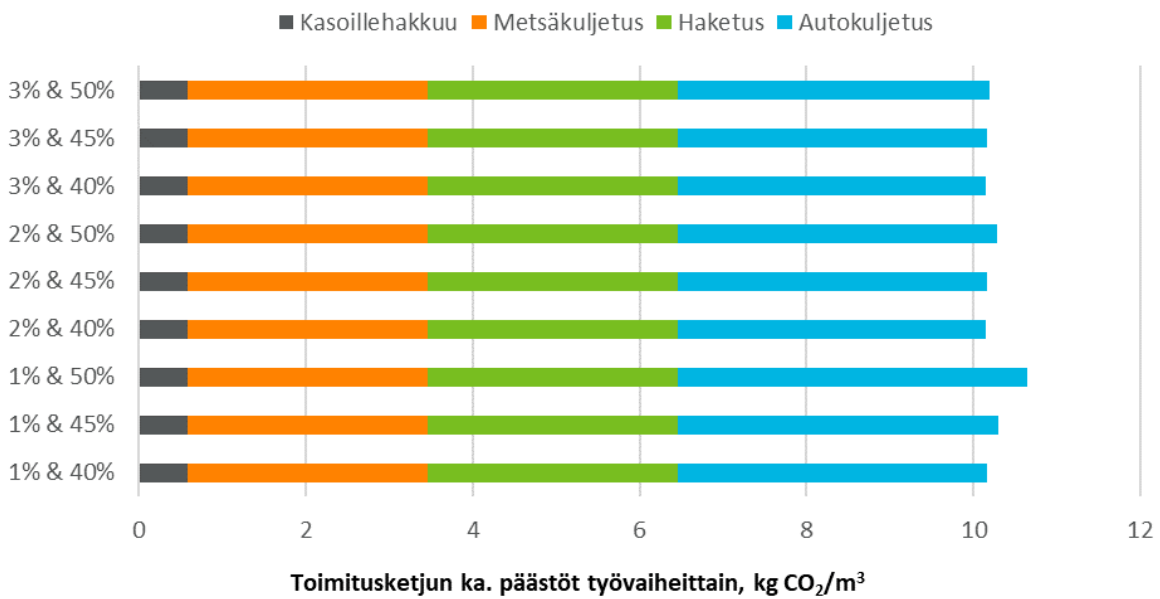
Hankintamäärän ollessa 100 000 MWh vuodessa, hakkuutähteen kuiva-ainetappioiden nousu yhdestä prosentista kahteen tai kolmeen prosenttiin nosti hakkeen hankintakustannusta 8 % ja 16 %, kun hakkeen energiasisältö määritettiin kalorimetrinen lämpöarvon mukaan (Kuva 7). Sen sijaan hakkeen toimituskosteuden nousu 40 prosentista 45 tai 50 prosenttiin nosti hakkeen hankintakustannusta ainoastaan 0,6–1,5 %, 0,2–0,9 % tai 0,04–0,3 %, kun hakkuutähteen varastoinnin kuiva-ainetappiot olivat 1 %, 2 % tai 3 % kuukaudessa. Erojen pienuuden takia kalorimetrinen lämpöarvon ja kuiva-ainetappioiden (1 %, 2 % ja 3 %) mukaan määritetyt hakkeen hankintakustannuskuvaajat kuvassa 7 kattavat hakkeen toimituskosteudet 40–50 %.

Kondensoivalla savukaasujen pesu- ja lämmöntalteenottojärjestelmällä varustetuilla käyttöpaikoilla, hakkeen toimituskosteuden vaikutus hankintakustannuksiin heijastui lähinnä kohonneiden kuljetuskustannusten kautta, jos kattilateknologia ei asettanut rajoitteita kosteiden polttoaineiden käytölle ja hyötysuhteelle energiantuotannossa. Edellä mainitusta syystä hukkalämmön talteenottoteknologiaa hyödyntävillä käyttöpaikoilla hakkuutähdehakkeen hankinnassa tulisikin ensisijaisesti pyrkiä minimoimaan varastoinnista aiheutuvaa kuivamassahävikkiä ja vasta toissijaisesti hakkeen toimituskosteutta, kuten kuvasta 7 käy hyvin ilmi.

3.4. Kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutus logistiikkaketjun CO₂-päästöihin

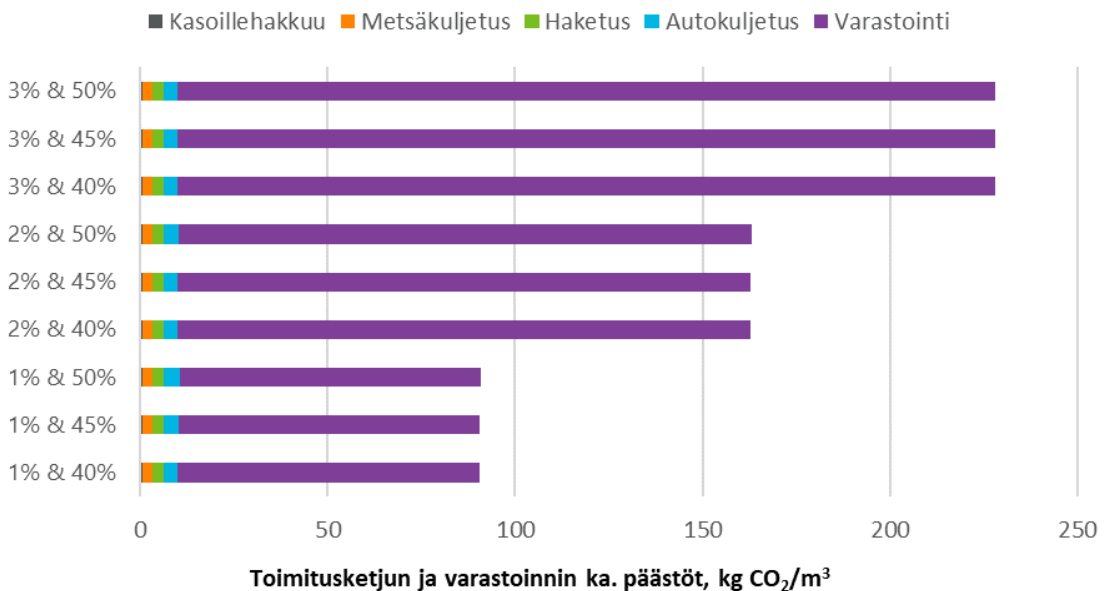
Kosteuden ja kuiva-ainetappioiden vaikutukset toimitusketjun CO₂-päästöihin olivat maltilliset, kun eri työvaiheiden polttoaineen kulutukset ja niistä johdetut CO₂-päästöt määritettiin Kajaanin ympäristön työmaille aritmeettisena keskiarvona hakkuutähdehakkeen kiintotuotusta kohden (kg CO₂/m³) (Kuva 7). Yhteen laskettuna korjuun, haketuksen ja autokuljetuksen CO₂-päästöt olivat 10,15–10,64 kg CO₂/m³ (Kuva 8).

Hakkuutähteen toimituskosteudella ja varastoinnin kuiva-ainetappiolla ei arvioitu olevan vaikutusta kasoillehakuun, metsäkuljetuksen tai haketuksen polttoaineen kulutukseen tai tuottavuuteen, mikä vuoksi päästöluvut eri työvaiheille olivat samat eri vaihtoehtojen välillä (Kuva 8). Kasoillehakuun CO₂-päästöt olivat 0,58 kg CO₂/m³, metsäkuljetuksen 2,88 kg CO₂/m³ ja haketuksen 2,99 kg CO₂/m³ (Kuva 8). Autokuljetuksessa hakkuutähdehakkeen paino vaikutti kuorman täyttöasteeseen (Kuva 5 ja 6) ja sitä kautta autokuljetuksen tuottavuuteen, sekä niistä johdettuihin päästölukuihin. Hakekuorman koon mukaan autokuljetuksen CO₂-päästöt olivat 3,74–4,19 kg CO₂/m³ (Kuva 8).



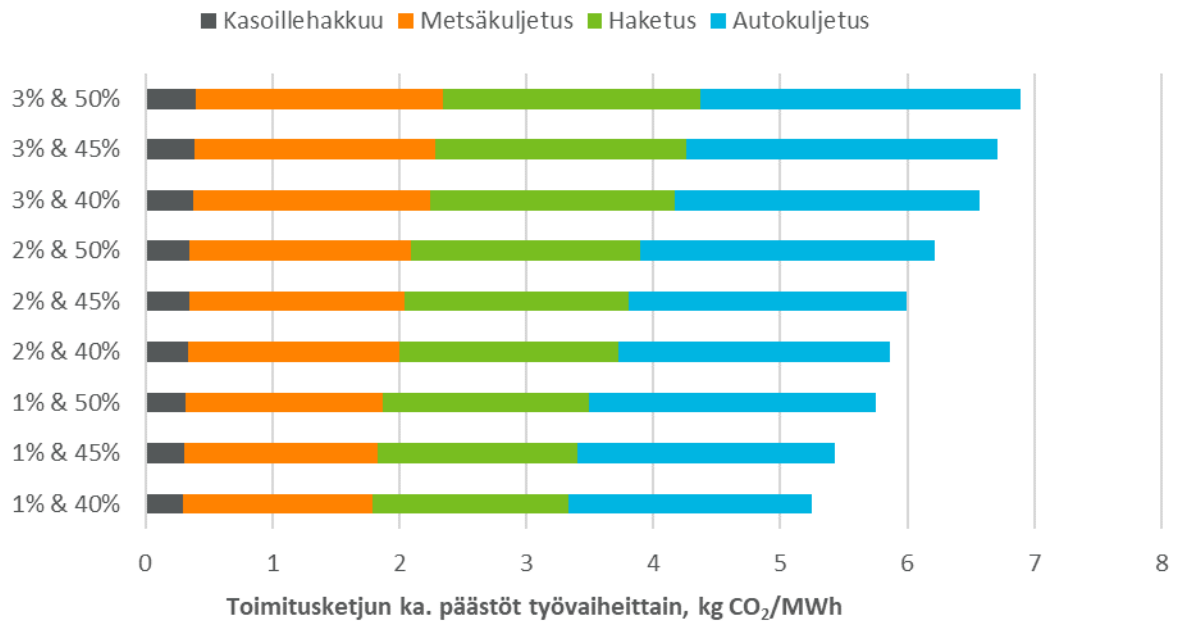
Kuva 8. Hakuutähdehakkeen toimitusketjun CO₂-päästöt työvaiheittain per m³.

Kuiva-ainetappioiden vaikutus varastoinnin CO₂-päästöihin oli sen sijaan huomattava. Kun kuiva-ainetappioiden suuruus oli 1–3 % per varastointi kuukausi, olivat varastoinnin CO₂-päästöt 80–218 kg CO₂/m³ (Kuva 9). Yhteen laskettuna logistiikkaketjun, eli korjuun, haketuksen, autokuljetuksen ja varastoinnin CO₂-päästöt olivat 90,55–227,88 kg CO₂/m³ sen mukaan, mitä hakkeen toimituskosteus ja varastoinnin kuiva-ainetappiot olivat (Kuva 9).

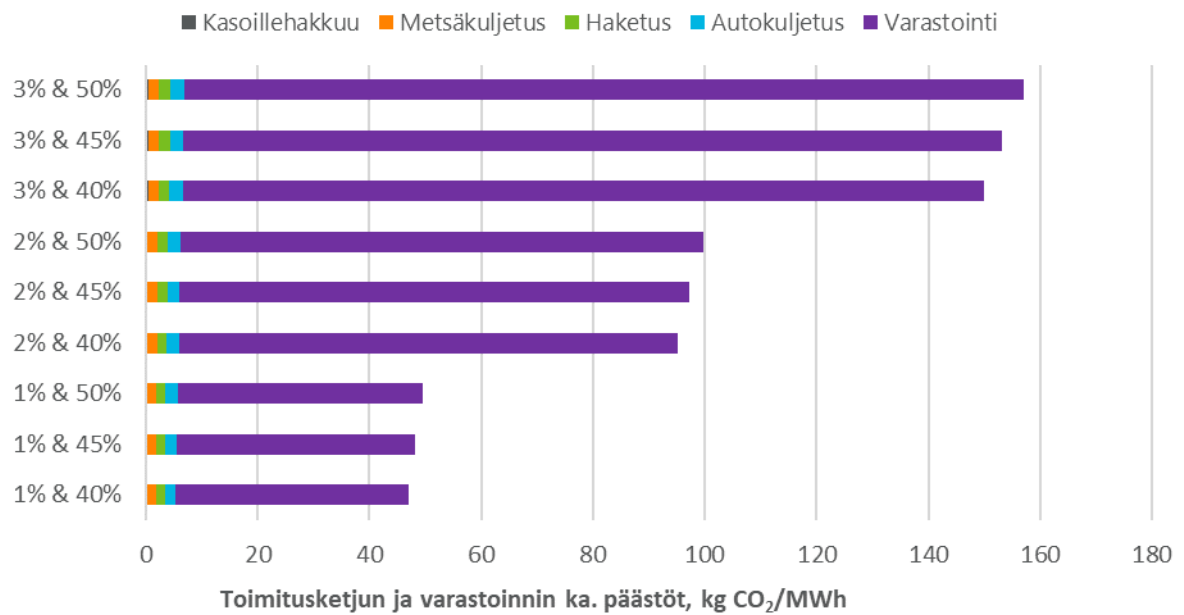


Kuva 9. Hakuutähdehakkeen logistiikkaketjun CO₂-päästöt työvaiheittain per m³.

Hakkeen tehollisen lämpöarvon (MWh/m³) mukaan laskettuna toimitus- ja logistiikkaketjun päästöt olivat sitä pienemmät, mitä alemmat varastoinnin kuiva-ainetappiot ja hakkeen toimituskosteus olivat (Kuva 10 ja 11). Yhteen laskettuna korjuun, haketuksen ja autokuljetuksen CO₂-päästöt olivat 5,25–6,89 kg CO₂/MWh (Kuva 10) ja varastoinnin päästöt huomioiden 47,07–157,02 kg CO₂/MWh (Kuva 11).



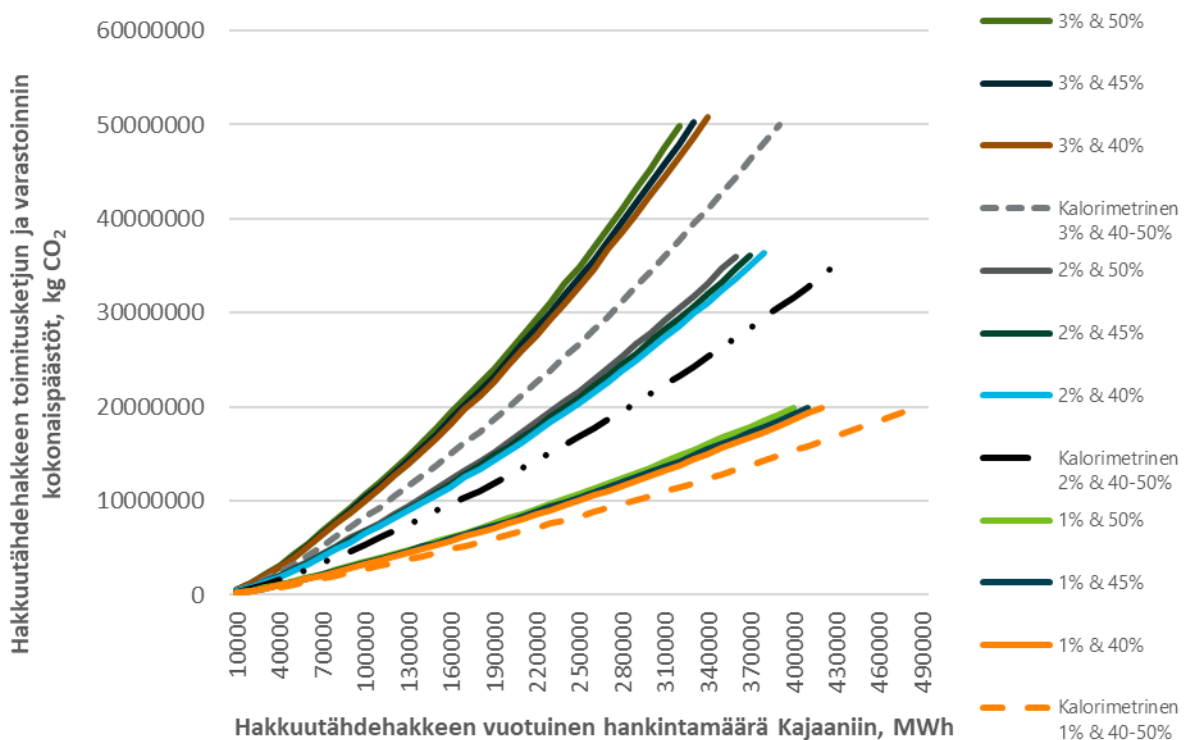
Kuva 10. Hakuutähdehakkeen toimitusketjun CO₂-päästöt työvaiheittain hakkeen tehollisen lämpöarvon mukaan.



Kuva 11. Hakuutähdehakkeen logistiikkaketjun CO₂-päästöt työvaiheittain hakkeen tehollisen lämpöarvon mukaan.

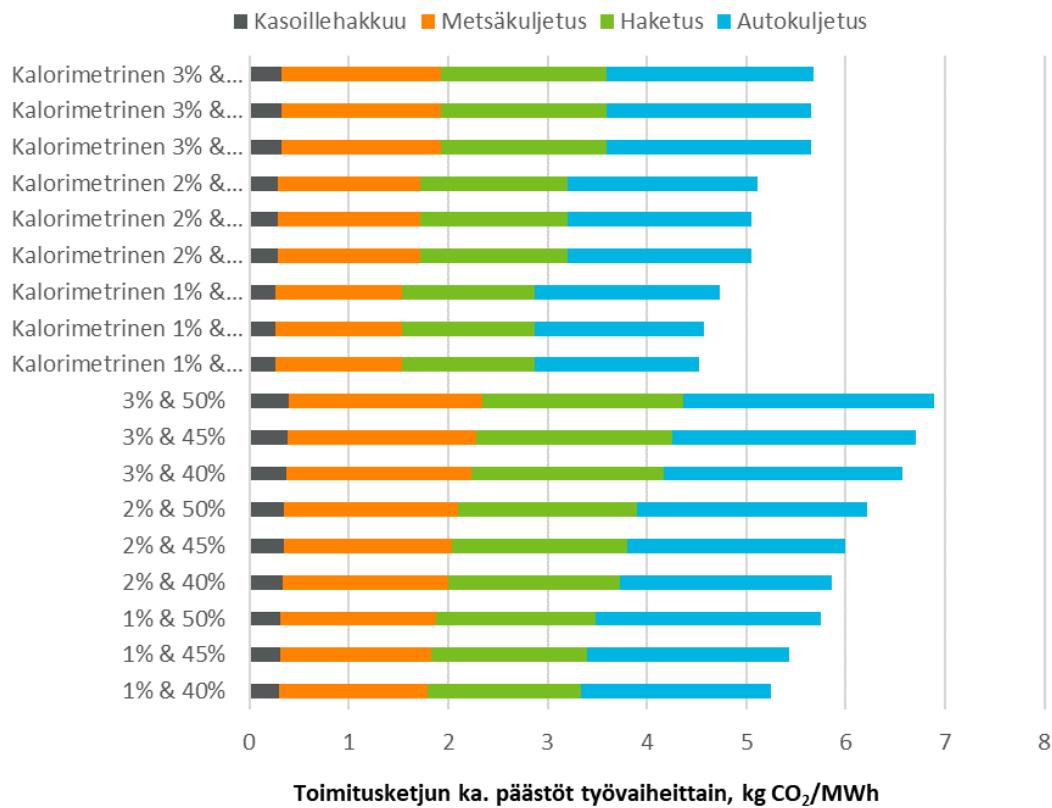
3.5. Hukkalämmön talteenoton vaikutus logistiikkaketjun CO₂-päästöihin

Hukkalämmön talteenotolla hakkuutähdehakkeen kuiva-aineesta sai 17–21 %, eli noin 70 000 MWh enemmän energiaa verrattuna käyttöpaikkaan, jota ei ollut varustettu kondensoivalla savukaasujen hukkalämmön talteenottojärjestelmällä (Kuva 12). Paremman energiatehokkuuden ansiosta laitos tarvitsi vähemmän haketta, joka oli hankittavissa maantieteellisesti pienemmältä alueelta, mikä kuvastui pienempinä toimitus- ja varastointiketjun CO₂-kokonaispäästöinä hankinta-alueella (Kuva 12). Hukkalämmön talteenoton avulla hakkuutähdehakkeen toimitusketjun ka. CO₂-päästöjä oli mahdollista leikata 0,73–1,22 kg CO₂/MWh (Kuva 13). Vastaavasti logistiikkaketjun päästöt pienenevät hakkeen paremman energiasisällön ansiosta 6,54–27,85 kg CO₂/MWh (Kuva 14).

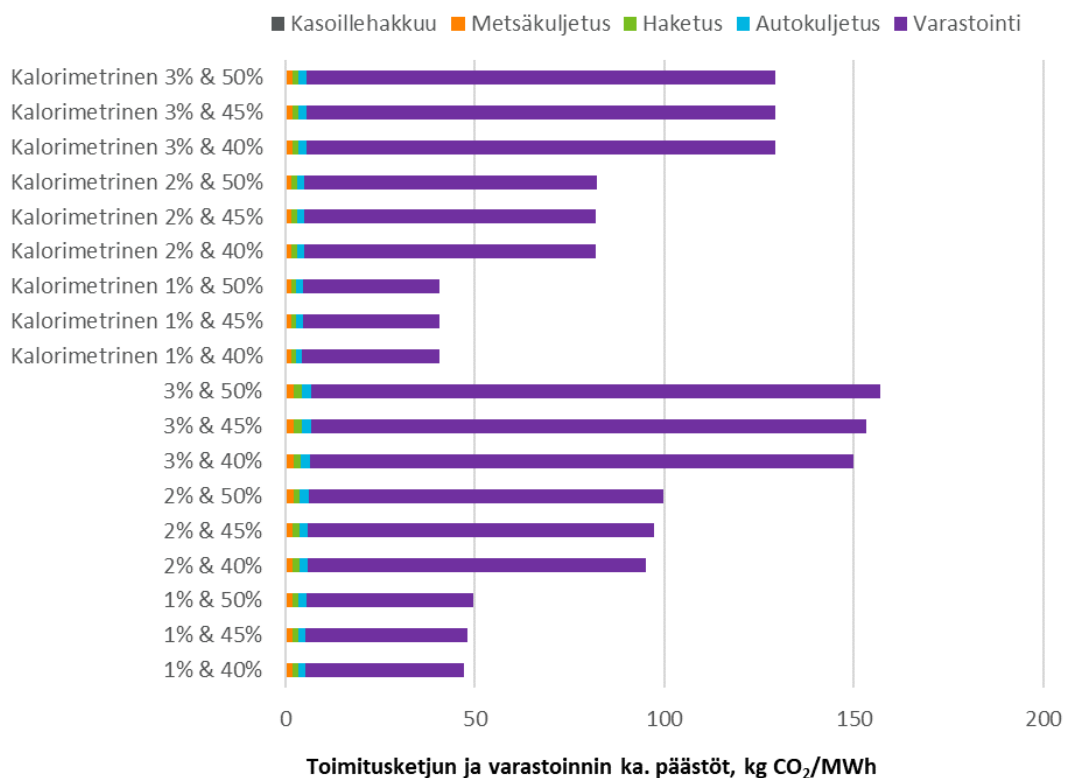


Kuva 12. Hakkuutähdehakkeen logistiikkaketjun kokonaispäästöt (kg CO₂) Kajaaniin hankintamäärän (MWh) mukaan, kun hakkeen energiasisältö oli laskettu tehollisen ja kalorimetrisen lämpöarvon mukaan.

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 70/2025



Kuva 13. Hakuutähdehakkeen toimitusketjun CO₂-päästöt työvaiheittain hakkeen kalorimetrin ja tehollisen lämpöarvon mukaan.

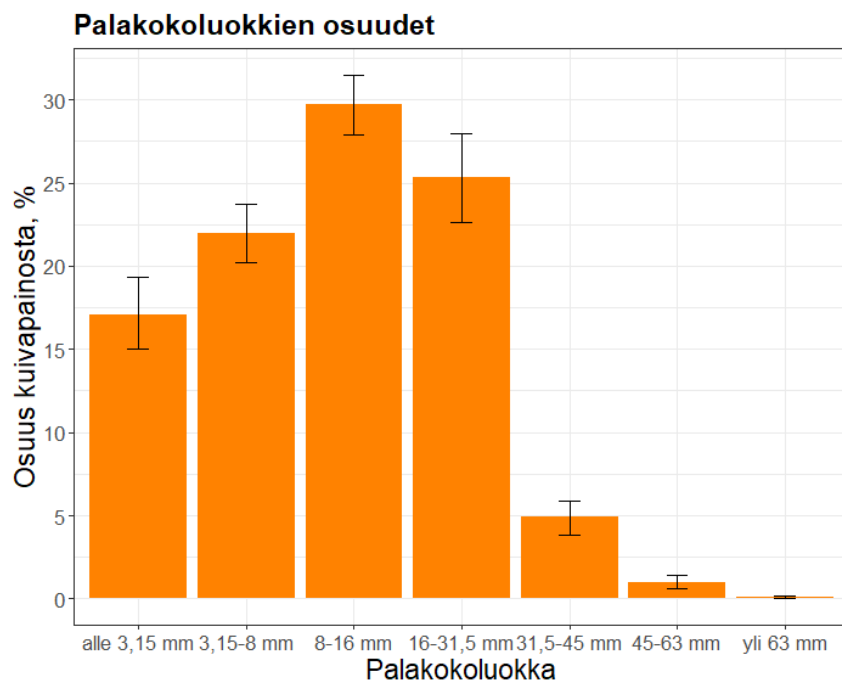


Kuva 14. Hakuutähdehakkeen logistiikkaketjun CO₂-päästöt työvaiheittain hakkeen kalorimetrin ja tehollisen lämpöarvon mukaan.

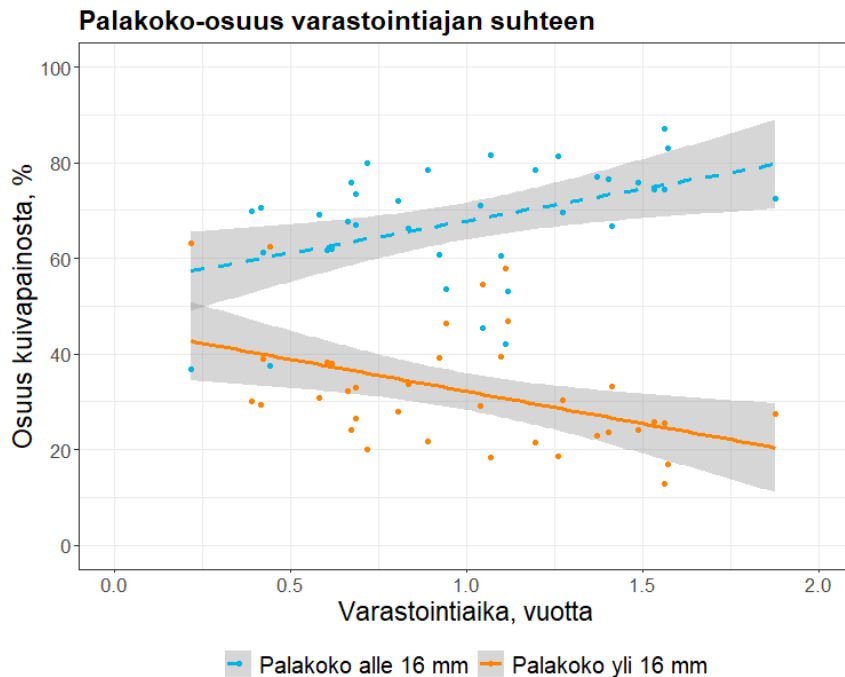
3.6. Metsähakkeen palakokojakauma

Kuvassa 15 on esitetty metsähakkeen (kokopuu- ja rankahake 4 havaintoa, hakkuutähdehake 4 havaintoa) palakokojakauma palakokoluokkien kuivapaino-osuuksina. Pylväs osoittaa palakokoluokan kuivapaino-osuuden keskiarvon ja virhepalkki keskiarvon 95 prosentin luottamusvälin. Palakokoluokassa 8–16 mm oli noin 30 prosenttia, ja yhdistetyissä palakokoluokissa <3,15–31,5 mm noin $\frac{3}{4}$ metsähakkeesta. Pienimmän jakeen (<3,15) osuus oli 17 prosenttia. Suurten, yli 31,5 mm jakeiden osuus oli pieni, yhteensä noin kuusi prosenttia. Tulosten virhemarginaali palakokoluokittain (95 prosentin luottamusvälin leveys) oli enimmillään $\pm 2,7$ prosenttiyksikköä ja useimmissa palakokoluokissa noin kaksi prosenttiyksikköä.

Kuvassa 16 on tarkasteltu pienten (alle 16 mm) ja suurten (yli 16 mm) palakokoluokkien osuutta kokopuu- ja rankahakkeella varastointiajan suhteen. Kuvassa pisteet ovat yksittäisiä havaintoja ja viivat ovat lineaarisia regressiokäyriä. Varjostettu alue ilmaisee lineaarisen ennusteen epävarmuuden, toisin sanoen millä alueella todellinen keskiarvotrendi sijaitsee 95 prosentin todennäköisyydellä. Tulos viittaa yhteyteen palakokojakauman ja varastointiajan välillä siten, että pienten palakokoluokkien kuivapaino-osuus kasvaa varastointiajan suhteen. Tässä aineistossa muutos oli noin 13 prosenttiyksikköä vuodessa.



Kuva 15. Metsähakkeen kuivapaino-osuuden (%) keskiarvot ja keskiarvon 95 prosentin luottamusvälit palakokoluokittain.



Kuva 16. Kokopuu- ja rankahakkeen pienten (alle 16 mm) ja suurten (yli 16 mm) palakokoluokkien kuivapaino-osuus (%) varastointiajan suhteen.

3.7. Metsähakkeen tiiviys

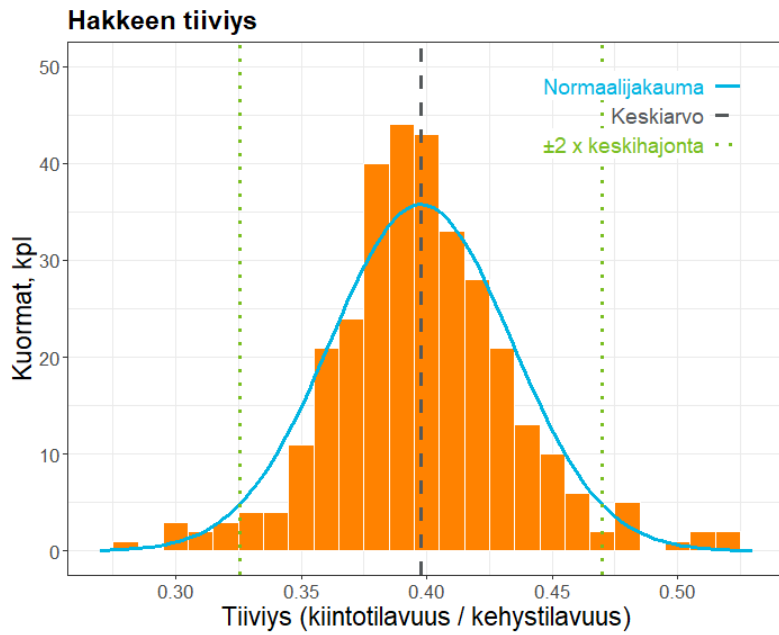
Metsähakkeen tiivyyttä tarkastellaan tässä kiintotilavuuden ja kehystilavuuden yksiköttömänä suhdelukuna. Kokopuu- ja rankahakkeen tiivyyden keskiarvo oli 0,395 (Taulukko 5), mikä vastaa metsähakkeen tiivydelle vakiintuneesti käytettävää muuntokerrointa 0,40. Keskiarvon virhemarginaali (95 % luottamusväli) oli $\pm 0,004$, mikä tämän aineiston perusteella tarkoittaa sitä, että todellinen tiivyyden keskiarvo on välillä 0,39–0,40 (39–40 %). Hakkuutähdehakkeen tiivyyden keskiarvo oli korkeampi (0,417). Huomattavasti pienemmän havaintomäärän vuoksi myös tuloksen virhemarginaali on selvästi korkeampi; todellinen metsätähdehakkeen tiivyyden keskiarvo on tämän aineiston perusteella 0,40–0,43 (40–43 %).

Kuvassa 17 on esitetty metsähakkeen tiivyyden havaintomäärien jakauma, sekä tiivyyden keskiarvoa ja -hajontaa vastaava normaalijakauma. Koko aineistossa tiivyyden keskiarvo oli hieman alle 0,40 ja normaalijakaumaan perustuva tiivyyden 95 prosentin vaihteluväli ($\pm 2 \times$ keskihajonta) 0,33–0,47 (Kuva 17). Suhteellisena tämä tarkoittaa ± 18 prosentin vaihtelua keskiarvon ympärillä, mikä on syytä huomata käytettäessä tiivyyden keskilukuja kuormakohtaisina muuntokertoimina.

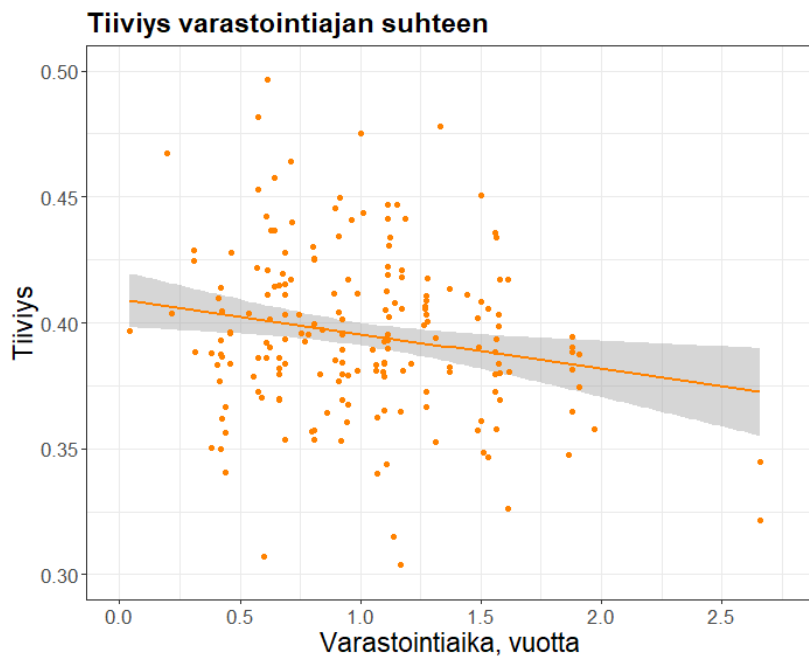
Kuvassa 18 on tarkasteltu kokopuu- ja rankahakkeen tiivyyttä varastointiajan suhteen. Pisteet ovat yksittäisten kuormien havaintoja ja suora ja varjostettu alue ilmaisevat lineaarisen ennusteen ja sen epävarmuuden. Tulos viittaa siihen, että hakkeen tiiviys laskee hieman varastointiajan suhteen. Tässä aineistossa muutos oli noin 0,015 (1,5 prosenttiyksikköä) vuodessa.

Taulukko 5. Metsähakekuormien tiivyyden (kiinto- ja kehystilavuuden suhde) keskiarvot, keskihajonnat ja keskiarvon virhemarginaalit (95 % luottamusvälin puolikas) hakelajeittain.

Hakelaji	Kuormien määrä n	Tiiviyys		
		keskiarvo	keskihajonta	virhemarginaali (±)
Kokopuu- ja rankahake	292	0,395	0,036	0,004
Hakkuutähdehake	31	0,417	0,032	0,012



Kuva 17. Metsähakkeen tiivyyden havaintojen jakauma, keskiarvo, keskiarvon ja keskihajonnan määrittämä normaalijakauma ja 95 % ennusteväli (± 2 x keskihajonta).



Kuva 18. Kokopuu- ja rankahakkeen tiiviyys varastointiajan suhteen.

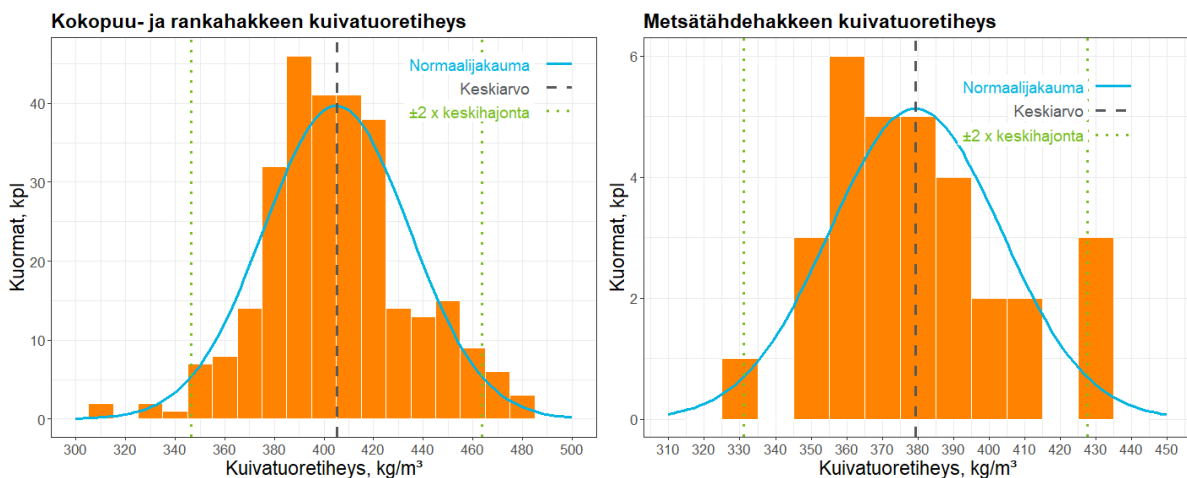
3.8. Metsähakkeen kuivatuoretiheys

Kokopuu- ja rankahakkeen ja hakkuutähdehakkeen kuivatuoretiheydet poikkesivat toisistaan (Taulukko 6). Kuivatuoretiheyden keskiarvot olivat kokopuu- ja rankahakkeella 405 kg/m^3 (95 % luottamusväli 402–408) ja hakkuutähdehakkeella 379 kg/m^3 (95 % luottamusväli 371–388). Kokopuu- tai rankahakkeella kuivatuoretiheyshavainnot ovat kohtuullisen hyvin normaalijakauman mukaisia (Kuva 19) ja keskiarvon virhemarginaali on suurehkon havaintomäärän vuoksi melko pieni. Molemmilla hakelajeilla kuivatuoretiheyden keskihajonta oli suurehko (Taulukko 6). Metsäenergiatavaralajeilla kuivatuoretiheyden vaihteluväliä ja keskihajontaa nostavat eri puulajien ja rungonosien osuuksien vaihtelut kuormien välillä, sekä oletettavasti myös erot varastointiajoissa.

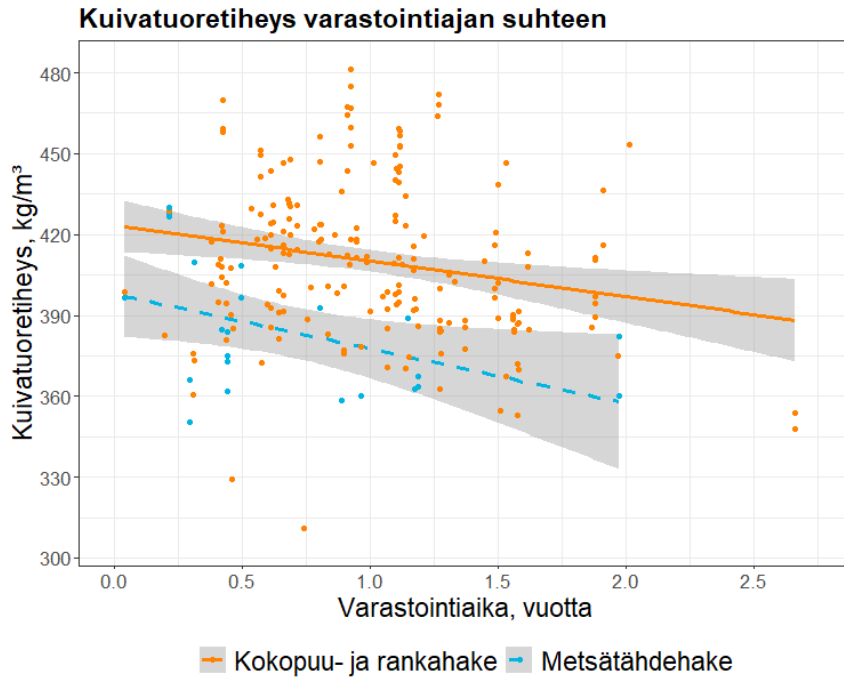
Kuva 20 antaa viitteen siitä, että metsäenergian kuivatuoretiheys alenee varastointiajan suhteen. Kysymys on siis kuiva-ainetappiosta. Tässä aineistossa kuivatuoretiheyden keskimääräinen alenema oli kokopuu- ja rankahakkeella noin 13 kg/m^3 ja hakkuutähdehakkeella noin 20 kg/m^3 vuodessa. Suhteellisina edelliset tarkoittavat kokopuulla ja rangalla noin kolmen prosentin, ja hakkuutähdeellä noin viiden prosentin muutosta kuiva-ainesisällössä vuodessa. Erityisesti hakkuutähdehakeen kohdalla (Kuva 20) on huomattava tuloksen suuri epävarmuus sekä kuivatuoretiheyden tasossa että muutoksen nopeudessa varastointiajan suhteen. On myös oletettavaa, ettei ilmiö ole lineaarinen; vuodenaika ja lämpötila vaikuttavat. Tämä aineisto antoi viitteen siitä, että kokopuulla- ja rangalla kuiva-ainehäviön nopeus voisi olla keskimääräiseen verrattuna suuruusluokkaa kaksinkertainen, kun varastointaika ylittää yhden vuoden.

Taulukko 6. Metsähakkeenäytteiden kuivatuoretiheyden (kg/m^3) keskiarvot, keskihajonnat ja keskiarvon virhemarginaalit (95 % luottamusvälin puolikas) hakelajeittain.

Hakelaji	Havaintojen määrä n	Kuivatuoretiheys, kg/m^3		
		keskiarvo	keskihajonta	virhemarginaali (\pm)
Kokopuu- ja rankahake	292	405	29	3,4
Hakkuutähdehake	31	379	24	8,9



Kuva 19. Kokopuu- ja rankahakkeen (vas.) ja hakkuutähdehakkeen (oik.) kuivatuoretiheyden havaintojen jakauma, keskiarvo, keskiarvon ja keskihajonnan määrittämä normaalijakauma ja 95 % ennusteväli ($\pm 2 \times$ keskihajonta).

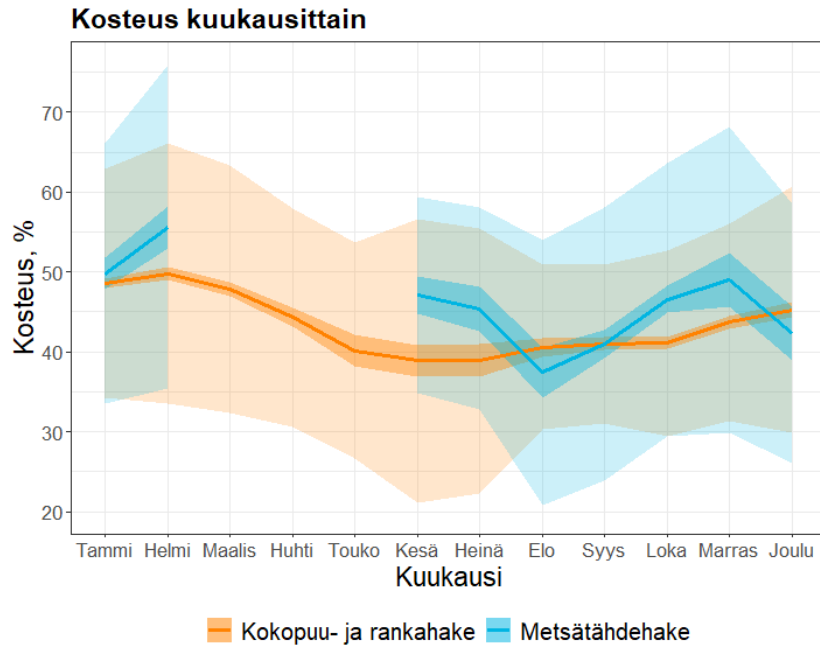


Kuva 20. Kokopuu- ja rankahakkeen ja hakkuutähdehakkeen kuivatuoretiheys (kg/m^3) varastointiajan suhteen.

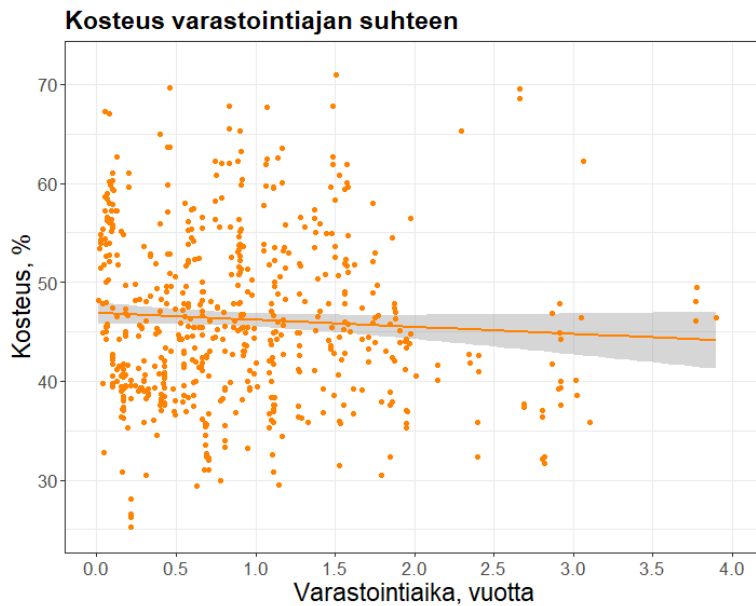
3.9. Metsähakkeen kosteus

Metsäenergian kosteus toimitettaessa vastaanottoon noudatti tyypillistä vuodenaikavaihtelua, jossa kosteus alimmillaan kesäkuukausina (Kuva 21). Kokopuu- ja rankahakkeen suhteellisen suuri havaintomäärä ($n = 2\,652$) vähensi satunnaisvaihtelun vaikutusta, mikä osaltaan näkyi kosteuden kuukausittaisen keskiarvojen johdonmukaisuutena. Kokopuu- ja rankahakkeen kosteuden keskiarvo oli kesällä hieman alle 40 prosenttia, mutta talvella lähes 50 prosenttia. Vastaavasti hakkuutähdehakkeen selvästi pienempi havaintomäärä ($n = 463$) ja puuttuminen joiltakin kuukausilta heikensi tarkastelun luotettavuutta.

Kuvassa 21 tummat vyöhykkeet keskiarvokäyrien ympärillä ilmaisevat keskiarvon virhemarginaalia (95 % luottamusväli). Kokopuu- ja rankahakkeella keskiarvojen luottamusvälit ovat suuren havaintomäärän vuoksi melko kapeita ja kertovat keskiarvojen hyvästä tarkkuudesta. Tämä hyvä tilastollinen tarkkuus ei kuitenkaan poista sitä, että esimerkiksi raaka-aineen muutosten tai olosuhdevaihteluiden vuoksi vuosien välillä voi olla merkittäviä systemaattisia eroja kosteuden tasossa. Vaaleammat vyöhykkeet kuvaavat kosteushavaintojen 95 prosentin ennusteväliä, toisin sanoen noin 95 kosteushavaintoa sadasta olisi tällä vyöhykkeellä. Yksittäisiä kuormia ja tienvarsivarastoja tarkasteltaessa kosteuden vaihtelu on suurta.



Kuva 21. Kokopuu- ja rankahakkeen ja hakkuutähdehakkeen vastaanottokosteuden keskiarvo (viiva), keskiarvon 95 prosentin luottamusväli (tumma vyöhyke) ja 95 prosentin ennusteväli (vaalea vyöhyke) kuukausittain.



Kuva 22. Metsähakkeen kosteus varastointiajan suhteen.

Metsähakkeen kosteuden ja varastointiajan välillä ei havaittu selvää riippuvuutta (Kuva 22). Tämä voi johtua useista tekijöistä; kosteuden määrittäjäajankohdat eri vuodenaikoina, varastointiaikojen ajoittuminen eri vuodenaikoihin ja pitkien varastointiaikojen aikana kosteudet ovat muuttuneet molempiin suuntiin. Nämä tekijät yhdessä häivyttävät mahdolliset selvät yhteydet.

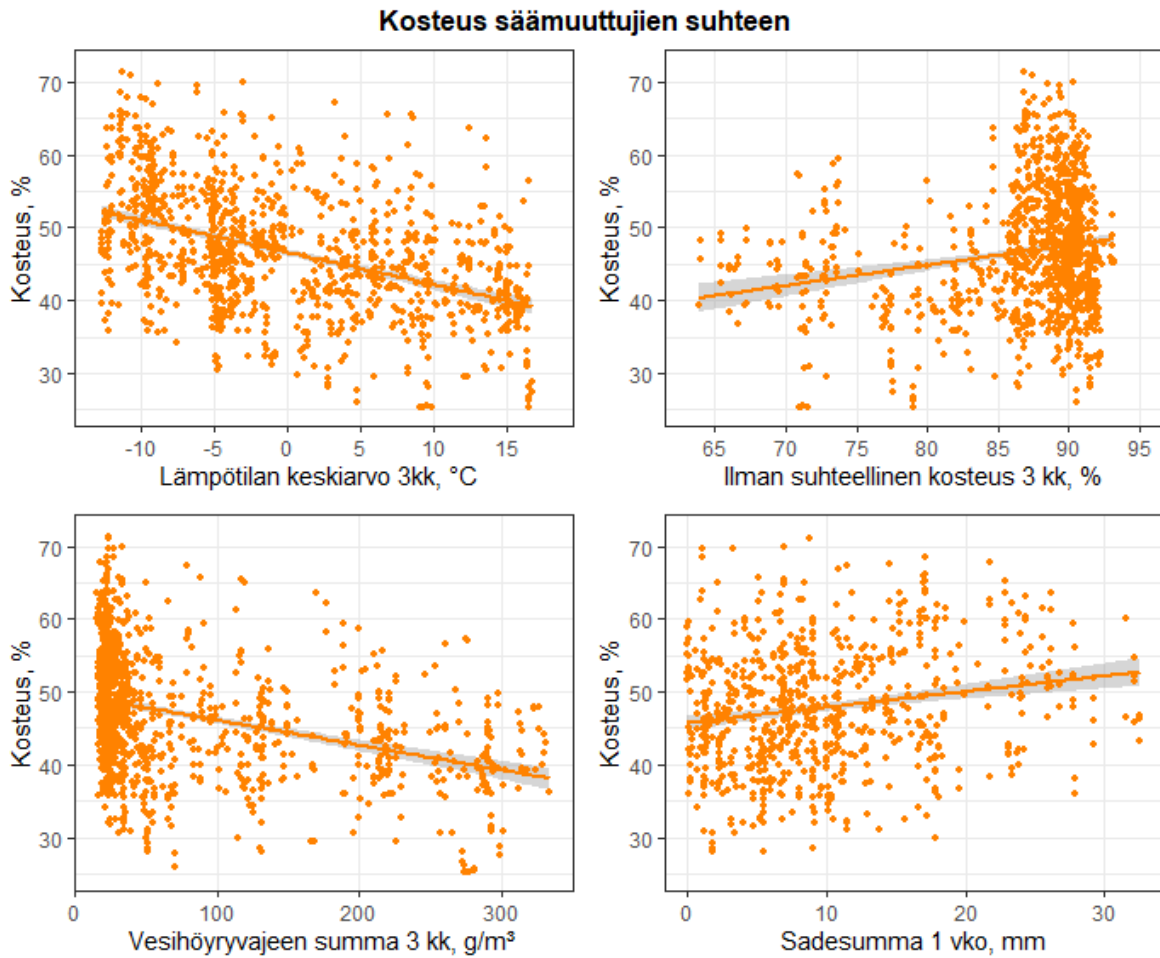
Kosteuden tasoa tarkasteltiin varastointiajan- ja paikan säätiedoista laskettujen säämuuttujien suhteen. Säämuuttujien laskentaa ei tehty pitkille varastointiajoille kokonaisuudessaan, vaan valituille aikaväleille (12 kk, 6 kk, 3 kk, 1 kk ja 1 vko) varastointiajan lopussa ennen

kosteusmäärityksen ajankohtaa. Tarkasteluissa on syytä ottaa huomioon se, että tässä aineiston kosteushavaintojen määrä painottuu talvikuukausiin.

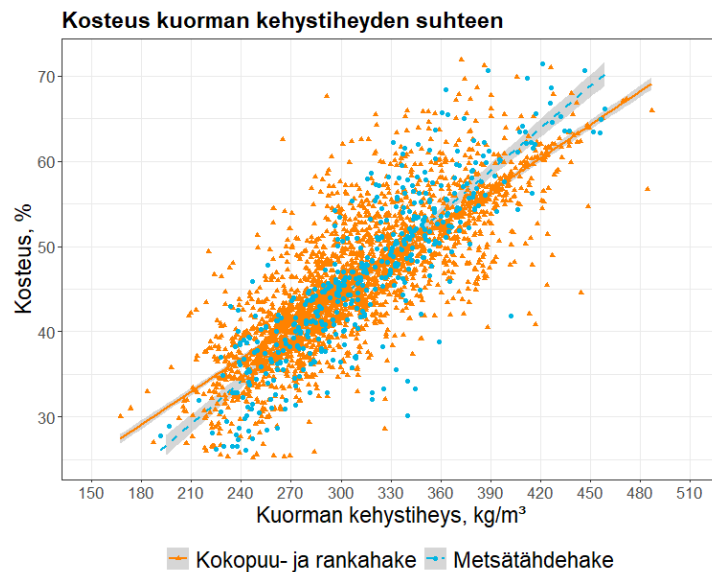
Lämpötilaan perustuvissa muuttujissa, joita olivat lämpösumma ja lämpötilan keskiarvo, varastointiajan viimeisten kolmen kuukauden lämpötilan keskiarvolla oli selvä riippuvuus kosteuden tasoon (Kuva 23). Todennäköisesti tätä pidemmällä aikavälillä eri vuodenaikojen olosuhteet sekoittuvat ja yksittäinen lämpötilamuuttuja enää kuvaa olosuhdetta riittävän tarkasti siten, että riippuvuus kosteustasoon tulisi esille. Vastaavasti lyhyemmällä aikavälillä lämpötila ei ehdi vaikuttaa kosteustasoon. Tarkastelu tehollisen lämpösumman suhteen tuotti periaatteessa vastaavan tuloksen. Tämän muuttujan tulkintaa ja käytettävyyttä kuitenkin vaikeuttaa se, että aineistossa luonnollisesti esiintyi runsaasti nolla-arvoja tehollisessa lämpöarvossa.

Vuorokauden lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden keskiarvojen kautta määritetty ilman vesihöyryvajeen summa korreloi negatiivisesti kosteuden kanssa (Kuva 23). Tässäkin havainnot painottuvat vesihöyryvajeen pieniin arvoihin, toisin sanoen pääosin talvikauden havaintoihin. Muuttuja sai keskimäärin pienimmät arvonsa helmikuussa ja suurimmat elokuussa. Metsähakkeen kosteudella ja ilman suhteellisen kosteuden keskiarvolla oli positiivinen korrelaatio (Kuva 23). Tässäkin havainnot ryhmittäytyivät pääosin talvikaudella havaittuihin ilman suhteellisen kosteuden korkeisiin arvoihin.

Metsähakkeen kosteuden ja sadesumman välinen riippuvuus ei ole yksiselitteinen. Pitkillä varastointiajoilla korrelaatiota ei ole, tai se käyttäytyy epäjohdonmukaisesti. Tämä johtuu siitä, että kosteuteen vaikuttavat samanaikaisesti useat tekijät, jotka ovat keskenään korreloituja. Tällöin sadesumman vaikutus ei välttämättä erotu tarkasteluissa. Kuvassa 23 on tarkasteltu lyhyellä aikavälillä, yhdelle viikolle, määritetyn sadesumman vaikutusta kosteuteen. Samanaikaisesti muiden tekijöiden vaikutusta on pienennetty valitsemalla tarkasteluun ne havainnot, joilla yhden viikon lämpötila keskiarvo oli alle nolla celsiusastetta. Tulos ilmentää sitä, että lyhyellä aikavälillä ja rajatussa tilanteessa metsähakkeen kosteuden ja sadesumman välillä on positiivinen korrelaatio.



Kuva 23. Metsähakkeen kosteus varastointiajan loppuosan (3 kk tai 1 vko) säähavaintomuuttujien suhteen; lämpötilan kolmen kuukauden keskiarvo, ilman suhteellisen kosteuden kolmen kuukauden keskiarvo, ilman vesihöyryvajeen kolmen kuukauden summa ja yhden viikon sadesumma. Sadesumman tarkastelussa aineistoa on rajattu niihin havaintoihin, joissa yhden viikon lämpötilan keskiarvo oli alle nolla celsiusastetta.



Kuva 24. Metsähakkeen kosteus kuorman kehystiheyden (kg/m^3) suhteen.

Metsähakkeen kosteudella ja kuormasta mitattujen painon ja kehystilavuuden suhteena määritetyllä kehystiheydellä (kg/m^3) oli vahva positiivinen korrelaatio ($r = 0,75$). Ajatellen kosteuden ennustamista on mitatuilla muuttujilla mahdollisuus selvästi parantaa ennustetarkkuutta. Kehystiheyden arvoon kosteuden lisäksi taustalla vaikuttavia tekijöitä ovat puuaineen kuivatuoretiheys ja hakkeen tiiviys, joiden vaihtelu lisää epävarmuutta kehystiheyden käytössä kosteuserennustamisessa.

3.10. Tuoretiheyden, kuivatuoretiheyden ja kosteuden yhteisvaihtelu

Puun kuivatuoretiheys (KTT) ja tuoretiheys (TT) määritetään kaavoilla 1 ja 2.

$$KTT = \frac{m_{puu}}{V_{puu}} \quad (1)$$

$$TT = \frac{m_{puu} + m_{vesi}}{V_{puu}} \quad (2)$$

, joissa m_{puu} on puun kuivapaino, m_{vesi} on veden paino ja V_{puu} on puun kiintotilavuus tuoreena. Kaavoista nähdään, että tuoretiheyden ja kuivatuoretiheyden erotuksena saadaan veden määrä tilavuusyksikköä kohden (kg/m^3). Toisaalta kosteus (%) määritellään tunnetulla tavalla puun kuivapainon ja veden painon perusteella. Tuoretiheys voidaan myös määrittää kosteuden ja kuivatuoretiheyden perusteella kaavalla 3.

$$TT = \frac{KTT}{(100 - MC_{wet})} \times 100 \quad (3)$$

, jossa MC_{wet} on märkäperusteinen kosteusprosentti.

Puun suurimmalla mahdollisella kosteudella tarkoitetaan tilannetta, jossa soluontelot ja -seinämät ovat veden täyttämiä. Suurin mahdollinen kosteus pienentyy kuivatuoretiheyden mukaan. Tämä johtuu siitä, että kuivatuoretiheyden kasvaessa soluonteloiden tilavuus ja samalla vedelle käytettävissä oleva tila pienentyy lineaarisesti, koska soluseinämän tiheys on puulajista riippumatta likimäärin vakio (Glass & Zelinka 2010).

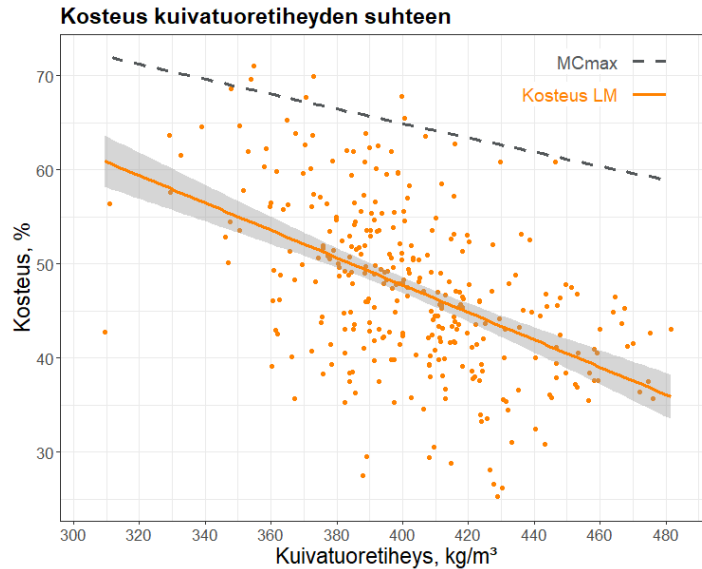
Puun suurin mahdollinen kosteus $MC_{dry(max)}$ (dry basis) kuivatuoretiheyden (KTT) suhteen voidaan laskea kaavalla (Glass & Zelinka 2010):

$$MC_{dry(max)} = 10^5 \times \frac{1540 - KTT}{1540 \times KTT} \quad (4)$$

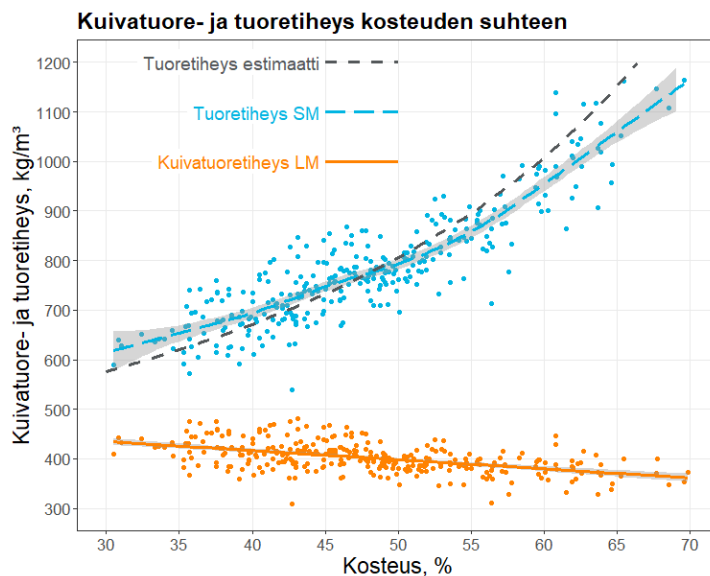
, jossa arvo 1 540 on soluseinämän tiheys (kg/m^3).

Kuvassa 25 on tarkasteltu metsähakkeen kosteutta suhteessa kuivatuoretiheyteen. $MC_{wet(max)}$ tarkoittaa edellisellä kaavalla määritettyä suurinta mahdollista kosteutta, muunnettuna märkäperusteiseksi (wet basis). Havaintopisteet ovat metsähakekuormien kosteuden ja kuivatuoretiheyden mittaushavainnot. Kuvassa esitetty suora on kosteuden lineaarinen sovitus kuivatuoretiheyden suhteen. Tulosten mukaan metsähakkeen havaitulla kosteudella ja kuivatuoretiheydellä oli negatiivinen korrelaatio ($r = -0,49$), mikä oli samansuuntainen kuin

suurimmalla mahdollisen kosteuden teoreettinen käyttäytyminen. Tässä aineistossa kosteus pienentyi keskimäärin noin 1,5 prosenttiyksikköä kuivatuoretiheyden kasvaessa 10 kg/m^3 . Kosteuden ennustamisen kannalta on merkittävää, että kuivatuoretiheys – jonka arvoa ei yleensä tunneta käytännön sovelluksissa – vaikuttaa systemaattisesti kosteuden tasoon.



Kuva 25. Metsähakkeen kosteus kuivatuoretiheyden suhteen. MCmax on laskennallinen suurin mahdollinen kosteus kuivatuoretiheyden suhteen. Kosteus LM on kosteuden lineaarinen sovitus (linear model).



Kuva 26. Metsähakkeen kuivatuoretiheys ja tuoretiheys kosteuden suhteen. Kuivatuoretiheydelle on sovitettu lineaarinen malli (LM) ja tuoretiheydelle sileä malli (SM smooth model). Tuoretiheysestimaatti on määritetty käyttämällä aineistosta laskettua kuivatuoretiheyden keskiarvoa 403 kg/m^3 .

Puun tuoretiheysarvojen laskennalliseen määrittämiseen kosteuden suhteen käytetään tavallisesti kuivatuoretiheyden vakioarvoa. Kuvan 26 tuoretiheysestimaatti on määritetty kaavalla 3 käyttämällä aineiston kuivatuoretiheyden keskiarvoa 403 kg/m^3 . Kuvan tuoretiheyshavainnot on määritetty metsähakekuormien mitattujen kuivatuoretiheyksien ja kosteuksien perusteella

(kaava 3). Kuvasta havaitaan, että tuoretiheystestimaatti aliarvioi tuoretiheyttä matalilla kosteuksilla ja yliarvioi sitä korkeilla kosteuksilla. Tämä poikkeama johtuu siitä, että kuivatuoretiheyden ja kosteuden välillä oli negatiivinen riippuvuus, kuten jo aiemmin todettiin. Kuvassa 26 kuivatuoretiheys laskee noin 17 kg/m^3 kosteuden noustessa kymmenen prosenttiyksikköä. Ilman tätä riippuvuutta – eli jos kuivatuoretiheys olisi vakio kosteuden mukaan – tuoretiheystestimaatti ja tuoretiheyshavainnot olisivat yhteneviä.

3.11. Energiatiheyden, kuivatuoretiheyden ja kosteuden yhteisvaihtelu

Energiatiheydellä tarkoitetaan tässä puun tehollista energiasisältöä tilavuusyksikköä kohden (MWh/m^3). Tehollisen energiasisällön määrittämisessä käytetään puun tehollista lämpöarvoa (MJ/kg) saapumistilassa eli toimituskosteudessa. Tällöin lämpöarvoon ei lasketa mukaan puun sisältämän veden, eikä vedyn palamisessa syntyvän veden, haihduttamiseen kuluva energiaa. (Alakangas 2000). Siten lämpöarvo on sitä pienempi mitä suurempi kosteus on.

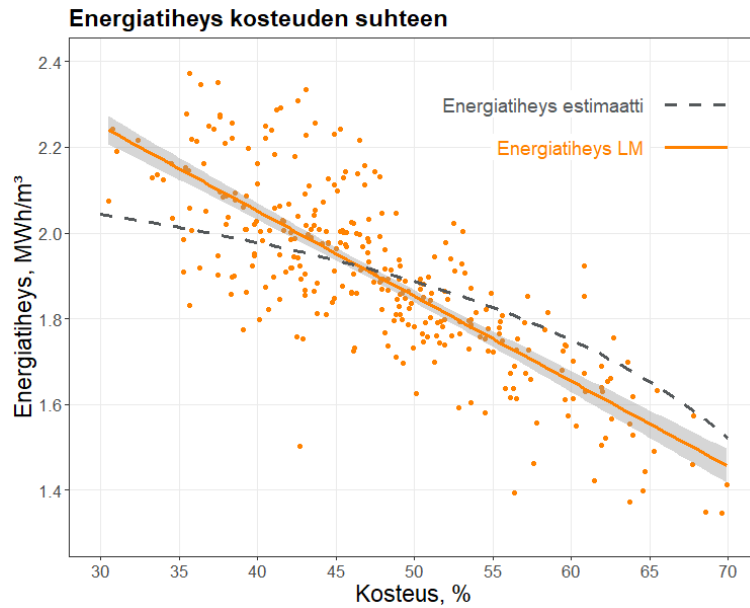
Tehollinen energiatiheys saapumistilassa lasketaan seuraavalla kaavalla, joka on laadittu yhdistämällä ja soveltamalla Alakankaan (2000) esittämiä kaavoja:

$$E = (Q_{teh} \times KTT - r \times \frac{MC_{wet} \times KTT}{(100 - MC_{wet})}) / 3600 \quad (5)$$

, jossa

- E on tehollinen energiatiheys saapumistilassa (MWh/m^3)
- Q_{teh} on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg). Laskennassa käytetty arvoa 19,3 MJ/kg .
- KTT on kuivatuoretiheys (kg/m^3)
- r on veden lämpenemis- ja höyrystymisenergia (MJ/kg). Laskennassa käytetty arvoa 2,441 MJ/kg .
- MC_{wet} on märkäperusteinen kosteus (%)
- 3600 on muuntokerroin $\text{MJ} \rightarrow \text{MWh}$ (1 $\text{MWh} = 3600 \text{ MJ}$)

Kuvassa 27 on tarkasteltu metsähakkeen energiatiheyttä (MWh/m^3) kosteuden suhteen. Havaintopisteet kuvaavat yksittäisten metsähakekuormien energiatiheyksiä, jotka on laskettu kaavalla 5 käyttäen kullekin kuormalle määritettyä kuivatuoretiheyttä ja kosteutta. Energiatiheyden estimaatti on määritetty käyttämällä aineiston kuivatuoretiheyden keskiarvoa 403 kg/m^3 . Kuivatuoretiheyden vakioarvoon perustuva energiatiheyden estimaatti aliarvioi energiatiheyttä matalilla kosteuksilla ja yliarvioi sitä korkeilla kosteuksilla. Tämä poikkeama johtuu siitä, että kuivatuoretiheyden ja kosteuden välillä oli negatiivinen riippuvuus, kuten jo aiemmin todettiin. Tämän aineiston perusteella energiatiheyden ja kosteuden välinen riippuvuus vaikuttaa miltei lineaariselta, ja se voidaan esittää yksinkertaisella kaavalla $E = 2,792 - 0,0188 \times MC_{wet}$. Kaavan tuottama tulos on energiatiheyden karkea estimaatti, ja sen käyttö voi olla perusteltua ainoastaan tämän tutkimusaineiston kosteuden vaihteluvälillä ja vastaavalla kuivatuoretiheyden tasolla.



Kuva 27. Energiateiheyden kosteuden suhteen. Energiateiheyden estimaatti on laskettu käyttämällä kuivatuoretiheyden arvoa 403 kg/m^3 . Havaintopisteet on laskettu kuormakohtaisilla kuiva-tuoretiheyksillä ja kosteuksilla. Energiateiheyden LM on lineaarinen sovitus.

3.12. Metsähakkeen tuoretiheyden ennustaminen

Tuoretiheyden määrittely ja määrittäminen kuivatuoretiheyden ja kosteuden perusteella on esitetty edellä kohdassa 3.10. Koska tuoretiheyden taso riippuu kosteuden tasosta, noudattavat käyttöpaikalle toimitetun metsähakkeen kosteus ja tuoretiheys samankaltaista vuodenaikavaihtelua. Hake-erän vastaanottoajankohdan lisäksi metsähakkeen kosteuteen ja tuoretiheyteen vaikuttavat mm. energiapuun varastointiaika ja varastointiajan sääolot.

Metsähakkeen tuoretiheydelle laadittiin regressiomallit, joilla voitiin ennustaa tuoretiheys eri vuodenaikoina varastointiajan ja sää tietojen perusteella. Aineistona käytettiin vuosina 2022–2025 lämpölaitoksille toimitettuja hakekuormia (kohta 2.6. Metsäenergian empiiriset tutkimusaineistot). Hake-erien perustiedot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Mallinnuksessa käytettyjen hakekuormien perustiedot.

Muuttuja	Havaintojen määrä	Keskiarvo	Keskihajonta	Vaihteluväli
Tuoretiheys, kg/m^3	323	783	125	635–1242
Kosteus, %	3 205	45,8	8,3	19,5–73,7
Kehystiheys, kg/m^3	3 205	310	50	167–541
Varastointiaika, vrk	582	335	257	3–1423
Lämpötila 3 kk*, °C	1 118	-0,6	8,5	-12,5–16,8

*Lämpötila 3 kk; hake-erän vastaanottoajankohtaa edeltävältä jaksolta laskettu kolmen kuukauden keskilämpötila.

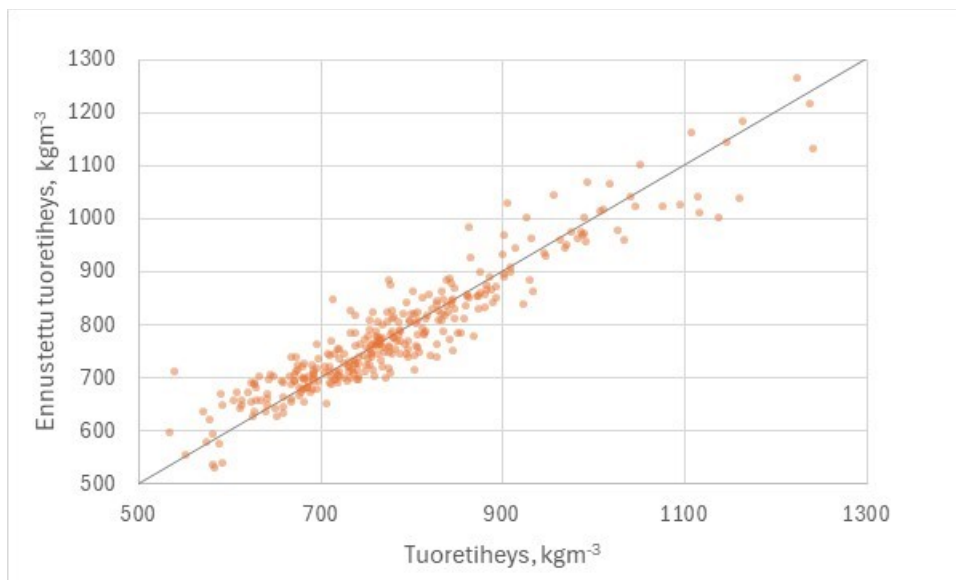
Kaikista hake-eristä ei ollut määritetty tuoretiheyttä, eikä varastointiajasta ollut saatavilla tietoa (Taulukko 7). Tuoretiheysmallien laadinnassa pyrittiin kuitenkin hyödyntämään mahdollisimman kattavasti koko aineistoa, minkä vuoksi mallinnus tehtiin useammassa vaiheessa:

- Tuoretiheyden ennustaminen hake-erille, joista tuoretiheyttä ei ollut määritetty (malli 1)
- Vuodenajan eli hakkeen vastaanottoajankohdan vaikutus hakkeen tuoretiheyteen (malli 2)
- Varastointiajan ja sääolojen vaikutus hakkeen tuoretiheyteen (malli 3)
- Mallien (2) ja (3) soveltaminen hakkeen tuoretiheyden ennustamiseen eri varastointiajoilla (3 kk, 6 kk, 9 kk) ja eri vuodenaikoina

Hakekuormille, joista tuoretiheysarvo puuttui, tuoretiheys ennustettiin regressiomallin avulla. Tätä varten laadittiin malli (1), jolla tuoretiheys (kg/m^3) voitiin ennustaa puuttuville havainnoille käyttämällä mittaustietoja, jotka olivat saatavissa kaikista hakekuormista. Mallin (1) selittäjiksi valikoituivat hake-erän kosteus, kehystiheys ja hakelaji (*Pienpuu*). Malli (1) voitiin esittää muodossa:

$$\text{Tuoretiheys} = -40,595 + 27,504 * \text{kosteus} - 0,642 * \text{kosteus}^2 + 0,006 * \text{kosteus}^3 + 0,797 * \text{kehystiheys} + 48,98 * \text{Pienpuu}$$

Mitattujen ja ennustettujen havaintojen välinen riippuvuus on esitetty kuvassa 28. Mallin estimoinnissa havainnot oletettiin riippumattomaksi, ja mallin jäännösvirhe (satunnaisvirhe) oli $42,4 \text{ kg}/\text{m}^3$.



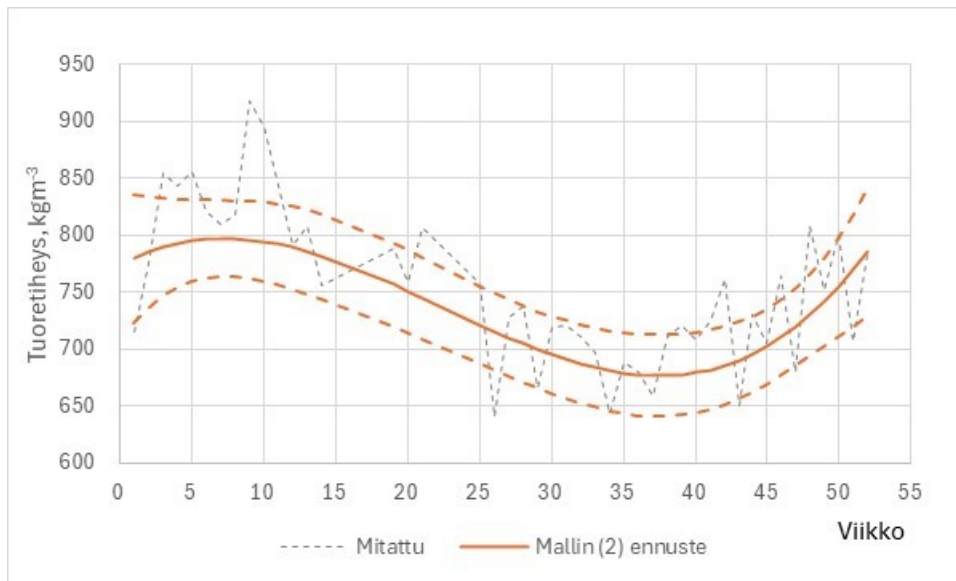
Kuva 28. Hakekuormien mitatut ja mallilla (1) ennustetut tuoretiheydet.

Kaikista havainnoista ($N=3\ 205$) oli saatavilla hake-erän vastaanottoajankohta, mutta vain osasta havainnoista varastointiaika ($N=582$). Tämän vuoksi määritettiin ensin koko aineistoa ($N=3\ 205$) hyödyntämällä vuodenajan eli hake-erän vastaanottoajankohdan vaikutus hakkeen tuoretiheyteen. Tätä varten laadittiin lineaarinen sekamalli (2) hake-erän tuoretiheydelle hake-erän vastaanottoajankohdan suhteen. Vastaanottoajankohtana käytettiin kalenteriviikkoa. Mallin satunnaisosan oletuksena oli, että saman vuoden peräkkäiset viikot ovat korreloituneita

ar(1)-rakenteella (autokorrelaatorakenne). Vastemuuttujana oli joko mitattu tuoretiheys tai jos se puuttui niin mallilla (1) ennustettu arvo. Mallin (2) kiinteä osa:

$$Tuoretiheys = 772,73 + 7,108 * viikko - 0,585 * viikko^2 + 0,0087 * viikko^3$$

Hake-erien tuoretiheydet olivat korkeimmillaan talvikuukausina ja lähtivät laskuun kevään aikana ollen alimmillaan loppukesästä ja alkusyksystä (Kuva 29). Syksyn aikana hake-erien tuoretiheydet lähtivät jälleen nousuun.

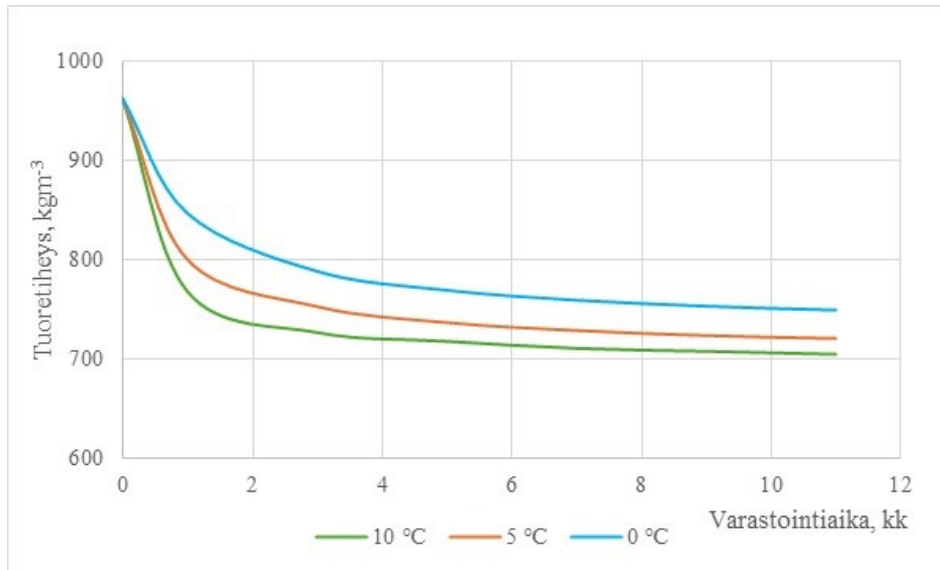


Kuva 29. Hake-erän vastaanottoajankohdan vaikutus hakkeen tuoretiheyteen (kg/m^3). Oranssit katkoviivat kuvaavat mallin (2) ennusteiden 95 %:n luottamusväliä.

Seuraavassa vaiheessa laadittiin malli (3), jolla voitiin ennustaa varastointiajan ja sääolojen vaikutusta hakkeen tuoretiheyteen. Malli (3) perustui havaintoihin, josta hake-erien varastointiaika oli tiedossa ($N=582$). Varastointiajan yksikkönä käytettiin kuukautta (var_{kk}). Jos varastointiaika oli yli 12 kk niin var_{3kk} sai arvon 13. Säämuuttujista malliin selittäjänä käytettiin hake-erän vastaanottoajankohtaa edeltävältä jaksolta laskettua kolmen kuukauden keskilämpötilaa ($Temp_{3kk}$). Lisäksi malliin selittäjinä olivat edellä mainittujen muuttujien yhdysvaikutus ja dummy-muuttuja (0,1) yli vuoden varastoiduille hake-erille ($var_{>1v}$). Myös hake-erän vastaanottoajankohtaa testattiin selittäjänä, mutta se ei ollut merkitsevä. Mallin (3) formulointi ja parametrit voidaan esittää:

$$Tuoretiheys = 1833,18 - 230,80 * \frac{var_{kk}}{var_{kk} + 1} - 291,10 * \ln(Temp_{3kk} + 20) + 7,932 * \left(\frac{var_{kk}}{var_{kk} + 1} * Temp_{3kk} \right) - 22,63 * var_{>1v}$$

Varastointiajan vaikutus ei ollut lineaarinen, vaan tuoretiheyden lasku oli voimakkainta ensimmäisten varastointikuukausien aikana, jonka jälkeen tuoretiheyden muutos oli vähäisempää (Kuva 30). Varastointiajan kolmen viimeisen kuukauden keskilämpötila ($Temp_{3kk}$) indikoi myös nopeampaa kuivumista ja energiapuun alhaisempaa tuoretiheyttä (Kuva 30).



Kuva 30. Esimerkki varastointiajan vaikutuksesta hakkeen tuoretiheyden ennusteeseen (malli 3) eri 3 kk:n keskilämpötiloilla ($Temp_{3kk}$).

Lopulliset hakkeen tuoretiheysennusteet saatiin soveltamalla malleja (2) ja (3). Molempien mallien informaatiota käytettiin hakkeen tuoretiheyden ennustamiseen eri varastointiajoilla (3 kk, 6 kk, 9 kk) ja eri vuodenaikoina. Oletuksena oli, että hake-erän kosteuden vuodenaikainen trendi voitiin ennustaa suureen havaintomäärään ($N=3\ 205$) perustuvalla mallilla (2) luotettavammin kuin jos olisi sovellettu pelkästään mallia (3). Mallia (3) käytettiin mallin (2) kalibroimiseen eri varastointiajoilla ja keskilämpötiloilla. Ensin laskettiin mallilla (3) kullekin hake-erän vastaanottoajankohdalle (viikko) tuoretiheysennusteet käyttämällä selittäjänä aineistosta laskettuja varastointiajan ja keskilämpötilan ($Temp_{3kk}$) tasoitettuja keskiarvoja (Kuva 31). Tämän jälkeen mallilla (3) laskettiin hake-erän tuoretiheydet kullekin vastaanottoviikolle käyttämällä 3, 6 ja 9 kuukauden varastointiaikoja sekä käyttämällä eri $Temp_{3kk}$ arvoja (aineiston keskiarvo, keskiarvo +/- 2 astetta). Näiden ja keskiarvotunnuksilla laskettujen ennusteiden poikkeama lisättiin mallin (2) tuottamaan viikkokohtaisen ennusteeseen. Lopuksi hake-erien tuoretiheysennusteet laskettiin eri varastointiajoilla ja keskilämpötiloilla kuukausikohtaisesti (Taulukko 8, Kuva 31).



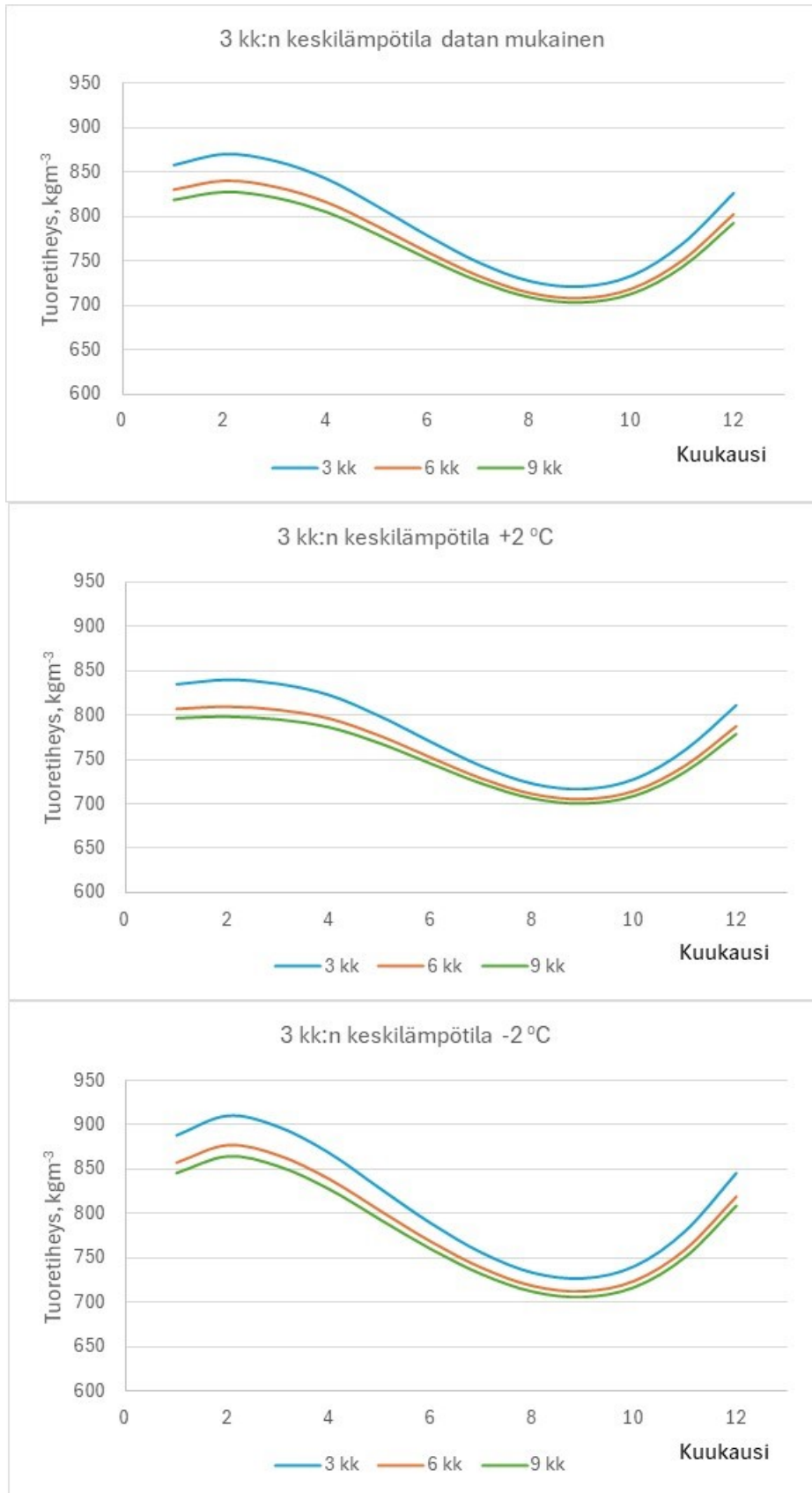
Kuva 31. Käyttöpaikalle toimitettujen hakekuormien varastointiajan ja keskilämpötilan ($Temp_{3kk}$) tasoitettuja keskiarvoja vastaanottoviikon suhteen.

Käyttöpaikalle toimitettujen hakekuormien tuoretiheydet olivat korkeimmillaan keskitalvella, helmikuussa ja matalimmillaan syyskuussa kaikilla varastointiajoilla (Kuva 29). Varastointiajan vaikutus tuoretiheyteen ilmeni selvimmin talvikuukausina, jolloin lyhyellä kolmen kuukauden varastoinnilla hakkeen tuoretiheys jäi selvästi korkeammaksi kuin kuuden ja yhdeksän kuukauden varastoinnin jälkeen. Myös hake-erän vastaanottoajankohtaa edeltävän kolmen kuukauden keskilämpötilan vaikutus hakkeen tuoretiheyteen oli suurin talvikuukausina. Esimerkiksi keskilämpötilan muutos helmikuussa +/- 2 asteella aineiston keskiarvosta merkitsi myös hakkeen tuoretiheyden muutosta +/- 37 kg/m³. Kesäkaudella keskilämpötilan vaikutus oli huomattavasti pienempi kaikilla varastointiajoilla.

Taulukko 8. Hake-erän tuoretiheys (kg/m³) vastaanottokuukausittain eri varastointiajoilla ja edellisen kolmen kuukauden keskilämpötiloilla (Temp_{3kk}).

Kuukausi	Lämpötila datan mukainen			Lämpötila +2 astetta			Lämpötila -2 astetta					
	Temp _{3kk}	Varastointiaika			Temp _{3kk}	Varastointiaika			Temp _{3kk}	Varastointiaika		
		3 kk	6 kk	9 kk		3 kk	6 kk	9 kk		3 kk	6 kk	9 kk
1	-5	859	830	818	-3	834	807	796	-7	888	858	846
2	-8	871	840	827	-6	839	810	798	-10	910	878	864
3	-6	863	833	821	-4	835	806	795	-8	898	866	853
4	-3	843	816	805	-1	822	796	786	-5	868	839	827
5	2	812	789	779	4	798	777	768	0	828	803	793
6	7	778	759	752	9	769	752	745	5	789	768	760
7	11	748	733	727	13	742	728	723	9	756	739	732
8	14	727	714	709	16	722	711	706	12	733	718	712
9	14	721	708	703	16	716	705	700	12	727	712	706
10	12	733	719	713	14	728	714	709	10	741	724	717
11	7	770	751	743	9	760	743	736	5	780	760	751
12	0	827	802	792	2	811	788	778	-2	846	819	809

Temp_{3kk}; hake-erän vastaanottoajankohtaa edeltävältä jaksolta laskettu kolmen kuukauden keskilämpötila.



Kuva 32. Hake-erän tuoreiheyden odotusarvo eri varastointiajoilla ja keskilämpötiloilla ($Temp_{3kk}$). Keskilämpötila on laskettu hake-erän vastaanottoajankohtaa edeltävältä kolmen kuukauden jaksolta.

4. Tulosten tarkastelu

Tässä esitetyt tulokset antavat suuruusluokka-arvion hakkuutähdehakkeen kosteuden, kuivumisen ja kuiva-ainetappioiden vaikutuksesta hankintakustannuksiin sekä logistiikkaketjun CO₂-päästöihin Kainuussa. Laskelmassa käytetyt lukuarvot vastaavat tämän hetken tyypillisiä tuottavuus- ja kulutusarvoja hakkuutähdehakkeen tuotantoketjussa (Ovaskainen 2017) sekä hakkuutähteiden varastoinnissa kosteuden ja kuiva-ainetappioiden osalta (Routa ym. 2018, Anerud ym. 2019).

Käytännössä yksittäisten koneiden ja varastopaikkojen välillä vaihtelu voi olla suurta johtuen muun muassa koneiden säädöistä, kuljettajien ajotottumuksista, toimintaympäristön olosuhdevaihteluista ja hakkeen sekaan joutuvan lumen määrästä haketuksen yhteydessä. Varastoitavien hakkuutähteiden suuri typpirikas neulasosuus ja kosteus voivat edistää sieni- ja bakteerikantojen kasvua varastopinoissa ja siten lisätä varastoinnista aiheutuvien kuiva-ainetappioiden määrää (Anerud ym. 2019), mikä puoltaa hakkuutähteiden palstakuivatusta aina, kun se on mahdollista metsäkuljetuksen kantavuuden ja metsänuudistamisen aikataulujen osalta.

Puuta pidetään uusiutuvana ja päästöttömänä energianlähteenä, koska uuden puun kasvaessa hiilidioksidi palautuu vähitellen takaisin siihen fotosynteesin yhteydessä (Liski ym. 2011). Hiilen kierron osalta on tosin aina muistettava, ellei metsää uudisteta kaadetun tilalle, puusta vapautuva hiilidioksidi jää ilmakehään, aivan kuten käytettäessä fossiilisia polttoaineita käyttövoimana tai energialähteenä. Öljy, kivihiili ja maakaasu esiintymät ovat varastoituneena maan alle ja niitä korvaavien tai säästävien energiaratkaisujen käyttö ovat ratkaisevassa roolissa vähennettäessä fossiilisen hiilidioksidin päästöjä ilmakehään, mikä kannattaa pitää mielessä, ettei sorru aliarvioimaan koneiden ja ajoneuvojen päästöjen tai käyttövoimaratkaisujen merkitystä hiilijalanjäljen pienentämisessä tämän tutkimuksen perusteella.

Toimitusketjun koneiden ja ajoneuvojen hiilidioksidipäästöt olivat varastoinnin päästöihin verrattuna murto-osa, mikä on luonnollista, kun tietää puuenergian tuotantoketjun hyvän hyötysuhteen (Forsberg 2000, Palosuo ym. 2001). Energiantuotantoon käytetyssä puussa on huomattavasti enemmän hiiltä ja energiaa, mitä sen toimitusketjun koneiden ja ajoneuvojen polttoaineen kulutus ja siitä aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat (Kariniemi ym. 2009, Jäppinen 2013). Kariniemi ym. (2009) tutkimuksessa energian käyttämisen ja tuottamisen suhdeluku hakkuutähteiden tienvarsihaketuksen perustuvalla toimitusketjulla oli 0,020 MWh/MWh, eli laitokselle toimitetun hakkuutähdehakkeen energiasisältöön suhteutettuna sen hankintaan koneiden ja ajoneuvojen käyttövoimana kului energiaa 2 %.

Kondensoiva lämmön talteenottotekniikka perustuu siihen, että lämpimien savukaasujen sisältämä hukkaenergia muutetaan hyötykäyttöön tiivistämällä savukaasujen sisältämä vesihöyry takaisin vedeksi kaukolämmön paluuveden avulla (Leino ym. 2024). Jos paluuveden lämpötila on korkea, lauhtumissa 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 ennen kaikkea teoreettisena maksimina. Käytännössä lämmöntalteenotossa (LTO) ja kattilateknologian soveltuvuudessa kosteudeltaan erityyppisille jakeille on laitospohtaista vaihtelua, samoin kuin energiapuun kosteudessa ja kuiva-ainetappioiden suuruudessa varastotasolla.

Koneiden siirtojen sekä kuljettajien ja toimihenkilöiden työmatkojen aiheuttamat CO₂-päästöt puuttuivat tuloksista, koska saatavilla ei ollut aineistoa työmaiden ketjutuksesta, työmaiden välisistä etäisyyksistä tai yrittäjien toiminta-alueen laajuudesta hakkuutähteiden hankintaan liittyvissä työtehtävissä. Kariniemi ym. (2009) tutkimuksessa hakkuutähteiden tienvarsihaketukseen perustuvalla toimitusketjulla em. toimintojen osuus hankintaketjun CO₂-päästöistä oli 6 %.

Ovaskaisen (2017) tutkimuksessa hakkuutähteiden tienvarsihaketuksen toimitusketjun (kausaus, metsäkuljetus, haketus ja autokuljetus) päästöt suhteessa hakkeesta saatavaan energiamäärään olivat 5,60 kg CO₂/MWh, eli samaa tasoa kuin tässä tutkimuksessa. Sekä Kariniemi ym. (2009) että Ovaskainen (2017) tutkimusten tuloslaskentaan käytettiin päivitettyä Metsätehon päästölaskentamallia (Korpilahti 1998).

Hankinnan kokonaistalouden kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että pinoon ajettujen hakkuutähteiden sisältämästä hiilestä mahdollisimman suuri osa päätyisi energiantuotantoon, eikä vapautuisi hiilidioksidina taivaalle. Hakkuutähteiden kuiva-ainetappiota, eli orgaanisen aineen häviämistä, tapahtuu varastopinoissa hydrolyysin, lahoamisen, kompostoitumisen tai muiden hitaiden palamisreaktioiden seurauksena (Lindblad ym. 2022). Käytännössä sääolosuhteet muuttuvat ennalta arvaamattomasti ja vuodet eivät ole identtisiä, mikä hakkeen toimitusmäärien ohella luonnollisesti vaikuttaa hakkuutähteiden kuivumiseen, varastoituvuuteen, varastointiaikoihin ja kuiva-ainetappioiden määrään. Haketettun materiaalin laatua ja sen ominaisuuksia kuvaa käytännössä mm. hakkeen tuoksu ja palakokojakauma.

Tutkimuksessa kerättiin empiirinen metsähakekuorma-aineisto, joka koostui metsähakkeen määrä- ja laatusuureista tai niiden välisistä yhteyksistä, muuntokertoimista. Metsähakekuormien operatiivisesta vastaanottomittauksesta pystyttiin koostamaan tiedot kuormien kehystilavuuksista ja painoista. Edelleen otannalla määritetyn kosteuden perusteella päästiin kuormien kuivapainoihin, ja samaan otantaan perustuvilla lisäanalyysillä kuivatuoretiheyksiin. Muodostunut aineisto mahdollisti edelleen kuormien laskennallisten kiintotilavuuksien, tiiviyksien, tuoretiheyksien ja energiatihyysien määrittämisen.

Empiirinen aineisto oli monipuolisuudessaan käyttökelpoinen erilaisten metsähakkeen määrään ja laatuun liittyvien suureiden tarkasteluun ja mallintamiseen. Yleisesti ottaen rajoitteeksi muodostui kuitenkin aineiston määrä, rajoitettu maantiede ja epätasainen jakautuminen esimerkiksi vuodenaikojen suhteen.

Metsähakenäytteille määritettiin palakokojakauma SCAN-standardin mukaisella menetelmällä. Palakokojakauma oli lähinnä taustatieto, jonka tunteminen ja dokumentointi oli oleellista hakkeen tiiviyden tarkasteluissa. Aineisto antoi viitteen siitä, että pienten palakokojakeiden osuus kasvaa metsähakkeen valmistuksessa käytetyn energiapuun varastointiajan kasvaessa, mikä tukee käytännön toiminnassa saatuja havaintoja ja käsitystä.

Metsähakkeen tiiviyden mittauksessa yleisesti käytetty muuntokerroin kehystilavuuden ja kiintotilavuuden välisissä muunnoissa. Tämän tutkimuksen aineistossa tiiviyden keskiarvo oli kokopuu- ja rankahakkeella 0,40 ja metsätähdehakeella 0,42. Siten tiiviyden keskimääräinen taso vastasi hyvin toimialalla vakiintuneesti käytettävää tiiviyttä 0,4. On kuitenkin huomattava, että tiiviyden keskihajonnat suhteessa keskiarvoihin olivat varsin korkeita (variatiokertoimet 8–9 %). Tämä tarkoittaa, että yksittäisten hakekuormien tiiviydet vaihtelevat keskiarvon ympärillä varsin paljon, mikä heikentää keskiarvon käytettävyyttä yksittäisiin kuormiin liittyvissä muunnoissa. Uusvaaran ja Verkasalon (1987) laajan tutkimuksen perusteella

tiivyyden tasoon ja vaihteluun keskeisesti vaikuttavia tekijöitä olivat puu- ja hakelaji, hakkuri-tyyppi ja kuormausmenetelmä ja vuodenaika ja lisäksi jossakin määrin myös kosteus ja kuljetusmatka. Edelliseen viitaten käsillä olevan tutkimuksen aineiston keskeisiä puutteita olivat, että puulajia tai puulajiosuuksia ei tunnettu, haketuksessa käytettiin vain yhtä hakkuri-tyyppiä (Jenz-rumpuhakkuri) ja aineisto ei sisältänyt kesäkuukausina hakettuja kuormia. Uusvaaran ja Verkasalon tutkimuksen menetelmällisenä heikkoutena oli tekijöiden oman arvion mukaan se, että metsähakekuormien kiintotilavuuksien määrittämisessä käytettiin laskennallisia kuivatuoretiheyden arvoja. Tässä tutkimuksessa kuivatuoretiheydet määritettiin kuormakohtaisesti otannalla valituista hakenäytteistä. Vaikka yksittäisille kuormille määritettyihin kuivatuoretiheyden arvoihin sisältyy otantaan ja laboratorioanalyysiin liittyvää satunnaisvaihtelua, voidaan kuivatuoretiheyden määrittämisen kokonaisuudessa katsoa olevan todenmukaisella tasolla.

Aineiston perusteella saatiin viitteitä siitä, että metsähakekuormien tiiviys alenisi raaka-aineena käytetyn energiapuun varastointiajan mukaan. Tällä voi olla yhteys palakokojakauman muuttumiseen, mitä ei kuitenkaan pystytty aineiston perusteella havaitsemaan.

Kuivatuoretiheyden keskiarvo oli kokopuu- ja rankahakkeella 405 ja metsätähdehakeelle 379 kg/m³. On tunnettua, että kuivatuoretiheys vaihtelee paitsi puulajin, maantieteen ja kasvupaikan, myös puun eri osien (runkopuu, kuori, oksat) mukaan. Lisäksi kuivatuoretiheys muuttuu systemaattisesti rungon sisällä ytimeistä pintaa kohti, ja toisaalta tyvestä latvaa kohti (esimerkiksi Hakkila 1966, Repola 2006, Hakkila ym. 2020, Kärkkäinen 2007). Koska tämän tutkimuksen kokopuu- ja rankahakekuormat sisälsivät vaihtelevia osuuksia eri puulajeja sekä puun ja rungon eri osia, ei kokopuu- ja rankahakkeelle määritetyn kuivatuoretiheyden tason vertailu muihin tutkimuksiin ole mielekäästä. Keskiarvo 405 kg/m³ asettuu kuitenkin hiukan kuusi- ja mäntykuitupuun (pl. tyvipölkkyt), lepän ja haavan kuivatuoretiheyden yläpuolelle, ja vastaavasti koivun kuivatuoretiheyden alapuolelle, ja on siten tuloksena johdonmukainen.

Metsätähdehakeella tässä tutkimuksessa määritetty kuivatuoretiheys oli alempi kuin Hakkilan (1978) esittämät arvot eri puulajeille (taulukko 3). Metsätähdehakeen kuivatuoretiheyden todellinen taso riippuu runko- ja oksapuun osuuksista ja toisaalta kuoren ja neulasten osuuksista, minkä vuoksi tulosten vertailukelpoisuus on rajallinen.

Kuivatuoretiheyden havaittiin laskevan varastointiajan mukaan kokopuulla ja rangalla noin kolmen ja metsätähdeellä noin viiden prosentin vuosivauhtia. Tulos kuvaa suuntaa antavasti kuiva-ainehävikin nopeutta, ja on ainakin kokopuun ja rangan osalta johdonmukainen esimerkiksi Roudan ym. (2018) tuloksiin verrattuna. Hakkuutähdeellä on raportoitu selvästi korkeampiakin kuiva-ainetappioita (esim. Filbakk ym. 2011). Yleisesti ottaen eri tutkimuksissa on raportoitu verraten suuria kuiva-ainehävikien vaihteluita eri havaintoyksiköiden ja kokeiden välillä.

Metsäenergian kosteus käyttöpaikalle toimitettaessa noudatti sille tyypillistä vuodenaikavaihtelua. Kuitenkin kosteuden hajonta ja vaihteluväli olivat kaikkina aikoina varsin suuria. Tässä tutkimuksessa ei laadittu varsinaisia kosteuden ennustemalleja, vaan tarkasteltiin kosteuden yhteyttä varastointiajan säähavaintomuuttujiin.

Tässä tutkimuksessa havaittiin, että koko varastointiajalle määritetyt säähavaintomuuttujat selittävät heikosti vastaanottoajankohdan kosteutta. Sen sijaan varastointiajan kolmelle viimeiselle kuukaudelle määritetyillä säähavaintomuuttujilla – kuten ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskiarvoilla – on selvempi yhteys vastaanottokosteuteen. Kolme kuukauden jakso säähavaintomuuttujien määrittämisessä näytti muodostavan jonkinlaisen optimin. Pidemmällä,

esimerkiksi puolen vuoden pituisilla jaksoilla, yksittäisten säähavaintomuuttujien arvot ei enää riittävästi kuvanneet varastointiolosuhdetta. Toisaalta lyhyemmät, kuten yhden kuukauden pituiset jaksot olivat liian lyhyitä sille, että vaikutus kosteuteen olisi tullut esiin.

On tunnettua, että puuaineen suurin mahdollinen kosteus alenee kuivatuoretiheyden kasvaessa. Tässä tutkimuksessa havaittiin, että metsäenergian vastaanottoajankohdan kosteus aleni kuivatuoretiheyden suhteen. Tämä antaa viitteen siitä, että kuivatuoretiheydellä on vaikutusta todelliseen kosteuteen – jopa pitkän varastointiajan jälkeen. Vaikka ilmiö vaikuttaa johdonmukaiselta, sitä ei juurikaan ole otettu huomioon aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa tai käytännön sovelluksissa. Zanuncion ym. (2015) tutkimuksessa tarkasteltiin eukalyptuksen kosteutta ja kosteuden muutosnopeutta varastointiajan, kuivatuoretiheyden ja pölkkyjen läpimitan suhteen. Keskeinen havainto oli se, että alkukosteudella ja loppukosteudella kuivumisajan lopussa oli negatiivinen korrelaatio kuivatuoretiheyden suhteen.

Kosteuden ja kuivatuoretiheyden yhteisvaihtelun vaikutukset ovat moninaisia. Hakenäytteiden otantaan perustuvassa kosteusmäärityksessä tulokseen vaikuttaa paitsi kosteuden, myös kuivatuoretiheyden satunnaisvaihtelu. Kosteusennustemallien laadinnassa tulisi ottaa huomioon puutavaralajin kuivatuoretiheys tai pystyä ryhmittelemään puutavaralajeja kuivatuoretiheyden suhteen samankaltaisiin joukkoihin. Lisäksi suureet, jotka määritetään kosteuden ja kuivatuoretiheyden perusteella – kuten tuoretiheys ja energiatiheys – tulisi tarkastella näiden muuttujien yhteisvaihtelun näkökulmasta.

Puutavaranmittauksessa tuoretiheyttä käytetään muuntokertoimena painon ja kiintotilavuuden välisissä muunnoissa. Mittausmenetelmien sisällöissä ja niihin kuuluvissa tuoretiheyden määrittämissä on eroja muun muassa puutavaralajien välillä. Yleisesti ottaen kuitupuun vastaanottomittaus tehtailla perustuu kokonaan painomittaukseen. Pienillä hankintakuitupuuerillä painomittaus on yleisin mittausmenetelmä, ja se toteutetaan kaukokuljetuksen yhteydessä puutavara-autojen kuormainvaaoilla. Lisäksi tuoretiheyskertoimien käyttö on yleistä energiapuutavaralajien metsäkuljetuksen yhteydessä tehtävässä kuormainvaakamittauksessa. Sen sijaan energiapuutavaralajien kaukokuljetuksen yhteydessä tehtävään painomittaukseen ei ole olemassa yleisiä tuoretiheyskertoimien. Tämä on ollut merkittävä puute energiapuun mittausmenetelmissä, ja muodostunut energiapuun mittausta ja logistiikkaa vähintäänkin haittaavaksi pullonkaulaksi.

Kuitupuun tuoretiheydelle on pystytty laatimaan kohtalaisen luotettavia sääperusteisia ennustemalleja (Repola ym. 2021), mutta metsäenergian osalta tilanne on huomattavasti haastavampi. Oleellisia eroja on paitsi puutavaralajien ominaisuuksissa (järeyys, puulajipuhtaus), myös tyyppillisissä varastointiajoissa; kosteuden ja tuoretiheyden ennustettavuus heikkenee merkittävästi varastointiajan pidentyessä.

Tässä tutkimuksessa laadittiin menetelmä, joilla voitiin ennustaa käyttöpaikalle toimitetun metsähakkeen tuoretiheys, kun tunnetaan vastaanottoajankohta, varastointiaika ja kolmen viimeisen kuukauden keskilämpötila. Laaditut mallit perustuivat varsin rajalliseen ja maantieteellisesti suppeaan aineistoon, joten tuoretiheysennusteet varsinkin eri varastointiajoilla ja keskilämpötiloilla ovat enemmänkin suuntaa antavia. Sen sijaan mallit antavat selvän kuvan tuoretiheyden vaihtelun trendistä eri vuodenajan mukaan. Mallien käyttökelpoisuuden ja yleistettävyyden parantamiseksi tarvitaan jatkossa aineistoja, joista hakekuorman alkuperäistieto kuten hakkuuajankohta (varastointitieto) ja käyttöpaikkamittaukset (tuoretiheys) on kattavammin saatavilla.

Viitteet

- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Tiedotteita 2045. 172 s.
- Anerud, E., Krigstin, S., Routa, J., Brännström, H., Arshadi, M., Helmeste, C., Bergström, D. & Egnell, G. 2019. Dry matter losses during biomass storage. Measures to minimize feedstock degradation. IEA Bioenergy: Task 43. 45 s.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavaisen hankinnan logistiikka. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Atkins, P., de Paula, J. & Keeler, J. 2018. Physical Chemistry (11th ed.). Oxford University Press.
- Erber, G., Kanzian, C. & Stampfer, K. 2012. Predicting moisture content in a pine log wood pile for energy purposes. *Silva Fennica* 46(4): 555–567.
- Filbakk, T., Hoibo, O., Dibdiakova, J. & Nurmi, J. 2011. Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy. *Scand J Forest Res* 26: 267–277. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.553199>.
- Fjeld, D., Väätäinen, K., von Hofsten, H., Noreland, D., Callesen, I. & Lazdins, A. 2021. A common Nordic-Baltic costing framework for road, rail and sea transport of roundwood. *Nibio rapport* 7(8). 32 s.
- Forsberg, G. 2000. Biomass energy transport: Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method. *Biomass and Bioenergy* 19: 17–30. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00020-9)
- Föhr, J., Karttunen, K. & Ranta, T. 2010. Energiapuun tienvarsihaketus. Julkaisussa: Karttunen K., Föhr J., Ranta T. (toim.). Energiapuuta Etelä-Savosta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Tutkimusraportti 7: 71–79.
- Gautam, S., Pulkki, R., Shahi, C. & Leitch, M. 2012. Fuel quality changes in full tree logging residue during storage in roadside slash piles in Northwestern Ontario. *Biomass and Bioenergy* 42: 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.015>.
- Glass, Samuel V., Zelinka, Samuel L. 2010. Moisture relations and physical properties of wood. *Wood handbook : wood as an engineering material: chapter 4*. Centennial ed. General technical report FPL ; GTR-190. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 4.1-4.19.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. Summary: Forest seasoning of wood intended for fuel chips. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54(4). 82 p. [In Finnish]. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171086>.
- Hakkila, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. *Communicationes Instituti Forestalia Fenniae* 62(5): 1–9.

- Hakkila, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. *Folia Forestalia* 342. Metsäntutkimuslaitos. 38 s. <https://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0324-1>
- Hakkila, P., Repola, J., Lindblad, J., Kalaja, H. & Verkasalo, E. 2020. Mänty- ja kuusikuitupuun ominaisuudet Etelä-Suomessa – laadun vaihtelu ja hallinta. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 25/2020. Luonnonvarakeskus, Helsinki.
- Jahkonen, M., Lindblad, J., Sirkiä, S. & Lauren, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. *Metlan työraportteja* 241. 35 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2379-8>.
- Jirjis, R. 2005. Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, 28(1), 1–20.
- Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M. & Korpunen, H. 2019. Koneellinen hakkuu: seurantatutkimus. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 11/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.
- Jäppinen, E. 2013. The effects of location, feedstock availability, and supply-chain logistics on the greenhouse gas emissions of forest-biomass energy utilization in Finland. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 527. Diss. Lappeenranta University of Technology. 61 s.
- Kariniemi, A., Kärhä, K., Niininen, M. & Heikka, T. 2009. Feedstock supply chain CO₂-eq emissions – A case study on forest biomass to liquid traffic fuel. *Metsätehon katsaus* nro 38. 4 s.
- Koistinen, A., Luiro, J-P. & Vanhatalo, K. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen, työopas. *Tapion julkaisuja*. 73 s.
- Korpilahti, A. 1998. Finnish forest energy systems and CO₂ consequences. *Biomass and Bioenergy* 15 (4/5): 293–297. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(98\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(98)00037-3)
- Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. *Kaukolämmön käsikirja*. Energiateollisuus ry. Helsinki. 566 s.
- Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011a. Jenz HEM 581 DQ hakkuutähteiden ja pienpuun tienvarsihaketuksessa. *Metsätehon tulosalvosarja* 5/2011. 49 s.
- Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011b. Heinola 1310 ES hakkuutähteiden ja pienpuun haketuksessa. *Metsätehon tulosalvosarja* 9/2011. 33 s.
- Kärkkäinen, M. 2007. *Puun rakenne ja ominaisuudet*. Metsäkustannus Oy, Helsinki.
- Laki mittayksiköistä ja mittanormaalijärjestelmästä 1156/1993. Suomen säädöskokoelma. 10.12.1993. <http://data.finlex.fi/eli/sd/1993/1156/ajantasa/2014-09-19/fin>
- 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* 50(5): 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* 51(4): 5659. 18 s. <https://doi.org/10.14214/sf.5659>
- Laitila, J. & Repola, J. 2023. Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 45/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 57 s.
- Laitila, J., Sikanen, L. & Väätäinen, K. 2023. Pre-feasibility study of carbon sequestration potential of land clearing stumps buried underground. *Croatian Journal of Forest Engineering* 44(1): 111–119. doi: 10.5552/crojfe.2023.1685
- Laitila, J. 2024. TP3. Tuorehakkeen käytön vaikutus metsähakkeen hankintaketjuihin Itä-Suomessa. Hankeraportti. 42 s. <https://www.luke.fi/fi/documents/tp3-raportti>
- 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.
- Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2001 Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2001: 411–431. <https://doi.org/10.14214/ma.6681>
- Lindblad J., Routa J., Ruotsalainen J., Kolström M., Isokangas A. & Sikanen L. 2018. Weather based moisture content modelling of harvesting residues in the stand. *Silva Fennica* 52(2): 7830. <https://doi.org/10.14214/sf.7830>
- Lindblad, J., Routa, J., Brännström, H., Järvenpää, E. & Saranpää, P. 2022. Biomassojen ja niiden jalostuksen sivutuotteiden varastointi sekä laadun hallinta. Julkaisussa: Winquist E. ym. *Biotalouden raaka-aineet ja materiaalivirrat hyötykäyttöön logistiikkaa tehostamalla: Synteesiraportti*. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 83/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 32–39.
- LIPASTO 2017. Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. <http://www.lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/>
- Liski, J., Repo, A., Känkänen, R., Vanhala, P., Seppälä, J., Antikainen, R., Grönroos, J., Karvosenoja, N., Lähtinen, K., Leskinen, P., Paunu, V.-V. & Tuovinen, J.-P. 2011. Metsäbiomassan energiakäytön ilmastovaikutukset Suomessa. *Suomen ympäristökeskus*. 43 s.
- Luke 2024. Energiapuun kauppa. [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus. Viitattu: 8.4.2025. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/energiapuun-kauppa>
- Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. *Silva Fennica* 41(3): 471–487. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.284>
- Ovaskainen, H. 2017. CO₂-eq-päästöt ja energiatehokkuus metsäbiomassojen toimitusketjuissa – terminaalien vaikutus. *Metsätehon tulosalvosarja* 4a/2017. 23 s.
- Palosuo, T., Wihersaari, M. & Liski, J. 2001. Net greenhouse gas emissions due to energy use of forest residues - Impact of soil carbon balance. *EFI Proceedings no 39, Wood biomass as an energy source challenge in Europe*. European Forest Institute, Joensuu. s. 115–130.

- Pekkarinen, A.-J., Laitila, J., Kumpula, J., Hallikainen, V., Rautio, P., Siitari, J., Hoppula, S., Aatsinki, P., Lahti, J. & Holmström, E. 2024. HAKEMA: Hakkuutähteiden keruun mahdollisuudet poro- ja metsätalouden yhteensovittamisessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 38/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 66 s.
- Persson, E., Filipsson, J. & Elowson, T. 2002. Roadside storage of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) pulpwood – effect on moisture content of climate conditions, felling season and exposure. *Pap Tim* 84: 174–178.
- Pettersson, M. & Nordfjell, T. 2007. Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young tree. *Biomass Bioenergy* 31(11–12): 782–92.
- Repola, J. 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fennica* 40(4): 322. <https://doi.org/10.14214/sf.322>
- Repola J., Heikkinen J. & Lindblad J. 2021. Pulpwood green density prediction models and sampling-based calibration. *Silva Fennica* 55(4): 10539. <https://doi.org/10.14214/sf.10539>
- Ronkainen, P., Sirkiä, S. & Lindblad, J. 2014. Harvennusenergiapuun ja latvusmassan kosteuden määrittäminen metsäkuljetuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 5882. <https://doi.org/10.14214/ma.5882>
- Routa J., Kolström M., Ruotsalainen J. & Sikanen L. 2012. Forecasting moisture changes of energy wood as a part of logistic management. In: Special issue. Abstracts for international conferences organized by LSFRI Silava in cooperation with SNS and IUFRO. *Mezzinatne* 25: 33–35.
- Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J. & Sikanen, L. 2015a. Precision measurement of forest harvesting residue moisture change and dry matter losses by constant weight monitoring. *International Journal of Forest Engineering* 26(1): 71–83. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1012900>
- Routa J., Kolström M., Ruotsalainen J. & Sikanen L. 2015b. Validation of prediction models for estimating the moisture content of small diameter stem wood. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36(2): 283–291.
- 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>
- SCAN-CM 43:95, 1995. Massanvalmistuksessa käytettävä hake – Kuiva-tuoreiheys. Scandinavian pulp, paper and board. Testing committee. Uusittu suomenkielinen käännös. 4 s.
- SCAN-CM 40:01, 2001. Wood chips for pulp production – Size distribution. Scandinavian pulp, paper and board. Testing committee. 4 p.
- Sonntag, D. 1990. Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on the FIRST-90 and Psychrometer Formula. *Z. Meteorol.* 70(5): 340–344.

- Strandström, M. 2023. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2022. Metsätehon tulostalvosarja 12/2023. 32 s. <https://www.metsateho.fi/puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2022/>
- Tetens, O. 1930. Über einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift für Geophysik 6: 297–309.
- Tilastokeskus [verkkajulkaisu] 2024. Metsäalan kone- ja autokustannusindeksi. <https://stat.fi/tup/kustannusindeksit/metsaalan-kone-ja-autokustannusindeksi.html>
- Uusvaara, O. & Verkasalo, E. 1987. Metsähakkeen tiiviys ja muita teknisiä ominaisuuksia. Folia Forestalia 683.
- Valtioneuvoston asetus mittayksiköistä 1015/2014. Suomen säädöskokoelma. 8.12.2014. <https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadskokoelma/2014/1015>
- Zanuncio A.J., Carvalho A.G., Silva. L.F., Lima. J.T., Trugilho. P.F. & Silva. J.R. 2015. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of Eucalyptus and corymbia logs. Maderas-ciencia Y Tecnologia 17: 335–344. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000031>



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki