



Puuhakekasojen itselämpenemisen hyödyntäminen hakkeen kuivauksessa ja laadunhallinnassa – HAIKU hankkeen loppuraportti

Paula Jylhä, Johanna Routa, Robert Prinz, Lauri Sikanen, Timo Muhonen, Matti Savinainen ja Annamari Laurén

Viittausohje:

Jylhä, P., Routa, J., Prinz, R., Sikanen, L., Muhonen, T., Savinainen, M. ja Laurén, A. 2022. Julkaisu nimi: Puuhakekasojen itselämpenemisen hyödyntäminen hakkeen kuivauksessa ja laadunhallinnassa – HAIKU hankkeen loppuraportti.

Tiivistelmä

Paula Jylhä¹, Johanna Routa¹, Robert Prinz¹, Lauri Sikanen¹, Timo Muhonen¹, Matti Savinainen¹ ja Annamari Laurén²

¹Luonnonvarakeskus

²Itä-Suomen yliopisto

Energian ennätyskorkea hinta, Venäjän tuontipuun korvaaminen ja huoltovarmuuden turvaaminen kiihdyttävät kotimaisen energiapuun kysyntää. Puun käytön lisääntyessä erilaisten hie-nonnettujen jakeiden kuljetus ja varastointi lisääntyvät. Varastoinnin yhteydessä tapahtuva polttoaineen laadun heikkeneminen ja kuivamassahävikki ovat ei-toivottuja ilmiöitä, joista aiheutuu taloudellisia menetyksiä. Kuivamassahävikistä voi seurata myös merkittäviä hiilipäästöjä.

Haiku-projektissa tutkittiin varastointikokeiden ja fysikaalisen mallinnuksen avulla tuuletuksen vaikutusta havupuusta koostuvan runkopuuhakkeen ja männynkuoren varastointikäyttäytymiseen lähes puoli vuotta kestäneillä varastointikokeilla. Runkopuuhakkeella tuuletuksen vaikutuksia verrattiin myös muovilla katetuista ja hengittävällä LiveTech Suoja® -vaahdolla peitetystä aumoista mitattuihin tuloksiin. Kokeessa käytetty runkopuuhake oli hyvälaatuista, ja kuivamassahävikiksi mitattiin 3–5 % (keskim. 0,5–0,9 %/kk). Männynkuorella hävikki oli 16–18 % (keskim. 2,9–3,3 %/kk). Käsittelyjen väliset erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä. Hiilidioksidia vapautui runkopuuhakkeesta kuukaudessa keskimäärin 5 kg kiintokuutiometriä kohti ja männynkuoresta 18 kg/m³. Vaikka varsinkin runkopuuhakkeen kuivamassahävikki oli maltillinen, polttoainejakeiden pitkäaikainen varastointi voi olla merkittävä päästölähde valtakunnallisella tasolla. Energiapuun varastoinnin ympäristövaikutuksiin tulisi kiinnittää aikaisempaa enemmän huomiota.

Hankkeen tulosten perusteella kuivamassa- ja energiahävikkeihin on kuitenkin vaikea vaikuttaa varastointiteknisin keinoin kustannustehokkaasti. Polttohakkeen raaka-aine kannattaakin varastoida hakettamattomana mahdollisimman pitkään. Nopeimmin hajoavien polttoainejakeiden (kuori, hakkuutähdehake) varastointiajat kannattaa minimoida. Polttoainejakeiden varastointiaikojen kattavampi seuranta ja hallinta ovatkin selkeimpiä kehittämiskohteita puupolttoaineiden arvoverkossa. Kasojen sisällä tapahtuvien ilmiöiden hallinta voisi tarjota mahdollisuuksia kääntää vääjäämättä tapahtuvat prosessit hyödyksi. HAIKU-projektissa monitoroitiin ja mallinnettiin hakekasan lämpenemisprosessi sekä tutkittiin sen hyödyntämistä kasan kuivauksessa.

Asiasanat: metsähake, kuori, puupolttoaine, varastointihävikki, hiilipäästö, tuuletus, puupolttoaineet

Sisällys

1. Johdanto	5
2. Varastointikokeiden tulokset.....	5
2.1 Runkopuuhake	5
2.2 Männyнкуori.....	14
2.3 Hakkuutähdehake	20
3. Kuivumisen fysikaalinen mallinnus.....	23
4. Varastoinnin taloudellisten vaikutusten analyysi.....	24
5. Varastoinnin ilmastovaikutukset.....	27
6. Varastoinnin häviöiden merkitys puupolttoaineiden kokonaiskäytössä	28
7. Pääteimat ja toimenpidesuositukses.....	31
Kirjallisuus	33
Liite: Polttoaineiden ominaisuuksien määrityksessä käytetyt standardit	34

1. Johdanto

Bioenergia- ja biojalostussektorin kasvavat raaka-aineen hankintamäärät edellyttävät terminaalitoimintojen jatkuvaa kehittämistä. Hakkeen varastointi on tarpeen toimitusvarmuuden turvaamiseksi, mutta se voi johtaa mittaviin kuiva-ainetappioihin ja taloudellisiin menetyksiin, ja jopa polttoaineuman itsesyttyminen on mahdollista. Itä-Suomessa etenkin Venäjältä tuotua haketta on aikaisemmin varastoitu suurina määrinä terminaaleissa ja muissa välivarastoissa. Hakkeen pitkäaikainen varastointi voi aiheuttaa merkittäviä hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Joissakin tapauksissa suurin osa hankintaketjun hiilipäästöistä saattaa syntyä varastoinnin aikana (esim. Vihersaari 2005).

Tekesin rahoittamissa LAAVA- ja BEST –tutkimushankkeissa tehtiin vuosina 2011–2016 perusteellisia hakkeen varastointikokeita, joissa aumat oli varustettu mm. lämpötilan mittausteknologialla. Mittaustulosten rinnalla analysoitiin huomattava määrä hakenäytteitä. BEST-hankkeessa koe eteni niin, että hakkutähdehakekasa kuivui sen sisällä syntyneen lämmön vaikutuksesta. Lämpeneminen myös loppui itseksensä, kun hakkeen kosteus oli alentunut niin paljon, että biologinen aktiivisuus alkoi hiipua. Kuivumisen ansiosta kuiva-ainetappiot jäivät ennakoitua pienemmiksi. Muissa tutkimuksissa on havaittu, että sopivissa olosuhteissa kasojen energiasäilytys voi jopa kasvaa. Haiku-projektin tavoitteena oli selvittää, voitaisiinko hakekasan itselämpeneminen valjastaa hyötykäyttöön ja johtaa syntyvää vesihöyryä pois kasasta tuuletamalla. Tätä tarkoitusta varten tehtiin kolme varastointikokeita, jossa aumoissa tapahtuvia prosesseja tutkittiin perinteisten menetelmien lisäksi fysikaalisen mallinnuksen keinoin. Tutkittavat polttoainelajit olivat Venäjältä tuotu runkopuuhaake ja männyn sahatuori. Lisäksi tutkittiin kasojen peittämisen vaikutusta runkopuu- ja hakkuutähdehakeella. Hanke toteuttaa öljyvapaan maakunnan ja älykkään erikostumisen tavoitteita.

2. Varastointikokeiden tulokset

2.1 Runkopuuhaake

Koeasetelma

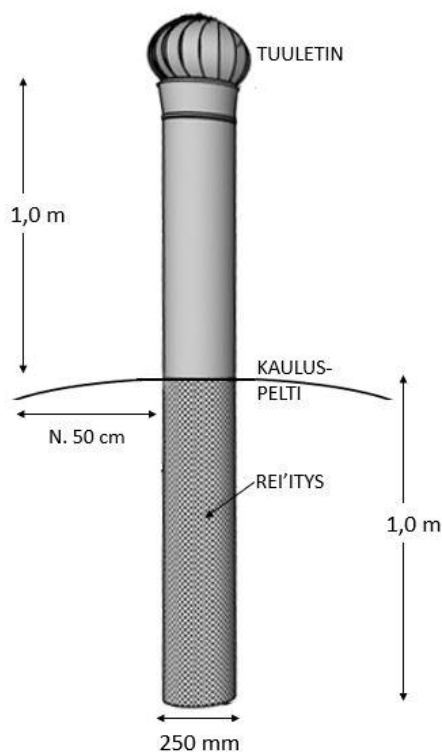
Kuopion Energian terminaalissa tehdyssä kokeessa varastoitiin Venäjältä tuotua, pääosin havupuusta koostunutta runkopuuhaketta noin kuuden kuukauden ajan. Elokuun 2020 puolivälistä helmikuun 2021 alkupuolelle jatkuneessa kokeessa tutkittiin hakkeen laadun muutoksia ja lämpötilan kehitystä kahdeksassa, kehystilavuudeltaan noin 200 m³:n (18 m × 5 m × 3,5 m) kokoisessa aumassa. Peittämättömiä aumoja oli neljä, joista kahteen asennettiin tuulettimet (2

kpl/auma). Lisäksi kaksi aumaa peitettiin muovilla ja kaksi LiveTech Suoja® -vaahdolla (<https://livetech.fi/livetech-suoja/>) (kuva 1).



Kuva 1. Koeaumojen sijoittelu Kuopion Energia Oy:n terminaalissa. Kuvassa etualalla vasemmalla peittämättömät tuuletetut aumat, oikealla peittämättömät aumat, seuraavaksi muovilla peitetyt aumat ja viimeisenä aumat, joita ei ole vielä peitetty LiveTech Suojalla®.

Tuulettimien käyttöä tutkittiin aiempien käytännön kokeiden ja havaintojen perusteella tehtyjen oletusten vahvistamiseksi. Kasojen sisällä syntyvä lämpö pyrkii ylöspäin, ja usein lumen olla olevien aumojen pinnalla näkyy sulia kohtia ja höyryäviä laikkuja. Oletuksena oli, että tuuletusputkien avulla auman sisällä syntyvä lämpö voidaan johtaa ulos ja vähentää kosteuden tiivistymistä auman yläosiin. Sisäosien viileneminen voisi myös pienentää kuivamassahävikkiä. Tavoitteena oli rakentaa uudelleen käytettävissä oleva tuuletin, joka ei vaatisi ulkopuolista energialähdettä toimiakseen. Tutkimusta varten teetettiin neljä halkaisijaltaan 250 mm tuuletusputkea galvanoidusta 1 mm:n teräspelistä (kuva 2). Auman sisään jäänyt osa, joka oli puolet putken 220 cm:n kokonaispituudesta, oli reikälevyä. Rei'itys mahdollisti ilman virtaamisen, mutta esti putkea täyttymästä hakkeella. Auman ulkopuolelle tullut osa oli ilmastointiputkea. Putken suulle asennettiin tuulen ja ilmavirran voimasta toimiva "huippuimuri".



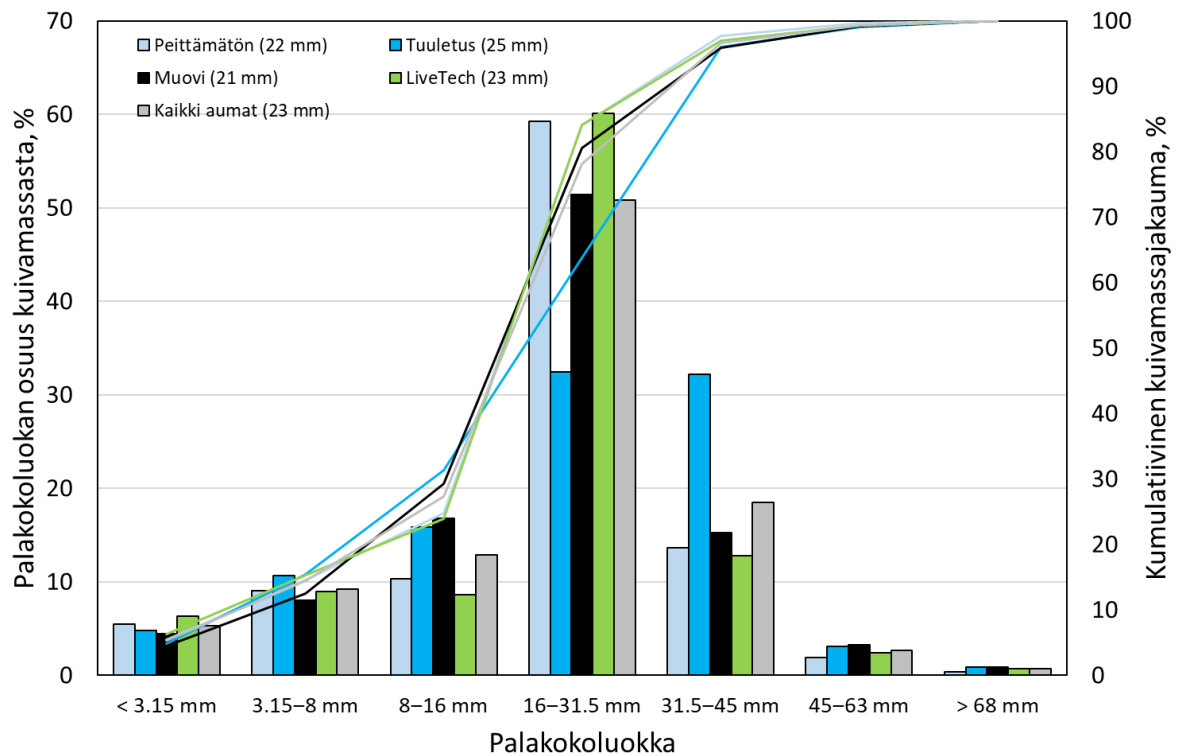
Kuva 2. Periaatekuva Kuopion ja Uimaharjun kokeessa käytetyistä tuuletusputkista.

Varastointiterminaaliin sijoitetun sääaseman tunnin välein rekisteröimien mittaustulosten mukaan keskilämpötila oli kokeen aikana 2,6 °C. Se on samaa luokkaa kuin Ilmatieteen laitoksen lähialueilla sijaitsevien sääasemien mittaustulosten perusteella interpoloitu keskilämpötila vastaavalla ajanjaksolla vuosina 2001–2020. Ilmatieteen laitoksen aineistojen perusteella arvioitu sademäärä varastointikokeen aikana (384 mm) oli hieman em. ajanjakson keskiarvoa suurempi.

Kunkin näytepisteen (yht. 16 kpl) läheisyydestä otettiin aumaa rakennettaessa noin 20 litran hakenäytteet, joiden avulla selvitettiin varastoinnin vaikutusta hakkeen laatuun ja kuivamassahävikkiin. Näytteet homogenisoitiin ja jaettiin kahteen osaan. Toinen osa vietiin laboratorioon analysoitavaksi ja toinen osa pakattiin verkkopussiin, jonka silmäkoko oli 1 mm. Nämä näytepussit sijoitettiin tasavälein kahteen kerrokseen, noin yhden ja kahden metrin korkeudelle maanpinnasta. Lisäksi hakeaumoihin asennettiin verkkopussien viereen yhteensä 58 lämpötila-anturia (8–13 kpl/auma) mittaamaan auman sisäistä lämpötilaa tunnin välein.

Kaikista kokeen perustamisvaiheessa otetuista näytteistä määritettiin mm. hakkeen kosteus, osasta (8 kpl/auma) myös lämpöarvo. Vastaavat määritykset tehtiin kokeen jälkeen aumoista poistetuista näytteistä, mutta muutama verkkopussi rikkoutui aumoja purettaessa. Kokeen perustamisen yhteydessä alemmalta näytetasolta koostettiin aumakohtaisesti noin 30 litran näytteet hakkeen palakoon määrittämistä varten. Se vaihteli 20:n ja 25 mm:n välillä (kuva 3).

Laboratorioanalyysissä sovelletut standardit on kuvattu liitteessä 1. Päästölaskelmissa runko-puuhakkeen hiilipitoisuudeksi oletettiin 51 %. (Thomas ja Martin 2012). Kuivamassat muunnettiin laskelmissa tilavuuksiksi olettamalla hakkeen kuiva-tuoretiheydeksi 390 kg/m³ Alakankaan ym. (2016) kirjallisuuskatsauksen perusteella.

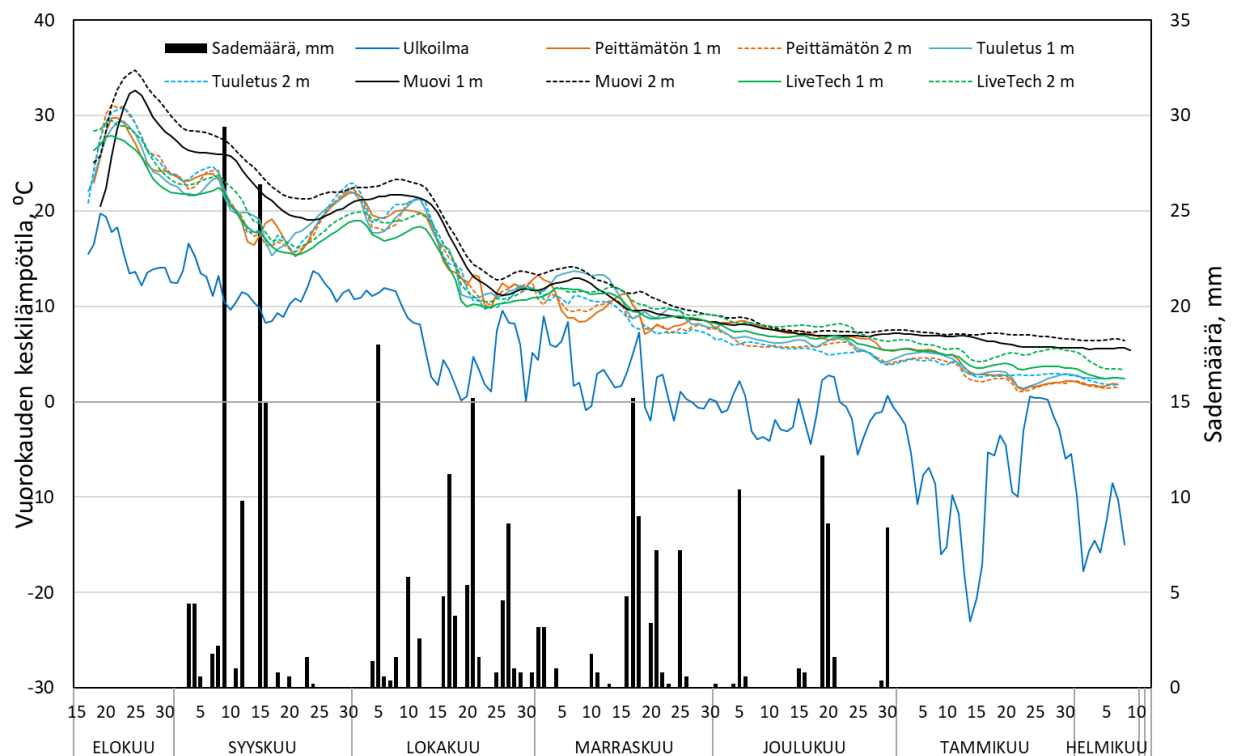


Kuva 3. Hakkeen keskimääräiset palakokoluokkien osuudet kuivamassasta ja kumulatiiviset kuivamassat varastointikäsitellyittäin. Kunkin aumatyyppin mediaanipalakoko (mm) on ilmoitettu sulkeissa selitteessä.

Lämpötilan kehitys

Aumatyyppien väliset erot lämpötilan kehityksessä olivat varsin pieniä (kuva 4). Korkeimmat lämpötilat mitattiin noin viikon kuluttua kokeen alkamisesta. Korkein vuorokausikohtainen keskilämpötila, 35 °C, saavutettiin muovilla peitetyjen aumojen ylemmässä näytekerruksessa noin kahden metrin korkeudella. Lämpötilan kehitys peittämättömissä ja LiveTech Suoja® -vaahdolla peitetyissä aumoissa oli hyvin samankaltaista, ja niissä myös näytekerrosten väliset lämpötilaerot olivat vähäisiä. Muovilla peitetyissä aumoissa lämpötila pysyi tasaisempana ja seurasi ulkoilman lämpötilan muutoksia pitemmällä viiveellä kuin muissa aumoissa. Todennäköisesti pienet erot muiden aumatyyppien välillä johtuivat siitä, että järeästä

runkopuuhakkeesta tehty hake on palakokojakaumaltaan tasaista ja kasat ovat siten hyvin ilmastoituja jo itsessään. Tällöin tuuletus ei juuri tehosta ilmastointia, eikä hengittävä peitemateriaali toisaalta rajoita tuuletusta. Tuuletuksen vaikutus lämpötilan kehitykseen näkyi lähinnä siten, että lämpötilat joissakin alemman kerroksen mittauspisteissä laskivat ilmastointiputkien lähellä kovilla pakkasilla selvästi pakkasen puolelle, kun ne muiden aumojen vastaavissa pisteissä pysyivät nollan yläpuolella.

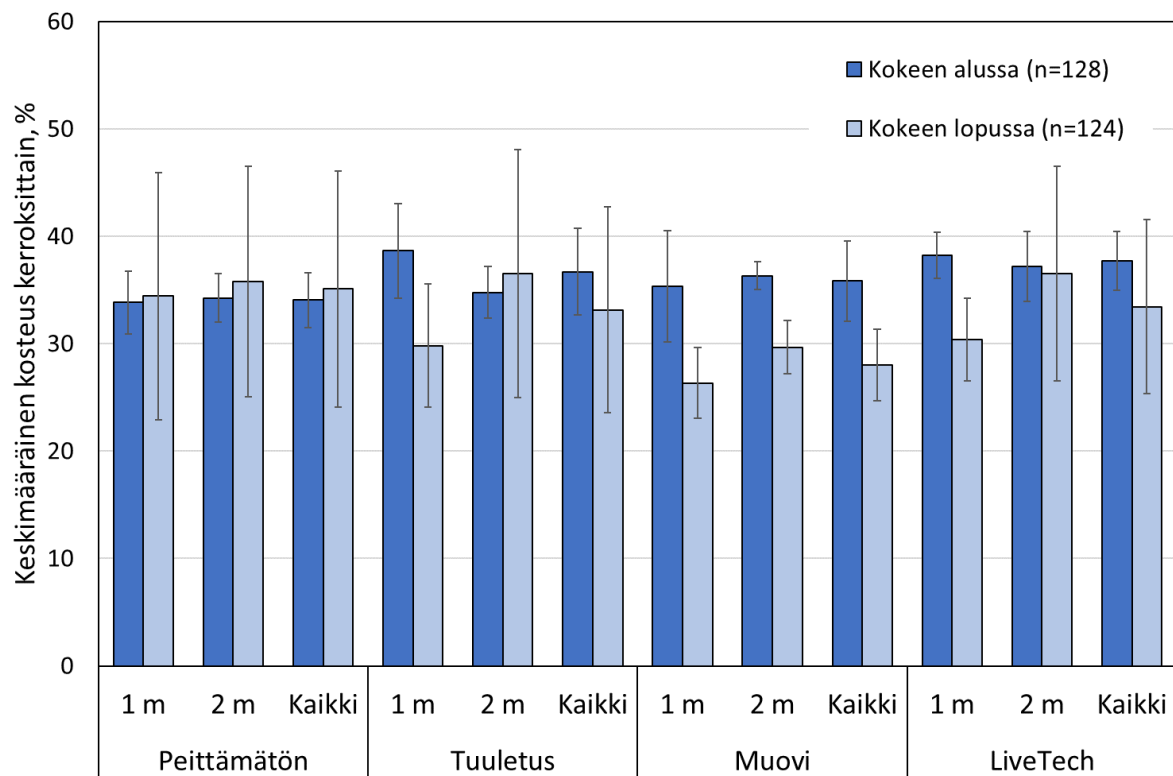


Kuva 4. Ulkoilman lämpötila, auman sisältä mitatut aumatyyppittävät keskilämpötilat kerroksittain sekä sademäärät. Lämpötilat ovat tunnin välein mitatuista havainnoista laskettuja vuorokausikohtaisia keskiarvoja. Kuvasta puuttuu mahdollinen pakkaspäivien sadanta, koska kohteessa käytetyn sääaseman sademittari ei toimi alle nollan asteen lämpötiloissa.

Hakkeen laadun muutokset

Hakenäytteiden keskimääräinen kosteus oli ennen koetta 36 % ($\pm 3,6$ %-yks.) ja kokeen jälkeen 32 % ($\pm 8,8$ %-yks.). Hakkeen keskimääräinen kosteus lisääntyi peittämättömissä ja tuuletamattomissa aumoissa ja pieneni muissa hieman (kuva 5). Kosteus aleni eniten muovilla peitetyissä aumoissa, varsinkin alemmassa kerroksessa. Muovi ei kuitenkaan läpäise vesihöyryä, joten kosteus todennäköisesti tiivistyi kasan pintakerrokseen. Kuopion Energia Oy:n polttoainevastaanoton seurannassa muovilla peitetyistä aumoista peräisin olleen hakkeen keskimääräinen kosteus oli lähes sama kuin varastointikokeen alussa otetuista näytteistä määritetty

kosteus (36 % vs. 38 %). Muiden aumojen hake oli Kuopion Energia Oy:n seurannan mukaan huomattavasti kosteampaa kuin alussa, mutta todennäköisesti hakkeen sekaan päätynyt lumi ja jää nostivat kosteutta jonkin verran (kuva 5).

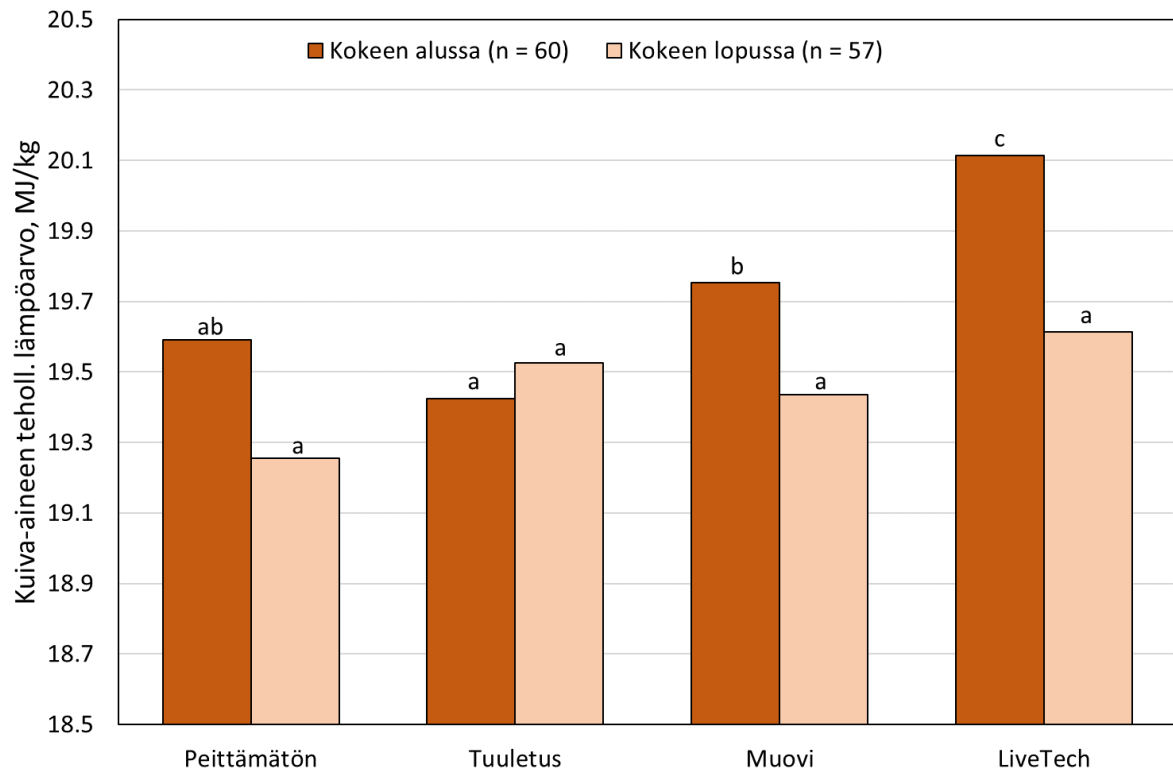


Kuva 5. Hakenäytteiden keskimääräiset kosteudet ja kosteuden keskihajonnat kokeen alussa ja lopussa varastointikäsittelyittäin ja näytekerroksittain.



Kuva 6. Kuopion kokeen purku. Kuva: Kuopion Energia Oy / Essi Holopainen.

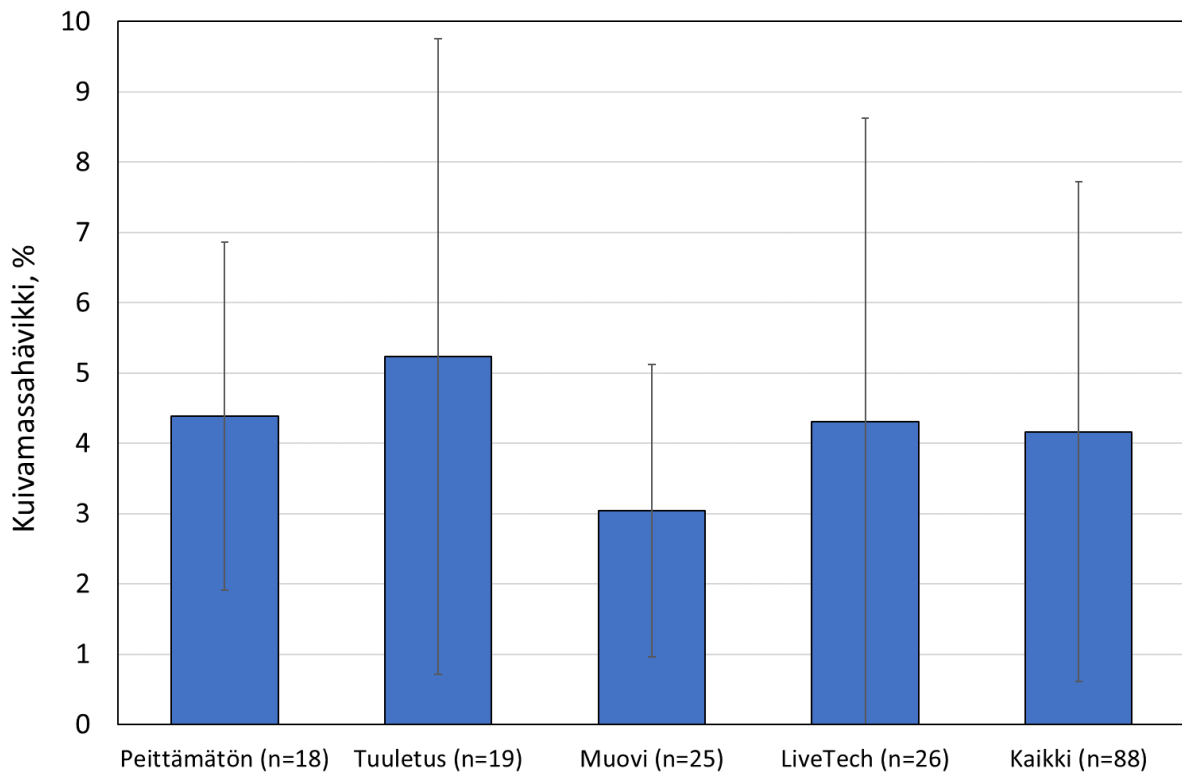
Kaikkien varastointikokeen alussa otettujen hakenäytteiden keskimääräinen kuiva-aineen lämpöarvo oli $19,7 \text{ MJ/kg}$ ($\pm 0,8 \text{ MJ/kg}$) ja kokeen jälkeen otettujen $19,4 \text{ MJ/kg}$ ($\pm 2,0 \text{ MJ/kg}$). Korkeimmat lämpöarvot kokeen alussa mitattiin LiveTech Suoja® -vaahdolla peitetyistä aumoista otetuista näytteistä, mutta kokeen jälkeen mitatuissa kuiva-aineen lämpöarvoissa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja (kuva 7). Kostean hakkeen lämpöarvo oli kokeen alussa keskimäärin $11,7 \text{ MJ/kg}$ ($\pm 0,8 \text{ MJ/kg}$) ja kokeen lopussa $12,3 \text{ MJ/kg}$ ($\pm 2,0 \text{ MJ/kg}$), eikä siinä ollut eroja varastointikäsittelyjen välillä.



Kuva 7. Hakkeen keskimääräiset teholliset lämpöarvot kuiva-aineessa (MJ/kg) varastointikokeen lopussa ja alussa. Samalla kirjaimella merkityt ennen koetta ja kokeen jälkeen mitatut keskiarvot eivät poikkea tilastollisesti merkitsevästi toisistaan ($p < 0,05$).

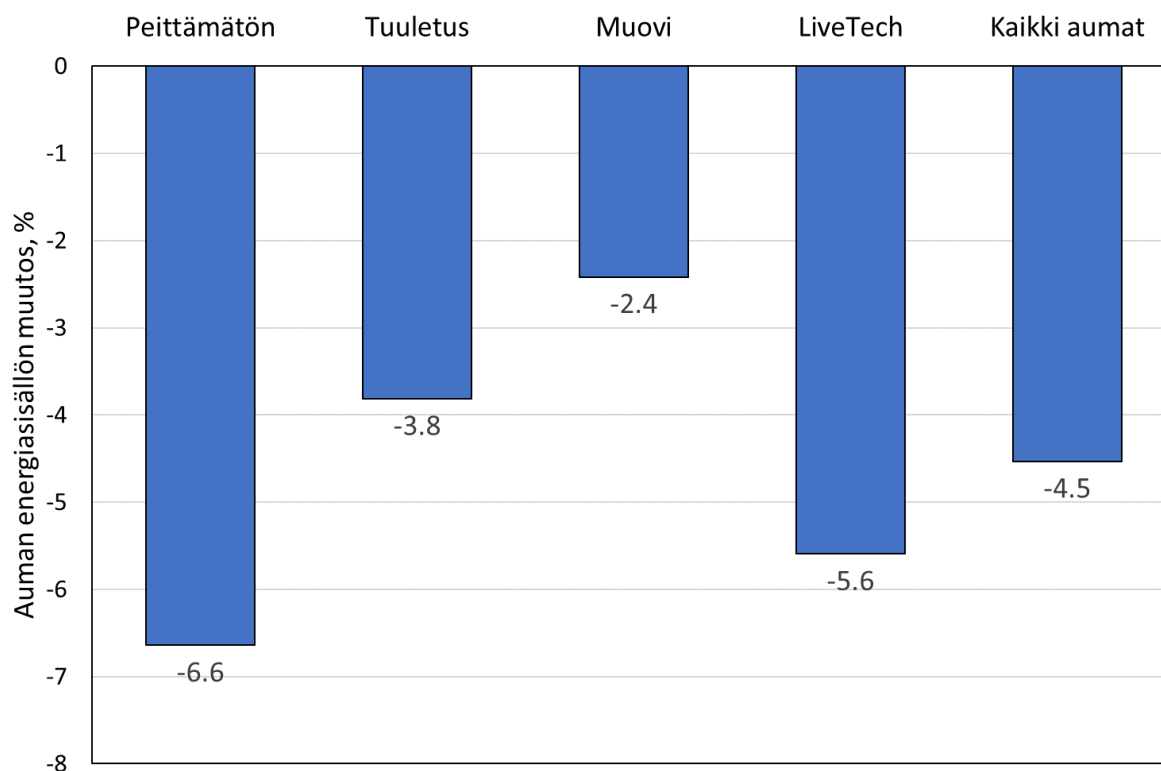
Varastointihävikki

Keskimääräinen kuivamassahävikki varastointikokeen aikana oli noin 4,2 % ($\pm 3,6$ %-yks.). Hävikki oli pienin muovilla peitetyissä aumoissa (kuva 8), mutta erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.



Kuva 8. Keskimääräiset runkopuuhakkeen kuivamassahävikit (%) ja kuivamassahävikin keskihajonnat (%-yksikköä) Kuopion kokeessa varastointikäsitteilyittäin ja koko aineistossa.

Vaikka keskimääräiset kosteudet laskivat ja kostean polttoaineen lämpöarvot nousivat peittämättömiä aumoja lukuun ottamatta, nämä muutokset eivät riittäneet kompensoimaan kuiva-ainetappioista johtuvaa energiahävikkiä. Kasojen energiasisältö väheni keskimäärin 4,5 % (0,8 %/kk) (kuva 9). Peittämättömien ja tuulettamattomien aumojen energiasisältö pieneni kokeen aikana eniten, lähes seitsemän prosenttia. Pienimmät energiahävikit mitattiin muovilla peitetyissä aumoissa. Tulokset eivät kuitenkaan edusta välttämättä kokonaisia aumoja, sillä verkko-pussimenetelmällä ei yleensä pystytä kuvaamaan riittävän tarkasti aumojen sisälle muodostuvia vyöhykeitä ja niiden sisällä tapahtuvia, energiasisältöön vaikuttavia muutoksia. Lämpenevästä hakkeesta vapautuva vesihöyry nousee ylös ja osa siitä tiivistyy auman pintakerrokseen, varsinkin hengittämättömällä materiaalilla peitetyissä aumoissa. Kosteuden lisääntyminen ei ollut kuitenkaan havaittavissa vielä kahden metrin korkeudella varastoiduissa näytteissä (kuva 5).



Kuva 9. Keskimääräiset aumojen energiasisällön muutokset (%) Kuopion varastointikokeen aikana.

2.2 Männynkuori

Koeasetelma

Stora Enso Oyj:n Uimaharjun sahan terminaalissa järjestetyssä varastointikokeessa selvitettiin tuuletuksen vaikutusta männynkuoren varastointihävikkiin, laatuun ja lämpötilan kehitykseen. Koe kesti yhteensä noin 5,5 kk; huhtikuun 2021 puolivälistä syyskuun loppuun saakka. Kuori-aumojen pituus oli 19,3–23,5 m, leveys 8,1–8,2 m ja korkeus 2,9–3,5 m. Tuuletetun kuoriauman kehystilavuus oli 318 m³ ja tuulettamattoman 276 m³. Kuoren laadun muutoksia tutkittiin verkopussimenetelmällä samaan tapaan kuin Kuopion kokeessa runkopuuhakkeella. Molempiin aumoihin sijoitettiin yhteensä 25 näytepussia kolmeen kerrokseen siten, että kahteen alimpaan kerrokseen 1 ja 2 m:n korkeuksille tuli kymmenen pussia ja ylimpään kerrokseen 3 m:n korkeudelle viisi pussia. Lämpötilaa mitattiin tunnin välein antureilla, joita asennettiin näytepussien viereen 5 kpl kuhunkin kerrokseen (yht. 15 kpl/auma). Aumat jätettiin peittelemättä, ja toiseen asennettiin Kuopion kokeessa käytetyt tuulettimet tasavälein (yhteensä 4 kpl, kuva 10). Laboratorioanalyysissä sovelletut standardit on kuvattu liitteessä 1. Päästölaskennassa männynkuoren hiilipitoisuudeksi oletettiin 54 %. Kuivamassat muunnettiin laskelmissa tilavuuksiksi

olettamalla kuoren kuiva-tuoretiheydeksi 300 kg/m^3 . Molemmat luvut perustuvat Alakankaan ym. (2016) kirjallisuuskatsaukseen.



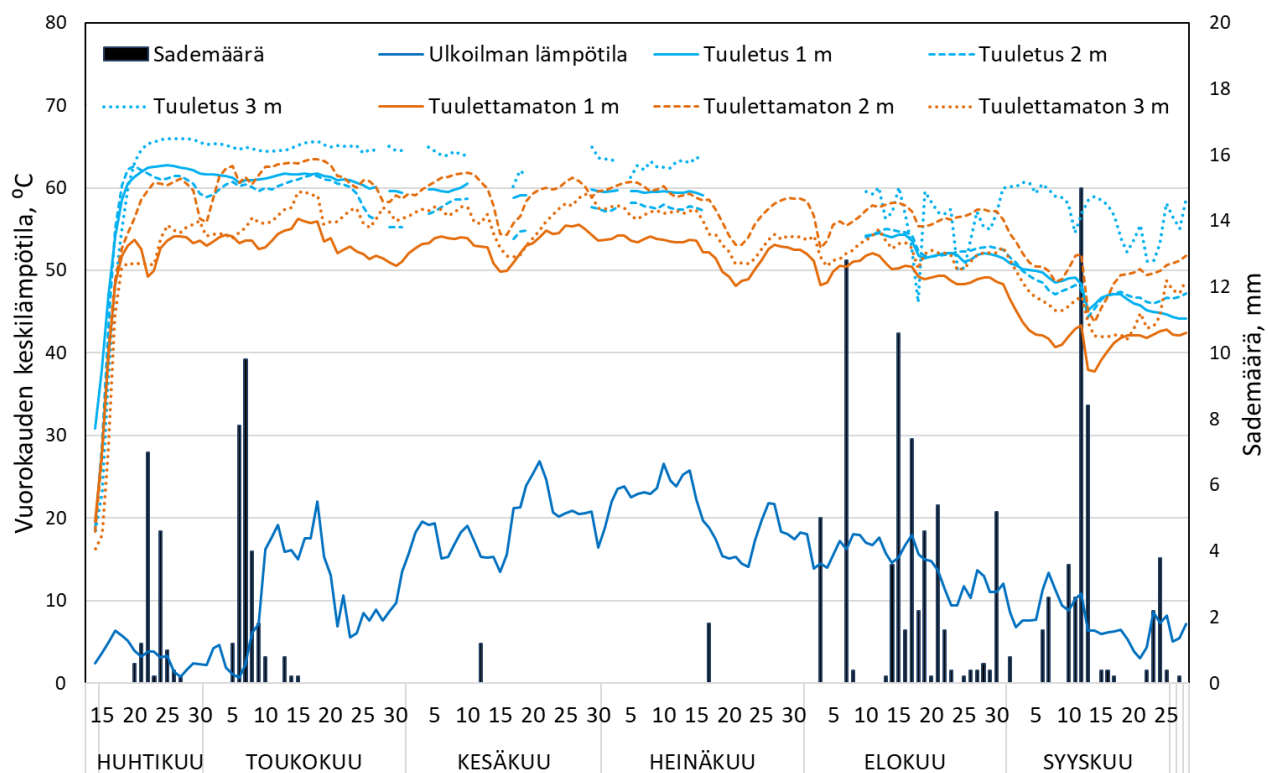
Kuva 10. Uimaharjun varastointikokeessa toiseen männynkuoriaumaan asennettiin neljä tuuletinta, joita käytettiin aikaisemmin Kuopion varastointikokeessa. Galvanoidusta 1 mm:n teräksestä valmistetut tuuletusputket syöpyivät kuoriaumoissa voimakkaasti.

Lämpötilan kehitys

Molemmat aumat rakennettiin samana päivänä tuoreesta kuoresta, joka oli peräisin korkeintaan vuorokautta aiemmin sahatuista tukeista. Kuoren lämpeneminen oli havaittavissa jo aumoja rakennettaessa (kuva 11). Lämpötila-antureiden toiminnassa oli katkoksia tuuletetussa aumassa (kuva 12). Vertailukelpoisilla mittausjaksoilla kaikkien mittauspisteiden keskilämpötila oli tuuletetussa aumassa keskimäärin 57°C ja tuulettamattomassa 52°C . Yksittäisissä mittauspisteissä saavutettiin enimmillään yli 65 asteen vuorokausikohtaisia keskilämpötiloja. Ulkoilman lämpötilan vaihtelut eivät juuri vaikuttaneet aumojen sisäiseen lämpötilaan.



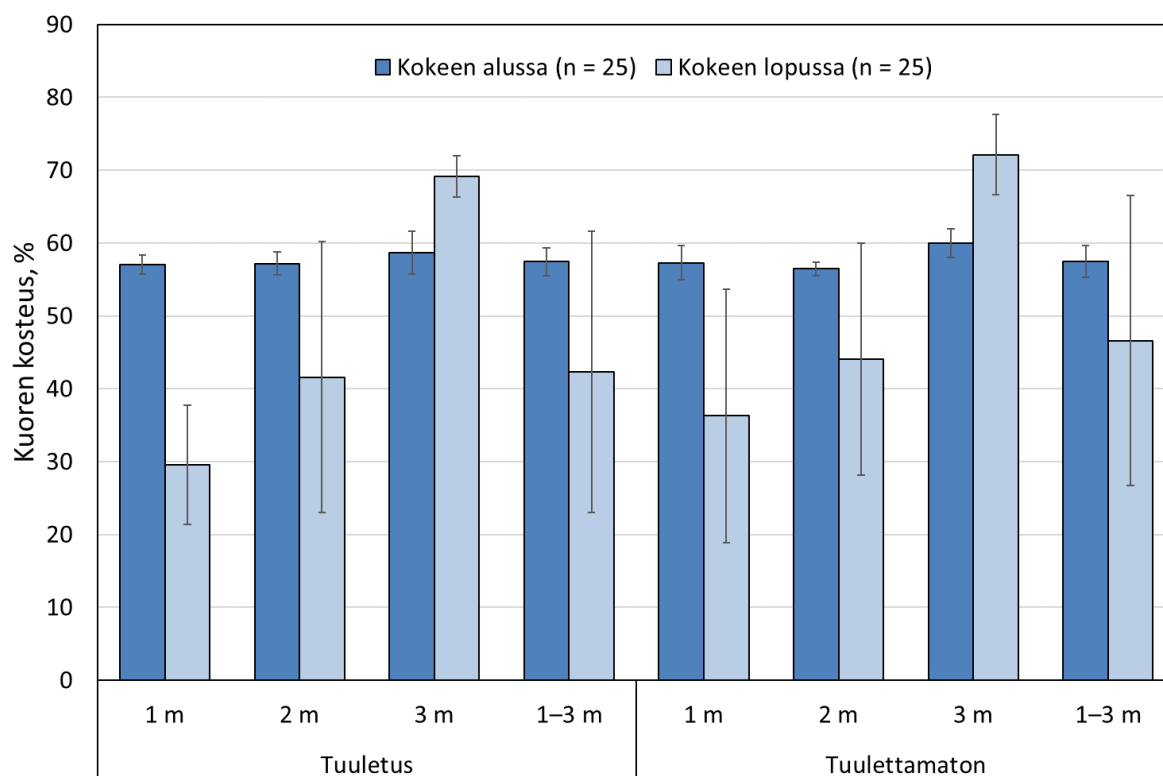
Kuva 11. Uimaharjun koeauman rakentamista. Kokeessa käytetty kuori oli peräisin korkeintaan vuorokautta aikaisemmin sahatuista tukeista, mutta sen lämpeneminen oli jo käynnistynyt.



Kuva 12. Ulkoilman lämpötilä, kasan sisältä mitatut lämpötilat kerroksittain sekä sademäärät Uimaharjun varastointikokeen aikana. Lämpötilat ovat tunnin välein mitatuista havainnoista laskettuja vuorokausikohtaisia keskiarvoja.

Kuoren laadun muutokset

Männynkuoren kosteus oli kokeen alussa keskimäärin 57 %, mistä se laski kokeen loppuun mennessä tuuletetussa aumassa 42 %:iin ja tuulettamattomassa 47 %:iin (kuva 13). Kuivuminen oli voimakkainta alimmassa kerroksessa metrin korkeudella. Tuuletetussa aumassa alimman kerroksen kosteus aleni keskimäärin 27 prosenttiyksiköllä ja tuulettamattomassa 21 prosenttiyksiköllä. Molemmissa aumoissa kosteus lisääntyi lähellä auman pintaa sijainneessa ylimässä mittauskerroksessa, tuulettamattomassa aumassa hieman enemmän kuin tuuletetussa. Todennäköisesti hake kostui sekä sadannan että alemmista kerroksista nousseen vesihöyryn tiivistymisen vuoksi.



Kuva 13. Keskimääräiset kosteudet sekä kosteuden keskihajonnat kokeen alussa ja lopussa kuoriauman eri kerroksissa (1–3 m) ja koko aumassa.

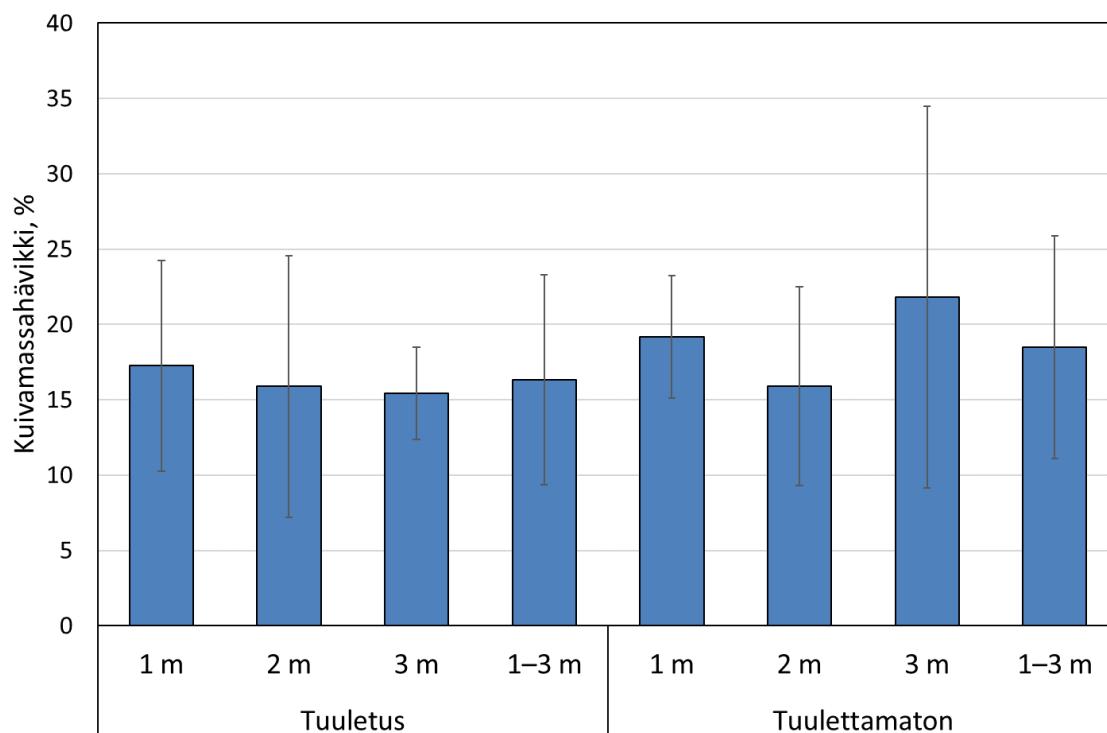
Kuoren kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo oli kokeen alussa ja lopussa keskimäärin 21 MJ/kg (Taulukko 1), eikä aumojen välillä ollut tilastollisesti merkitseviä eroja. Kostean kuoren keskimääräinen lämpöarvo nousi varastoinnin tuulettamattomassa kasassa 38 % ja tuuletetussa 20 %. Kuoren keskimääräinen tuhkapitoisuus nousi varastointikokeen aikana 1,8 %:sta 2,3 %:iin, eikä aumojen välillä ollut eroja.

Taulukko 1. Kuivan ja kostean männynkuoren teholliset lämpöarvot (MJ/kg) varastointikokeen alussa ja lopussa.

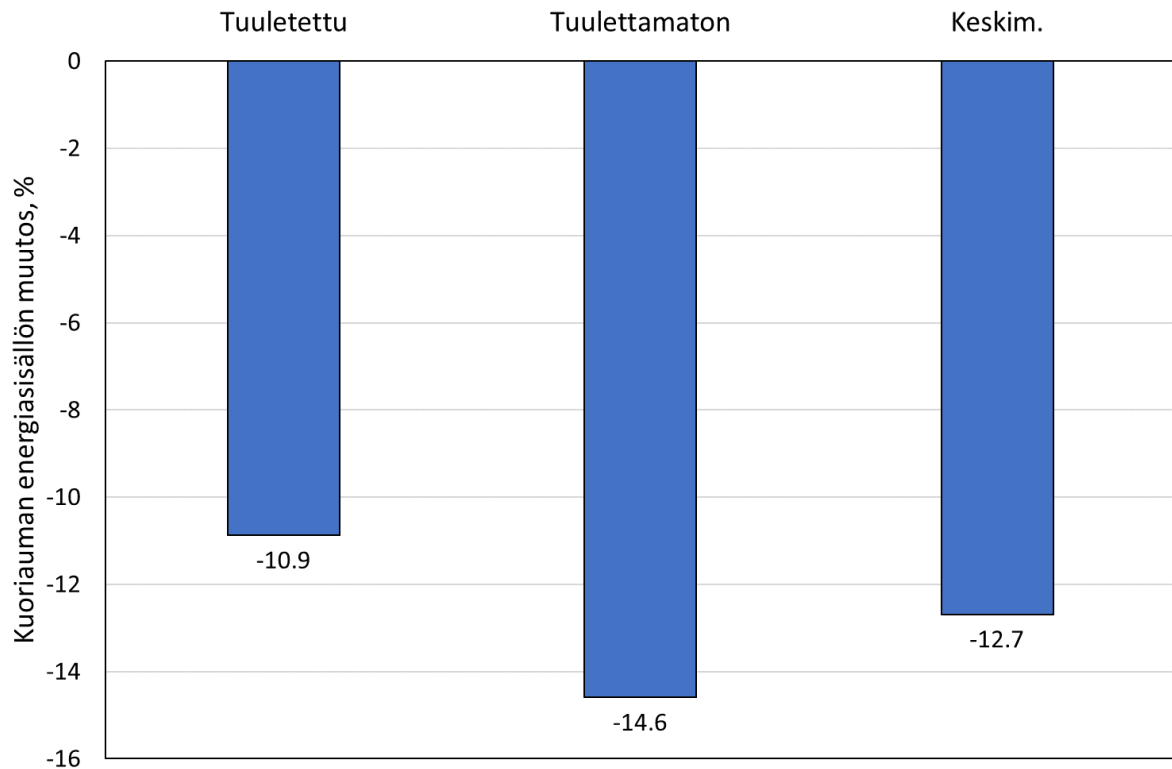
		Kuiva kuori, MJ/kg		Kostea kuori, MJ/kg	
		Alussa	Lopussa	Alussa	Lopussa
Tuuletetty auma	Keskiarvo	21.2	20.8	7.8	9.4
	Havaintojen lkm	9	9	9	9
	Keskihajonta	0.1	0.4	0.3	4.2
Tuulettamaton auma	Keskiarvo	21.1	20.8	7.6	10.5
	Havaintojen lkm	9	9	9	9
	Keskihajonta	0.2	0.3	0.6	5.1
Molemmat aumat	Keskiarvo	21.1	20.8	7.7	9.9
	Havaintojen lkm	18	18	18	18
	Keskihajonta	0.2	0.3	0.5	4.6

Varastointihävikki

Kuivamassahävikki oli tuuletetussa aumassa keskimäärin 16 % (2,9 %/kk) ja tuulettamattomassa 18 % (3,3 %/kk) (kuva 14). Tuuletetussa aumassa suurin hävikki mitattiin alimmassa kerroksessa, tuulettamattomassa ylimmässä kerroksessa. Kuoren kuivuminen ei riittänyt kompensoimaan hajoamisesta johtuvaa hävikkiä, joten aumojen energiasisältö pieneni 11–15 % (kuva 14). Keskimääräinen energiahävikki oli 2,3 % kuukaudessa.



Kuva 14. Keskimääräiset kuivamassahävikit männynkuoriaumojen eri korkeuksilla ja keskimäärin Kuopion varastointikokeessa.



Kuva 15. Männynkuoriaumojen keskimääräiset energiasisällön muutokset Uimaharjun varastointikokeessa.

2.3 Hakkuutähdehake

Koeasetelma

Varpaisjärven terminaaliin tehtiin kaksi hakkuutähdehakekasaa (havu- ja lehtipuu hakkuutähdeitä), jotka olivat kooltaan noin 3 000 m³ (25 m x 25 m x 5,5 m). Toinen kasoista peitettiin muovilla ja toinen LiveTech Suojalla® (kuva 16). Varastointiaika oli kolme kuukautta, syyskuusta 2020 joulukuuhun. Sadekertymä kokeen aikana oli 235 mm ja keskilämpötila 3,9 C°. Sekä sadekertymä että keskilämpötila olivat pitkänajan keskiarvoja (2001–2019) suuremmat 174 mm ja 1,7 C°.

Kokeen aluksi otettiin 32 näytettä kummastakin kasasta, ja näytteistä analysoitiin hakkeen kosteus, lämpöarvo ja tiheys. Näytteet otettiin valmiiden kasojen sivuilta 1,5 metrin ja 3 metrin korkeudelta noin 0,5–1,5 metrin syvyydestä ja näytteenottopaikkojen välillä oli noin 5 metriä. Varpaisjärven kokeessa ei käytetty hakkeen laadun muutosten seurannassa verkkopussimenetelmää eikä mitattu kasojen sisäisiä lämpötiloja.



Kuva 16. Vasemmalla muovilla peitetty, oikealla LiveTech Suojalla® peitetty hakkuutähdekasa Varpaisjärven kokeessa.

Kosteuden muutos

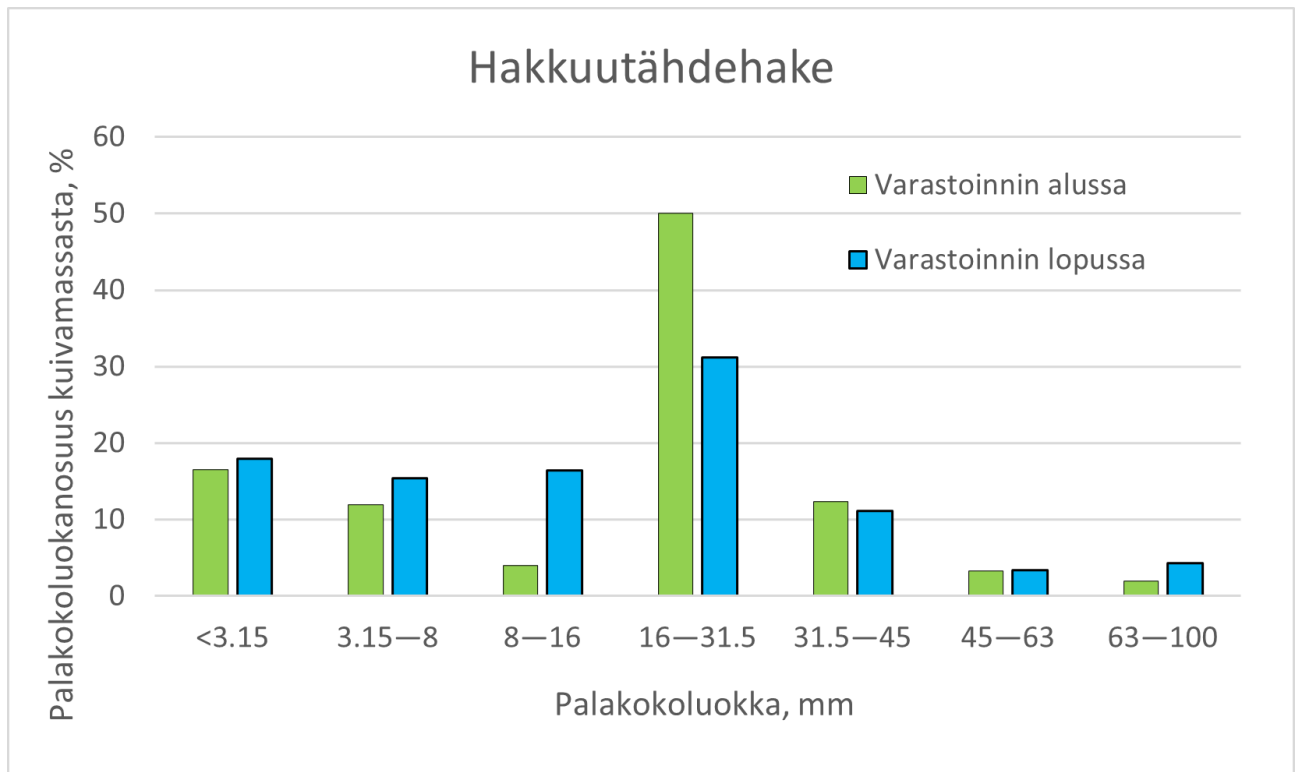
Hakkeen kosteus kokeen alussa muovilla peitettyssä kasassa oli keskimäärin 34 % (± 10 %-yks.). Kosteus laski varastoinnin aikana kuusi prosenttiyksikköä ja oli 31 % (± 7 %-yks.). Alku- ja loppukosteuksien ero ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä ($p=0,4$). LiveTech Suojalla® peitettyssä kasassa hake oli huomattavasti kosteampaa jo alussa, jolloin keskimääräinen kosteus oli 41 % (± 7 %-yks.). Kosteus lisääntyi varastoinnin aikana 8 prosenttiyksikköä ja oli kokeen lopussa 49 % (± 11 %-yks.). Ero oli tilastollisesti merkitsevä ($p=0,00$).

Tiheyden muutos

Kokeen alussa hakkuutähdehakkeen kuiva-tuoretiheys oli keskimäärin 446 kg/m^3 ($\pm 20 \text{ kg/m}^3$, vaihteluväli $405\text{--}499 \text{ kg/m}^3$). Kolmen kuukauden varastoinnin jälkeen mitattu kuiva-tuoretiheys oli 441 kg/m^3 ($\pm 27 \text{ kg/m}^3$, vaihteluväli $378\text{--}491 \text{ kg/m}^3$), mutta alku- ja lopputiheyksienero ei ollut tilastollisesti merkitsevä ($p=0,34$).

Palakoko

Hakkeen palakoko oli luokassa P31 sekä ennen että jälkeen varastoinnin (kuva 17). Hienoaikoksen määrä lisääntyi varastoinnin aikana, ja sen osuus oli varastoinnin jälkeen lähes 20 prosenttia (F20).



Kuva 17. Hakkeen keskimääräiset palakokoluokkien osuudet kuivamassasta ennen varastointia ja varastoinnin jälkeen.

Lämpöarvo ja energiasisältö

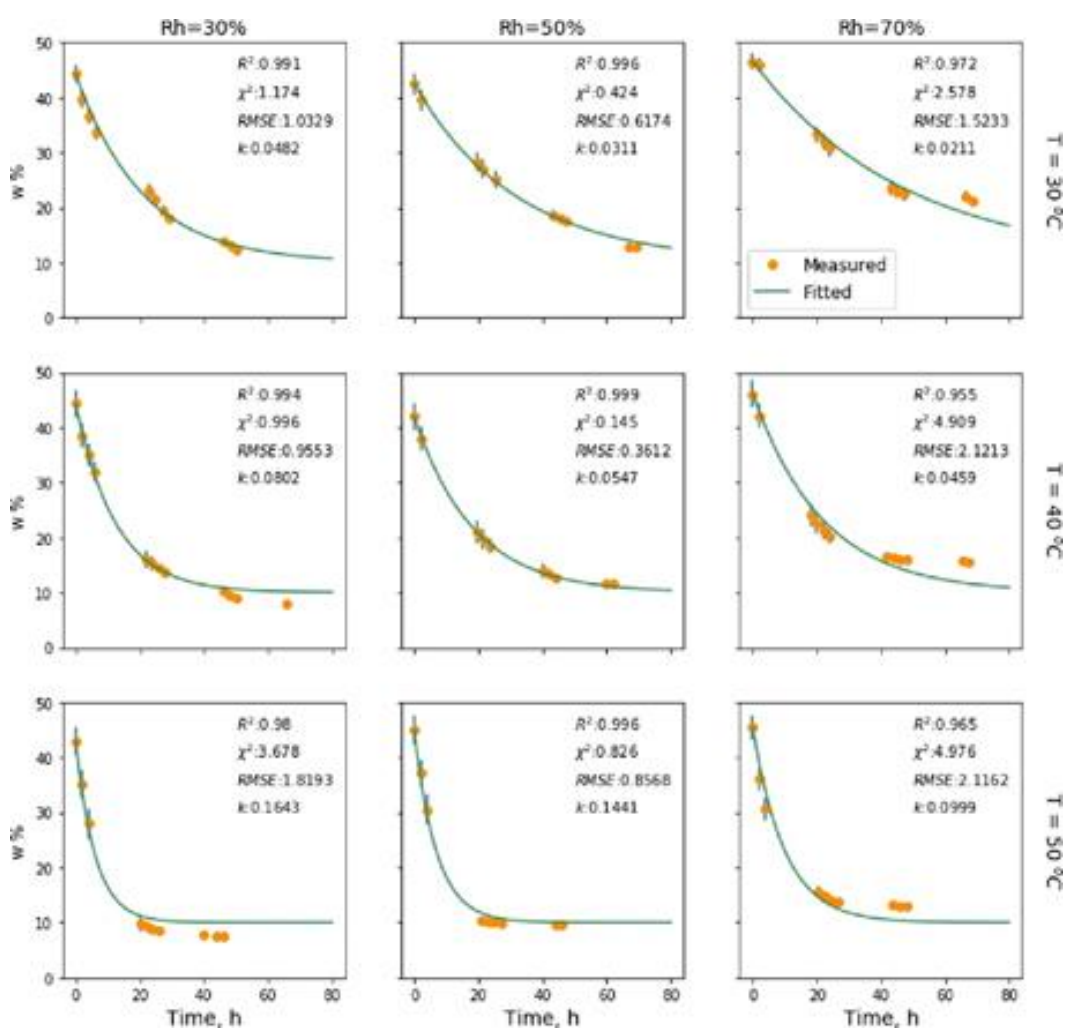
Hakkuutähdehakkeen kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo oli varastoinnin alussa molemmissa kasoissa keskimäärin $20,44 \text{ MJ kg}^{-1}$, ja se laski varastoinnin aikana noin kolme prosenttia $19,79 \text{ MJ kg}^{-1}$:iin.

Kiintokuutiometriä kohti keskimääräisten kosteuksien, kuiva-tuoretiheyksillä laskettu kostean hakkeen energiasisältö oli kokeen alussa molemmissa kasoissa keskimäärin $2,36 \text{ MWh/m}^3$ ja kokeen lopussa muovilla peitetyssä kasassa $20,34 \text{ MWh/m}^3$, ja LiveTech Suojalla® peitetyssä kasassa $2,25 \text{ MWh/m}^3$. Hakkeen kiintokuutiometrikohtainen lämpöarvo aleni varastoinnin aikana 4–5 %.

3. Kuivumisen fysikaalinen mallinnus

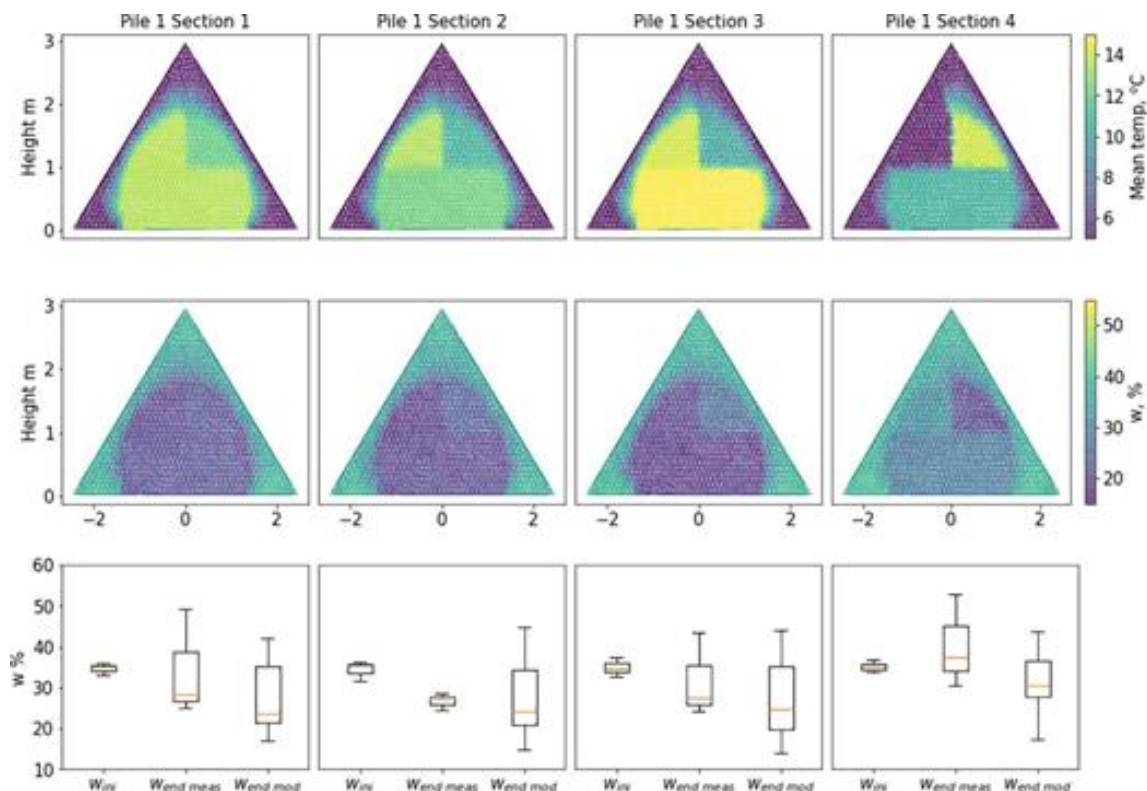
Orgaanisen aineen biologinen hajoaminen on eksoterminen reaktio, joka aiheuttaa hakekasan itselämpenemistä. Kasa lämpenee eniten keskiosistaan ja kenttäkokeissa seurattujen kasojen keskiosan lämpötila pysyi koko puolen vuoden tutkimusjakson ajan korkeampana kuin ympäröivän ilman lämpötila. Hakkeen kuivumisessa voidaan erottaa kaksi vaihetta: kosteuden siirtyminen hakepartikkelista kasan sisällä oleviin ilman täyttämiin huokosiin ja vesihöyryn kulkeutuminen kasan sisältä ympäröivään ilmaan. Lämpötila ja ilmankosteus vaikuttavat molempiin näistä prosesseista.

Laboratoriossa tehdyillä kuivumiskokeilla selvitettiin hakelastujen kuivumisnopeus eri lämpötiloissa ja ilmankosteuksissa (kuva 19) ja tuloksista tehtiin tilastollinen hakelastun kuivumismalli. Hakelastun kuivuminen seurasi kaikilla lämpötila-ilmankosteus kombinaatioilla ensimmäisen kertaluokan hajoamismallia, mikä tarkoittaa, että samassa aikayksikössä kuivuu aina samansuuruinen suhteellinen osa kuivattavissa olevasta vedestä. Selittävinä muuttujina olivat lämpötila ja kosteus.



Kuva 19. Hakelastun kuivuminen eri lämpötiloissa ja ilman suhteellisissa kosteuksissa.

Hakekasan kuivumista tutkittiin matemaattisella kaksiulotteisella mallilla (kuva 20), jossa laskettiin vesihöyryn diffuusiota käyttäen hyväksi hakekasoista mitattuja ominaisuuksia (kuiva-tuoretiheys, huokostilavuus, poikkileikkauksen muoto) ja muuttujia (sisälämpötila), sekä ympäröivän ilman kosteutta ja lämpötilaa. Tilastollista hakkeen kuivumismallia (Ahmadinia ym. 2022) käytettiin hakekasamallissa vesihöyryn lähdeterminä.

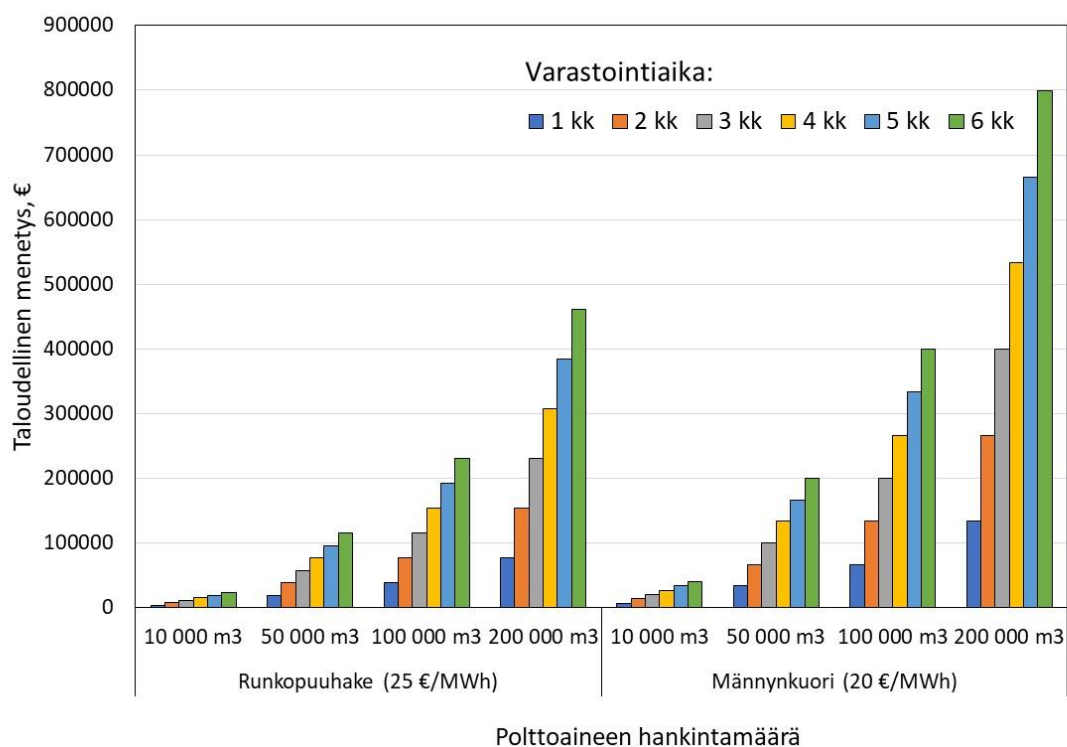


Kuva 20. Hakekasan keskimääräinen lämpötilajakauma eri poikkileikkauksissa tutkimusjakson aikana (ylin rivi) ja matemaattisella mallilla laskettu hakkeen kosteusjakauma kokeen lopussa (keskimmäinen rivi), sekä mitattu hakkeen kosteus kokeen alussa ja lopussa, sekä mallinnettu kosteus kokeen lopussa (alin rivi).

Mallinnuksella havaittiin, että hakkeen kuivumista rajoittaa ensikädessä vesihöyryn hidas diffuusionopeus kasan sisältä ulos, eikä niinkään lastun kuivumisnopeus. Tämä tarkoittaa sitä, että kuivumista voidaan edistää lisäämällä kasan huokoisuutta, pienentämällä kasaa taikka lisäämällä kasan sisäistä lämpötilaa. Korkeampi lämpötila kasan sisällä kuitenkin tarkoittaa myös suurempia kuiva-ainetappioita.

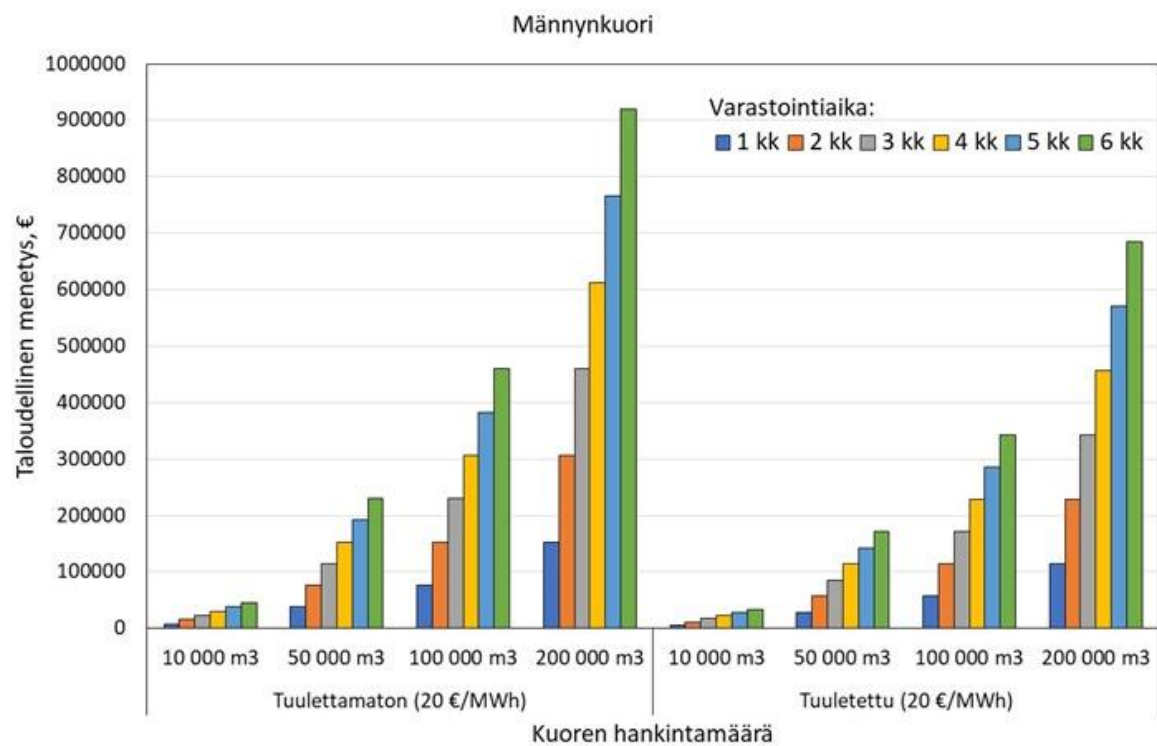
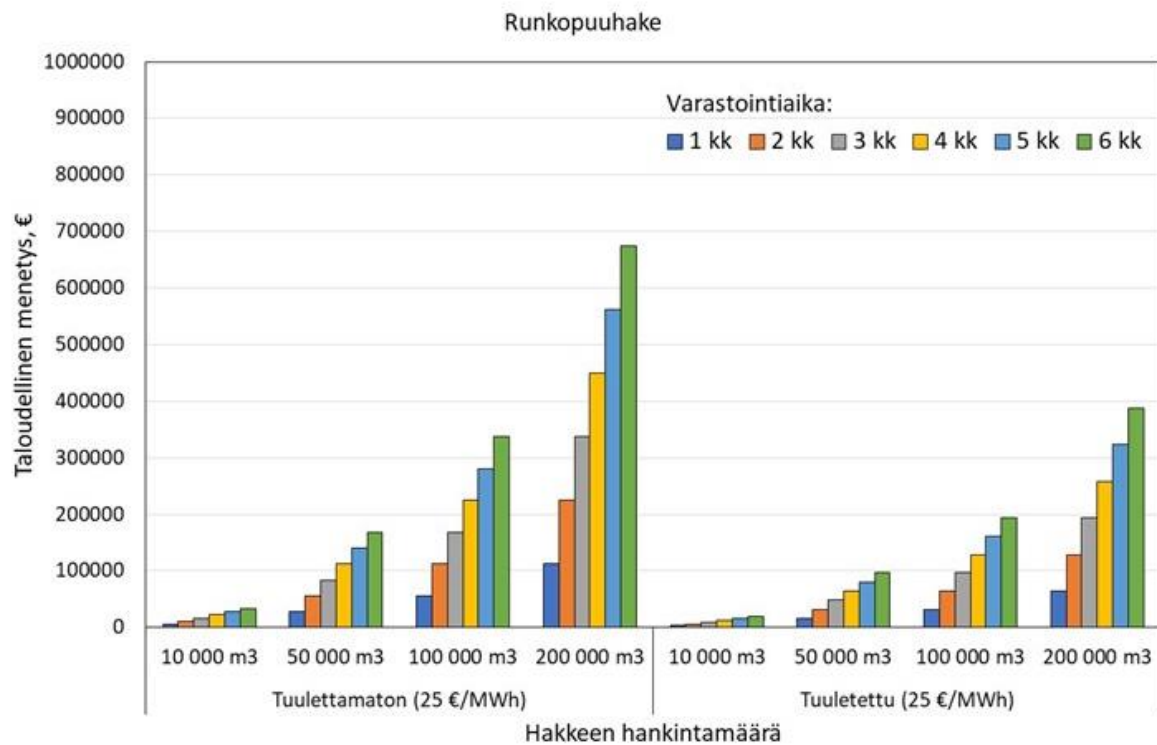
4. Varastoinnin taloudellisten vaikutusten analyysi

Varastoinnin taloudellisia vaikutuksia voidaan arvioida polttoaine-erän energiasisällön muutosten ja varastointikustannusten perusteella. Energiasisällön muutos riippuu kuivamassahävikistä sekä polttoaineen lämpöarvon ja kosteuden kehityksestä. Haiku-projektin aineiston perusteella voidaan arvioida energiasisällön pienenemisestä aiheutuvat taloudelliset menetykset runkopuuhakkeelle ja männynkuorelle. Kuva 21 esittää energiasisällön alenemisesta aiheutuvia tappioita erilaisilla polttoaineen hankintamäärillä (10 000–200 000 m³) ja esimerkkihinnoilla (kuori 20 €/MWh, hake 25 €/MWh) tämän tutkimuksen keskimääräisillä kuukausikohtaisilla energiahävikkeillä. Laskelmassa ei otettu huomioon kasojen peittämisen ja tuuletuksen tai varastoon sitoutuneen pääoman kustannuksia.



Kuva 21. Runkopuuhakkeen ja männynkuoren energiasisällön alenemisesta aiheutuvat taloudelliset menetykset (€) erilaisilla polttoaineen käyttömäärillä (10 000–200 000 m³) ja varastointaajoilla (1–6 kk). Runkopuuhakkeen hinnaksi oletettiin 25 €/MWh ja männynkuoren 20 €/MWh.

Kuva 22 havainnollistaa tuuletuksen vaikutusta runkopuuhakkeen ja männynkuoren energiasisällön alenemisesta johtuviin taloudellisiin samoilla oletuksilla kuin edellä. Arviot perustuvat Haiku-hankkeessa mitattuihin keskimääräisiin kuivamassahävikkeihin ja lämpöarvojen muutoksiin. **Energiasisällön muutoksiin vaikuttavien tunnusten varastointikäsittelyjen väliset erot eivät kuitenkaan olleet tilastollisesti merkitseviä, joten tuuletuksen vaikutus jäi epävarmaksi.**



Kuva 22. Haiku-hankkeessa mitattujen keskimääräisten kuivamassatappioiden, lämpöarvojen ja kosteusmuutosten perusteella arvioidut runkopuuhakkeen ja männynkuoren varastoinnin

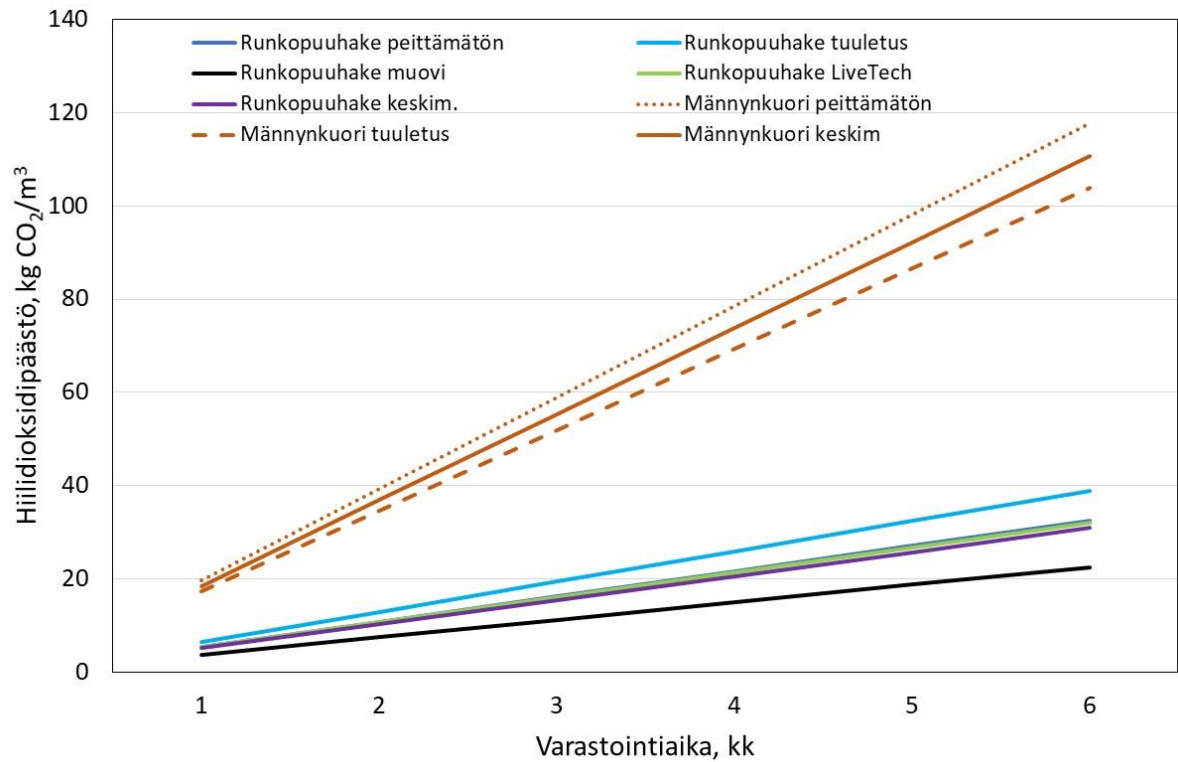
aiheuttamat taloudelliset menetykset tuulettamattomissa ja tuuletetuissa polttoaineaumoissa esimerkkihinnoilla (kuori 20 €/MWh, runkopuuhake 25 €/MWh).

Kuopion kokeessa muovikate näytti pienentävän runkopuuhakkeen energiahävikkiä muihin varastointikäsitteilyihin verrattuna, sillä hakenäytteiden kosteus aleni enemmän kuin muissa aumoissa ja niistä määritetyt kuivamassatappiot olivat pienemmät. Muovipeitteen, sen asentamisen ja poistamisen sekä muovin hävityksen kustannukset normaalikokoisen auman (8 500 m³, 7 000 MWh) tapauksessa olisivat olleet vuoden 2021 kustannustasolla noin 4 000 € (ALV 0 %). Jos runkopuuhakkeen hinta käyttöpaikalla olisi esimerkiksi 25 €/MWh, niin energiahävikistä johtuvat taloudelliset menetykset tämän tutkimuksen keskimääräisillä hakkeen energiasisällön muutoksilla (muovi 2,4 %, peittämätön 6,6 %) olisivat noin 4 200 € muovilla katetussa aumassa ja 11 600 € peittämättömässä aumassa. Siten tämän kokoisten aumojen peittäminen voi olla kannattavaa, vaikka muovi estääkin kosteuden poistumisen aumasta. Kosteaa pintakerros alentaa kuitenkin hakkeen lämpöarvoa. Jäätynään se saattaa aiheuttaa ongelmia kuljettimilla ja polttoaineen syötössä ja lisätä siten huoltokustannuksia.

Varastointikustannusten laskennassa tulisi energiahävikin lisäksi ottaa huomioon myös polttoainevarastoon sitoutuneen pääoman kustannukset. Varastoon sitoutuneen pääoman kustannukset puolen vuoden varastointihaikana normaalikokoisessa aumassa (8500 m³, 7 000 MWh) esimerkiksi kolmen prosentin korkokannalla olisivat puolen vuoden varastointiajalla 2 625 euroa, jos polttoaineen hinta käyttöpaikalla on 25 €/MWh. Tässä laskelmassa ei otettu huomioon varastointikäsitteilyjen (peittäminen tai tuuletus) kustannuksia.

5. Varastoinnin ilmastovaikutukset

Tässä tutkimuksessa mitatuilla keskimääräisillä runkopuuhakkeen ja männynkuoren kuivamassahävikkeillä hiilidioksidipäästöt olisivat kuukaudessa keskimäärin 5 ja 18 kg kiintokuutiometriä kohti (kuva 23).



Kuva 23. Runkopuuhakkeen ja männynkuoren varastoinnin aiheuttamat hiilidioksidipäästöt kiintokuutiometriä kohti varastointiajan mukaan keskimääräisillä kuukausikohtaisilla kuivamassahävikkeillä.

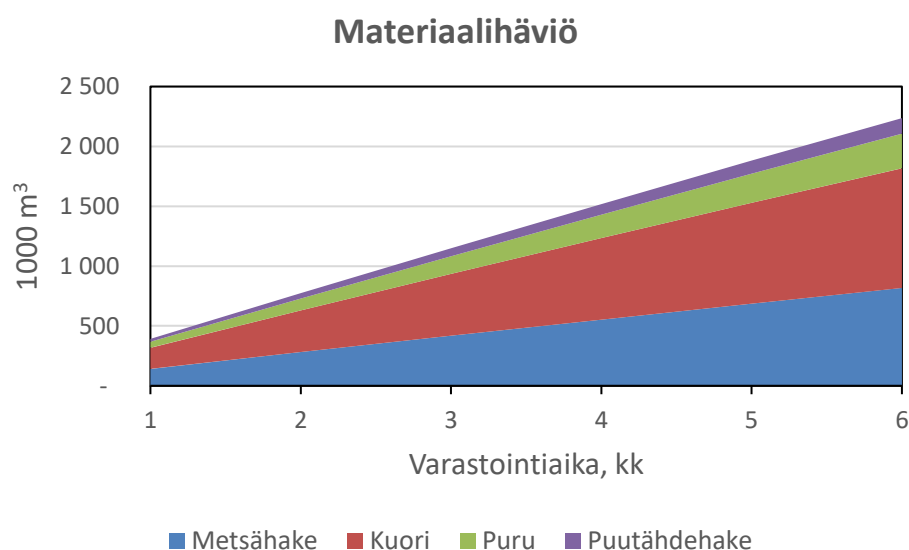
6. Varastoinnin häviöiden merkitys puupolttoaineiden kokonaiskäytössä

Polttoainejakeiden varastoinnin keston ja ajoituksen huolellinen suunnittelu korostuu, kun varastotappioiden merkitystä tarkastellaan kiinteiden puupolttoaineiden käytön kokonaisuudessa. Vuonna 2021 Suomessa käytettiin energiantuotantoon kiinteitä puupolttoaineita ennätykselliset 23,7 miljoonaa kuutiometriä (Luke 2022). Eniten poltettiin metsähaketta ja kuorta (taulukko 2).

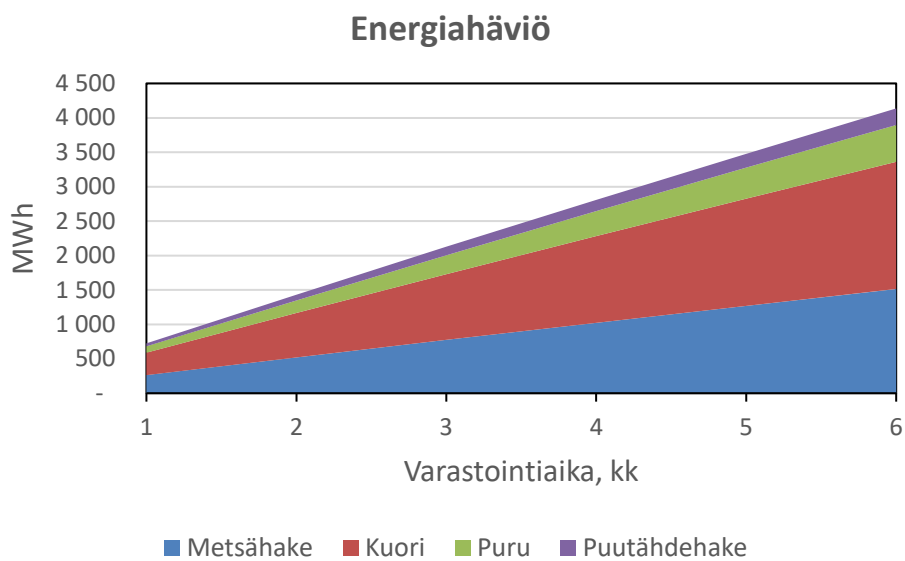
Taulukko 2. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttömäärä Suomessa 2021 (Luke 2022).

Jae	Käyttömäärä 2021, 1 000 m ³
Metsähake	9 431
Kuori	7 667
Puru	3 337
Puutähdehake	1 502
Sivutuotepuu	195
Puupelletit ja -brikitit	309
Kierrätyspuu	1 260
Yhteensä	23 702

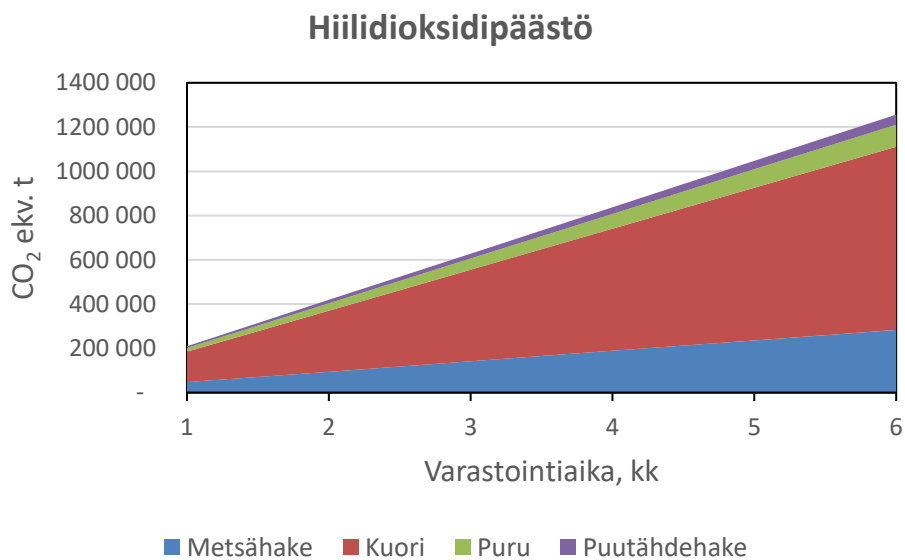
Varastotappioita laskettaessa muita luotettavammin voidaan tarkastella metsähaketta, kuorta, purua ja puutähdehaketta, joita käytettiin lämpö- ja voimalaitoksissa yhteensä 21,9 miljoonaa kuutiometriä vuonna 2021 (93 % kiinteiden polttoaineiden käytöstä). Kuvissa 24–26 on esitetty arviot materiaali- ja energiahävikille sekä hiilidioksidipäästöille 1–6 kuukauden varastointiajalle valtakunnallisella tasolla edellä mainituilla polttoainelajeilla. Kuori ja puru poltetaan yleensä lähes välittömästi integroitujen laitosten omissa lämpö- ja voimalaitoksissa. Siksi kuoren pidemmän varastoinnin osuudeksi oletettiin tilastotiedon puuttuessa 15 %. Kuorella kuiva-ainehävikiksi oletettiin HAIKU-projektin tulosten perusteella 3 % kuukaudessa. Metsähakkeen, purun ja puutähdehakkeen kuukausikohtaiseksi kuiva-ainehävikiksi oletettiin metsähakkeelle tyypillinen 1,5 %.



Kuva 24. Arvioitu valtakunnallinen kiinteiden puupolttoaineiden materiaalihäviö varastointiajan suhteen. Metsäteollisuuden tuottamasta kuoresta 15 % oletettiin varastoitavaksi.



Kuva 245 Arvioitu valtakunnallinen kiinteiden puupolttoaineiden energiahäviö varastointiajan suhteen. Metsäteollisuuden tuottamasta kuoresta 15 % oletettiin varastoitavaksi.



Kuva 26. Arvioitu valtakunnallinen kiinteiden puupolttoaineiden varastoinnin aiheuttama hiilidioksidipäästö varastointiajan suhteen. Metsäteollisuuden tuottamasta kuoresta 15 % oletettiin varastoitavaksi.

Kiinteillä puupolttoaineilla on merkittävä asema Suomen polttoainehuollossa. Suurten käyttö-määrien vuoksi varastotappiot ovat merkittävä ilmiö myös ympäristön kannalta. Jos tarkastel-tuja polttoaineita varastoitaisiin keskimäärin kolme kuukautta, hiilidioksidipäästöt olisivat 250 000 tonnia vuodessa. Määrä vastaa 0,7 prosenttia koko energiasektorin päästöistä vuonna 2021 (34 milj. t CO₂ ekv.) (SVT 2022). Kuuden kuukauden keskimääräinen varastointi nostaisi osuuden 1,4 prosenttiin.

7. Päätelmät ja toimenpidesuosituks

Puupolttoaineiden puskurivarastointi on välttämätöntä puukorjuun, metsäteollisuuden tuo-tannon ja energiankulutuksen kausivaihtelun vuoksi. Kuiva-ainetappioiden välttämiseksi **puu kannattaa varastoida mahdollisimman pitkään hakettamattomana**. Hienonnettujen puu-polttoainejakeiden (esim. hake ja kuori) kuivamassahävikki voi olla suuri. Tässä tutkimuksessa esimerkiksi männynkuorella mitattiin 18 prosentin kuivamassahävikki noin 5,5 kk kestäneen varastoinnin aikana. Mittavien taloudellisten menetysten lisäksi polttoaineen varastoinnista voi aiheutua suuria hiilidioksidipäästöjä, joihin tulisi kiinnittää entistä enemmän huomiota.

Puupolttoaineiden varastointikokeiden tekeminen on työlästä ja kallista. Siksi toistojen määrä jää usein aukottomien tilastollisten johtopäätösten tekemiseen liian pieneksi. Lisäksi varastoin-titappioiden mittaamiseen liittyy monia virhelähteitä. Haiku-projektin tulosten perusteella voi-daan kuitenkin päätellä, että **varastoaumojen peittäminen muovilla oli tutkituista vaihto-ehdoista käyttökelpoisin tapa ylläpitää polttoaineen laatua**. Se sopii etenkin valmiiksi hy-välaatuisten puupolttoainejakeiden suojaamiseen. Muovi ei läpäise vesihöyryä, joten polttoai-neen lämmitessä haihtuva kosteus kondensoituu kasan ylimpiin kerroksiin. Tarvittaessa mär-kää ja kuivaa haketta voidaan sekoittaa polttoaineen laadun tasaamiseksi. Suurin osa muo-veista on fossiilista alkuperää, joten **korvaavien materiaalien ja varastointimenetelmien ke-hittämistä on jatkettava**.

Tuuletuksella ei saada aikaan merkittävää laadun paranemista valmiiksi kuivan hakkeen varastoinnissa. Kuiva ja homogeeninen hake ei juuri lämpene, eikä silloin synny lisäkuivumi-seen tarvittavaa paine-eroa kasan sisä- ja ulkopuolen välille. Etenkään kuorikasojen tuuletuk-seen **ei voida käyttää tavallisista metallilaaduista tehtyjä putkistoja** ja kanavia, sillä kuo-resta haihtuvat aineet aiheuttavat niin voimakkaan korroosion, että putkistojen käyttöikä jää liian lyhyeksi. Kosteiden hakeaumojen ja kuorikasojen tuuletuksella näyttää kokeen perusteella olevan lievää kosteutta ja kuivamassahävikkiä vähentävää vaikutusta useita kuukausia kestä-vässä varastoinnissa, vaikka tilastollista merkitsevyyttä ei eroille syntynytkään. Tuuletus voi-daan toteuttaa ilman moottoroitua imua tai puhallusta lämpenemisen aiheuttaman paine-eron avulla. Toimenpiteellä saatu vaikutus on kuitenkin saatujen tulosten perusteella vaatimaton

tuuletuksen työläyteen ja kustannuksiin nähden. Tuuletus voi kuitenkin kiihdyttää materiaalin hajoamisprosesseja tuomalla kasan sisälle happea ja alentamalla lämpötilaa mikrobeille suotuisammaksi.

Teoriassa hienonnettujen puupolttoaineiden varastonninaikaisiin kuiva-ainetappioihin ja siten myös hiilidioksidipäästöihin voidaan vaikuttaa säätämällä esimerkiksi hakkeen lämpötilaa, hapen saantia ja kosteutta. Haiku-projekti osoitti, että merkittävien tehokkuusparannusten saavuttaminen kustannustehokkaasti varastointiteknisin keinoin on vaikeaa. **Polttoainejakeiden varastointiaikojen kattavampi seuranta ja hallinta ovat selkein kehittämiskohde puupolttoaineiden arvoverkossa.** Polttoaineen laadunhallinta korostuu erityisesti suurissa laitoksissa, joissa polttoprosessi optimoidaan polttoaineen kosteuden ja energiasisällön mukaan. Polttoainejärjestelmät tulisi synkronoida metsäjärjestelmiin niin, että hävikki- ja päästönäkökulmat otettaisiin huomioon polttoainevaraston kiertonopeuden hallinnassa. Polttoaineen laatua voitaisiin optimoida myös lämpö- ja voimalaitosten välisillä polttoaineiden vaihdoilla, mutta tämä edellyttää terminaalijärjestelmän kehittämistä.

Puupolttoaineen kosteuden ajatellaan vähentävän poltosta saatavaa energiaa. Polttoaineen lämpöarvon alentamisen lisäksi kosteus lisää savukaasuvirtaa ja heikentää kattilan hyötysuhdetta. Polttoaineen sisältämästä vedystä muodostuneen vesihöyryn latentti lämpö voidaan kuitenkin ottaa talteen savukaasulauhduksella, joten kosteaakin polttoainetta voidaan polttaa korkealla hyötysuhteella. Talvella kostea polttoaine jäätyy helposti, mikä aiheuttaa ongelmia polttoaineen käsittelyssä ja syötössä.

Puupolttoaineauomoissa tapahtuvat biologiset ja kemialliset prosessit ovat monimutkaisia, ja polttoaineiden ominaisuudet vaikuttavat niihin suuresti. Ymmärrystä polttoainejakeiden varastoinnin aikana tapahtuvista prosesseista voidaan lisätä fysikaalisen mallinnuksen avulla. Tämän työn tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa varastointikäytäntöjen kehittämisessä.

Kirjallisuus

Ahmadinia, S., Palviainen, M., Kiuru, P., Routa, J., Sikanen, L., Urzainki, I., Laurén, A. 2022. Forest chip drying in self-heating piles during storage as affected by temperature and relative humidity conditions. Fuel 324, Part A. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124419>.

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksia. VTT Technology 258. 229 s. + liitteet-

Luke 2022. Tilastotietokanta. [Viitattu 15.8.2022].

https://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__04%20Talous__10%20Puun%20energiakaytto/

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkojulkaisu]. Viiteajankohta: 2021. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 22.8.2022]. Saantitapa: <https://www.stat.fi/julkaisu/cktlcpwag38sg0c5561iqop0y>

Thomas, S.C. & Martin, A.R. 2012. Carbon contents of tree tissues: a synthesis. Forests 3(2). <http://dx.doi.org/10.3390/f3020332>.

Liite: Polttoaineiden ominaisuuksien määrittämisessä käytetyt standardit

Analyysi	Standardi
Kokonaiskosteus	Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. SFS-EN ISO 18134-2:2017.
Tuhkapitoisuus	Solid biofuels. Determination of ash content. SFS-EN ISO 18122:2015.
Palakokojakauma	Solid biofuels. Determination of particle size distribution for uncompressed fuels. Part 1: Oscillating screen method using sieves with apertures of 3.15 mm and above. ISO 17827-1:2016.
Kuivatuoretiheys	Wood chips for pulp production. Basic density. SCAN-CM 43:95.
Tehollinen lämpöarvo	Solid biofuels. Determination of calorific value. SFS-EN ISO 18125:2017.
Irtotiheys	Solid biofuels. Determination of bulk density. ISO 17828:2015