



UNIVERSITY OF  
EASTERN FINLAND

*Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta*  
*Faculty of Science and Forestry*

HAKKUUTÄHDEHAKEKASAN RAKENTEEN JA OMINAISUUKSIEN MUUTOS  
VARASTOINNIN AIKANA

Ville Maksimainen

METSÄTIETEEN PRO GRADU,  
ERIKOISTUMISALA METSÄ-, ENERGIA- JA PUUTEKNOLOGIA

---

JOENSUU 2016

Maksimainen Ville, 2016. Hakkuutähdehakekasan rakenteen ja ominaisuuksien muutos varastoinnin aikana. Metsätieteen pro gradu, erikoistumisala metsä-, energia- ja puuteknologia. 35 sivua.

## **TIIVISTELMÄ**

**ABSTRACT**

## SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| 1. JOHDANTO.....                                  | 5  |
| 1.1 Hakkuutähteen korjuu ja varastointi .....     | 5  |
| 1.2 Hakkuutähteen ominaisuudet.....               | 7  |
| 1.3 Kuiva-ainetappio ja hakekasan lämpötila ..... | 9  |
| 1.4 Mikrobitoiminta .....                         | 11 |
| 1.5 Tutkimuksentavoitteet .....                   | 12 |
| 2. TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT.....            | 13 |
| 2.1 Tutkimusaineisto.....                         | 13 |
| 2.2 Tutkimusmenetelmät .....                      | 14 |
| 3. TULOKSET .....                                 | 17 |
| 4. TULOSTEN TARKASTELU .....                      | 27 |
| 5. POHDINTA .....                                 | 31 |
| KIRJALLISUUSLUETTELO .....                        | 33 |

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Hakkuutähteen käyttö, korjuu ja varastointi

Suomella on Euroopan Unionin laatima tavoite (direktiivi 2009/28/EY), jossa Suomen tulisi nostaa uusiutuvan energian osuutta energian loppukäytöstä 38 %:iin vuoteen 2020 mennessä (Lund 2007). Vuonna 2013 uusiutuvan energian osuus oli 32 %, jossa puupolttoaineilla oli merkittävä rooli. Puupolttoaineiden osuus kokonaisenergiankulutuksesta vuonna 2013 oli 24,9 %. Puupolttoaineet muodostuvat metsäteollisuuden sivutuotteista 9,9 miljoonaa m<sup>3</sup>, sekä metsähakkeesta 8,7 miljoonaa m<sup>3</sup>. Suomen uusiutuvan energian tavoitteiden täyttämiseksi metsähakkeen käyttö tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Metsähake voi sisältää kantoja, pieni läpimittaista runkokuuta tai hakkuutähdettä. Näistä hakkuutähteen käyttömäärät ovat lisääntymässä (Torvelainen 2014).

Hakkuutähde on hakkuukohteille jäänyttä ainespuuksi kelpaamatonta biomassaa. Hakkuutähde voi sisältää oksia, latvuksia, hylkypölkkyjä, raivattua pienpuuta ja neulasia (Alakangas 2000). Parhaan hakkuutähdekertymän saavuttaa rehevillä kuusivaltaisilla uudistushakkuilla (Hakkila 1992). Hakkuutähteen korjuun tuottavuutta parannetaan latvusmassan kasoille hakkuulla. Tällä menetelmällä parannetaan materiaalin saantoa, tehostetaan korjuutyötä ja ehkäistään epäpuhtauksien joutumista hakkuutähteen sekaan. Kasoissa kuivuessaan hakkuutähteestä neulaset varisevat hakkuualalle, jolloin neulasissa olevat ravinteet jäävät kuviolle. Samalla myös hakkuutähteen laatu paranee biomassan kuivuessa. Toinen vaihtoehto on kuljettaa ja hakettaa hakkuutähteet tuoreena. Tällöin hakkuutähde sisältää paljon neulasia ja kosteutta. Neulasten mukana kulkevat ravinteet aiheuttavat hakkuualalle ravinnetappioita. Lisäksi ne sisältävät paljon klooria, joka on haitallinen ainesosa hakkuutähdettä poltettaessa energiaksi. Neulasten lisäksi tuoreen hakkuutähteen kuljetus on kalliimpaa ja laatu jää heikommaksi. Tuore hakkuutähde sisältää paljon kosteutta, mikä heikentää tehollista lämpöarvoa, sekä on raskasta kuljettaa (Nurmi 1999).

Hakkuutähde kuljetetaan välivarastolle tienvarteen, joko samalla kertaa ainespuunkorjuun yhteydessä tai erillisellä metsäkäynnillä. Hakkuutähteen metsäkuljetukseen käytetään usein samaa metsätraktoria kuin ainespuunkorjuussa. Yleensä metsätraktorin koura vaihdetaan hakkuutähteen keräämiseen suunniteltuun hakkuutähdekouraan. Hakkuutähdekourassa on piikit jotka uppoavat hakkuutähdekasaan antaen hyvän otteen, sekä vähentää maa-aineksen mukaan joutumista. Latvusmassahakkeen tuotannossa voidaan myös käyttää ns.

risutukkimenetelmää, jossa latvusmassa tiivistetään halkaisijaltaan 70 cm paksuiksi ja noin kolme metrisiksi risutukeiksi (Laitila 2010).

Hakkuutähteen hakkuunjälkeinen tuorekosteus vaihtelee 50–55% välillä. Tavoite kosteus palstakuivauksella on 35–40%. Optimi kuivausaika kesällä on 1-3 viikkoa sääolosuhteista riippuen. Hakkuutähte kuivaa palstalla hyvissä olosuhteissa alle 40 kosteusprosentin, sekä samalla neulasten ja kloorin määrä hakkuutähteessä laskee noin puoleen (Hillebrand 2009). Näin vältetään ravinnetappioilta ja hakkuutähteen laatu paranee. Kuivan hakkuutähteen kuljettaminen on myös kustannustehokkaampaa, kun vältetään ylimääräisen veden kuljetukselta välivarastoon. Toisaalta kuivuessa hakkuutähteen saanto pienenee ja kuiva-ainetappiota alkaa muodostua (Nurmi 1998).

Palstalla varastoitaessa hakkuutähteen kosteusvaihtelu on suurta. Kesän ja talven välillä kosteusvaihtelu voi olla yli 30 prosenttiyksikköä. Varsinkin kevättalvella hakkuutähteenkosteus voi nousta yli 60 prosenttiin, jolloin sulava lumi jäätyy oksien ja neulasten ympärille. Tämän vuoksi lumettomana aikana hakatun leimikon hakkuutähteet tulisi korjata välivarastoon ennen lumentuloa (Nurmi 1998). Tienvarsivarastossa kosteuden muutokset eivät ole niin suuria kuin palstalla talvena aikana (Hillebrand 2009). Nurmi (1998) on huomannut tutkimuksessaan välivarastossa olevan hakkuutähteen kosteuden muutoksen vaihtelevan maksimissaan 10 prosenttiyksikköä vuoden aikana. Hakkuutähteen laadun parantamiseksi välivarastokasoja peitetään suojapeitteillä. Suojapeitteillä pyritään suojaamaan hakkuutähdekasaa sateilta, lumelta ja jäältä. Suuren neulaspitoisuuden ja siitä aiheutuvien kuiva-ainetappioiden vuoksi latvusmassan välivarastointiaika on yleensä korkeintaan yksi vuosi (Laitila ym. 2010).

Tienvarteen kuljetettu latvusmassa haketetaan tienvarressa tai se kuljetaan terminaaliin tai käyttöpaikalle haketettavaksi. Vuonna 2013 hakkuutähdehakkeesta 76 % tuotettiin tienvarsihaketustuotantoketjulla, käyttöpaikkahaketuksen osuus oli 12 % ja terminaalihaketuksen osuus oli 12 % (Kärhä 2014). Tienvarsihaketusmenetelmällä hakkuri tuodaan välivarastolle, jossa hakkuutähte haketetaan suoraan rekan kyytiin. Näin saadaan säästöjä pitkillä kaukokuljetusmatkoilla, jotka ovat Suomessa hyvin tavallisia. Käyttöpaikkahaketuksessa hakkuutähte haketetaan tehtailla yleensä tehokkailla kiinteillä hakkureilla. Terminaalihaketuksessa hakkuutähte kuljetetaan terminaalivarastoon, jossa hakkuutähte haketetaan. Terminaalista valmis hake kuljetetaan käyttöpaikoille. Pienille käyttöpaikoille tienvarsihaketus ja terminaalihaketus ovat soveltuvia vaihtoehtoja (Laitila ym. 2010).

## 1.2 Hakkuutähteen ominaisuudet

Varastoidun hakkeen laatuun vaikuttavat useat eri tekijät. Eri tekijöitä ovat hakkeen palakoko, haketus menetelmä, kasan ladonta, muoto, peittäminen, tiiveys ja hengittävyys. Laatuun vaikuttaa myös maantieteellinen sijainti, varastointiaika, kosteusprosentti varastointihetkellä, sekä varastointi vuodenaika ja mikrobitoiminta puubiomassassa (Noll & Jirjis 2012). Tärkein puun laatuun vaikuttava ominaisuus on puun kosteusprosentti (Filbakk ym. 2011). Muita laatuun merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat puun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus. Hakkuutähteessä olevan puunkuoren osuudella on paljon merkitystä puun laatuun. Kuorella on huonompi lämpöarvo kuin runkokuorella, sekä suurempi tuhkapitoisuus (Röser ym. 2011). Hakekasan muodolla on merkitystä laatuun, koska kosteusprosentti vaihtelee hakekasan eri osien välillä (Filbakk ym. 2011).

Havupuiden latvusmassan koostumus avohakkuulla muodostuu neulasista 23,4–36,1 %, kuoresta 20,5–23,3 %, puusta 36,6–47 % ja kuolleista oksista 4,0–9,1 % latvuksen kuivamassasta. Kuusella on suurempi neulasten ja kuoren osuus, kun taas männyllä on suurempi puun ja kuolleiden oksien osuus (Hakkila 1991). Tienvarsivarastoon kuljetetun hakkuutähteen neulasipitoisuus on kuitenkin pienempi, kuin neulasten määrä latvuksen kuivamassasta. Tuoreena varastoidulla hakkuutähteellä on suurempi määrä neulasia 8,3 %, verrattuna palstalla kuivattuun hakkuutähteeseen, jonka neulasipitoisuus laskee 3,8 %:n tasolle (Nilsson ym. 2013).

Biomassan pääalkuaineet ovat hiili, vety ja happi, jotka haihtuvat puuaineksen palaessa. Puun orgaaniset aineet hemiselluloosa, selluloosa ja ligniini koostuvat pääosin hiilen, vedyn ja hapen yhdisteistä (Nurmi 1998). Havupuiden orgaaninen aines muodostuu selluloosasta 40–45 %, hemiselluloosasta 25–28 % ja ligniinistä 25–28 % (Alakangas 2000). Muut epäorgaaniset aineet jäävät jäljelle palamisreaktiossa ja muodostavat tuhkan. Havupuiden puuaineen tuhkapitoisuus vaihtelee 0,3–0,5 % välillä kuivamassasta. Oksien puuaineksen tuhkapitoisuus on hieman korkeampi 0,4–1,3 %. Havupuiden kuoren tuhkapitoisuus vaihtelee välillä 1,0–5,1 % ollen huomattavasti korkeampi kuin runkokuorella. Lisäksi kuoren tuhkapitoisuus on korkeampi oksissa kuin runkokuorella. Havupuiden vertailussa männyn koko puun biomassan tuhkapitoisuus on pienempi kuin kuusen biomassassa. Suurin vaikutus puun biomassan tuhkapitoisuuteen on neulasilla, joissa on selvästi suurin tuhkapitoisuus. Neulasten tuhkapitoisuudella on myös suuria eroja puulajin suhteen. Männyn neulasten tuhkapitoisuus on vain 2,2 % verrattuna kuusen neulasten 4,2 % tuhkapitoisuuteen (Voipio & Laakso 1992).

Hakkuutähteen tuhkapitoisuus vaihtelee 2–2,5 % välillä, riippuen hakkuutähteen puun osien suhteista (Nurmi 1998). Tuhkapitoisuuden vaihteluun on todettu olevan vaikutusta myös välivarastointiajalla (Nurmi 1998). Hakkuutähteen tuhkapitoisuus nousi 2,5–3,6 % pisimpään välivarastossa olleella hakkuutähteellä. Samankaltaisia tuloksia on saatu myös tutkimuksessa Ruotsissa, jossa hakkuutähteen alkuperäinen tuhkapitoisuus on vaihdellut 1,0–2,1 % välillä ja noussut 1,4–3,0 % tienvarsivarastoinnin aikana (Lehtikangas & Jirjis 1995).

Tuhkapitoisuuden nousu puuaineksessa on seurausta puussa muodostuvasta kuiva-ainetappiosta. Puuaineen tuhkan määrä pysyy puuaineessa samana muiden aineiden hävitessä mikrobitoiminnan seurauksena. Näytteiden hiilipitoisuus suhteutettuna mikrobitoiminnan seurauksena kulutettuun orgaanisen aineksen määrään, voidaan määrittää kuiva-ainetappiota. Haihtuvia aineita ovat esimerkiksi hemiselluloosa, selluloosa ja ligniini. Kuiva-ainetappion määrityksessä hiilipitoisuuden avulla on herkästi mahdollisuus syntyä virheitä, koska hakkuutähdehake on hyvin epähomogeeninen materiaalia. Se sisältää ainespuuta, kuorta ja neulasia, joilla on jokaisella erilainen hiilipitoisuus. Näytteiden tulee olla mahdollisimman hyvin kasaa ilmentäviä, jotta voidaan arvioida eri materiaalien osuudet hakkuutähteessä (Heinek ym. 2015).

Tuhkan lisäksi varastoinninaikana on tutkittu alkuaineiden muutosta hakkuutähteellä. Puuaineessa yleisimpien alkuaineiden (K, Ca, Mg, Mn, P, B, S, Na, Fe, Al, Cu, Zn) kohdalla kuusenhakkuutähteellä ei varastoinnin aikana tapahtunut merkittävää muutosta. Hakkuutähteessä hivenaineet ja ravinteet ovat konsentroituneimpia neulasissa, jonka takia neulasten osuudella on suurempi vaikutus näytteen alkuainepitoisuuteen. Nurmi (1998) on tutkimuksessaan huomannut varastoinnissa neulasten metallien pitoisuuden kasvavan varastoinnin aikana, kun taas kalium ja magnesium pitoisuudet laskevat. Neulasten osuus on kuitenkin niin pieni palstalla kuivatetussa hakkuutähteessä, ettei vaikutus näy merkitsevästi hakkuutähteestä kerätyissä näytteissä (Nurmi 1998).

Hakkuutähteen kosteusprosenttiin vaikuttavat sääolosuhteet, eli haihdunnan ja sadannan suhde. Puu on hygroskooppinen aine, eli se pystyy sitomaan vettä sitä ympäröivästä vesihöyrystä. Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus vaikuttavat puun tasapainokosteuteen. Puunsyiden kyllästymispiste tarkoittaa puun maksimaaliskosteutta jonka puu voisi saavuttaa vesihöyrystä. Puunsyiden kyllästymispisteessä on vaihtelua puunosien välillä (Kärkkäinen 2007). Hakkila (1964) on tutkimuksissaan havainnut, että lahonnut puu vettyy helpommin.

Useimmiten tuoreen hakkuutähteen kosteus vaihtelee 50–55% välillä. Tällöin tehollinen lämpöarvo vaihtelee välillä 0,82–0,79 MWh/i-m<sup>3</sup>. Kuivahtaneessa hakkuutähteessä neulasten



osuus pienenee ja puuaineen osuus kasvaa, jolloin myös tehollinen lämpöarvo paranee. Kosteuden ollessa 30–35% tehollinen lämpöarvo vaihtelee välillä 0,97–0,95 MWh/i-m<sup>3</sup> (Asplund ym. 1999). Suomen ilmastossa harvoin saadaan kuivattua hakkuutähte alle 40 kosteusprosentin. Suomessa tehdyissä tutkimuksissa kosteusprosentti on saatu laskemaan 40–50 % väliin (Nurmi 1993, Routa ym. 2015). Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa on päästy tienvarsivarastoinnilla tavoite kosteuteen. Tuoreena tienvarteen kuljetetun hakkuutähteen kosteus haketushetkellä oli 36,2 % verrattuna palstalla kuivaneeseen hakkuutähteeseen jonka keskimääräinen kosteus oli 30,5 %. Hakkuu oli suoritettu keväällä ja tienvarsivaraston haketus tammikuussa (Nilsson ym. 2013).

Hakkeen ominaisuuksiin varastoinnin aikana vaikuttaa hakekasojen muoto. Hakekasan muoto vaikuttaa kasan eri alueiden kosteuteen. Hakekasa muodostuu ulkokerroksesta, aerobisesta sisemmästä kerroksesta, sekä anaerobisesta sisäkerroksesta. Uloin kerros on noin 15–40 cm syvä, johon vaikuttaa abioottiset tekijät kuten sääolosuhteet. Tämä kerros toimii eristeenä sisemmälle kerrokselle, joka kuivuu hyvin kosteuden laskiessa jopa 15–20 % tasolle. Kuitenkin haihtumisen ja veden kondensoitumisen seurauksena kuivat ja märät kohdat vaihtelevat kerroksen sisällä (Heinek ym. 2013). Toisissakin tutkimuksissa on päästy samankaltaiseen tulokseen, missä kasan uloin kerros on yli kaksi kertaa kosteampi kuin sisempikerros. Sisäosien kuivuminen johtuu kasan sisäosissa muodostuvien kaasujen kierrosta, jotka kuljettavat kosteuden kasan sisäosista ulkopintaa kohden (Noll ym.2010, Fillbak ym. 2011). Fillbak ym. (2011) huomasivat tutkimuksessaan kasan kosteuden käyttäytyvän samalla tavalla kasan ollessa suojattu peitteellä tai suojaamaton.

### 1.3 Kuiva-ainetappio ja hakekasan lämpötila

Puuainekselle muodostuu kuiva-ainetappiota varastoinnin aikana (Heinek ym. 2013, Fillbak ym. 2011, Thörnqvist & Jirjis 1990). Kuiva-ainetappiota aiheuttavat mikrobiologinen toiminta, sekä kemialliset ja fysikaaliset prosessit. Biologista hajoamista aiheuttavat sienet ja bakteeri, jotka tuottavat merkittävän osan puun kuiva-ainetappiosta. Samalla puuaineen hajottamisen yhteydessä syntyy lämpöä. Kemialliset reaktiot aiheuttavat myös kuiva-ainetappiota sekä lämpenemistä hakekasassa. Puuaines hapettuu ajan myötä, jolloin puuaineesta vapautuu kaasuja kuten hiilidioksidia ja metaania. Puun fysikaaliset ominaisuudet, kuten vesihöyryn haihtuminen ja imeytyminen, vaikuttavat hakekasan lämpötilaan ja hajoamisen aktiivisuuteen. (Ferrero ym. 2009).

Kuiva-ainetappio on noin 1-3 % kuukaudessa riippuen hakekasan ominaisuuksista (Fillbak 2011). Hakkeen ollessa kosteampaa ja kasan ollessa tiivis kuiva-ainetappio nousee korkeammaksi. Lisäksi kuiva-ainetappion määrään vaikuttavat hakkeen raaka-aineet, sekä laatu. Haketettavan raaka-aineen puulaji, sekä puun eriosien suhteet (Heinek ym. 2015). Kuiva-ainetappion syntymiseen vaikuttavat myös kasan muoto, sekä hakkeen palakoko. Hieno hakkeen palakoko paljastaa enemmän puun pinta-alaa, joka on otollinen tartunta-alusta sienille ja mikrobeille (Noll & Jirjis 2012).

Hakkuutähdehakkeella tehdyssä varastointitutkimuksessa kuiva-ainetappiota muodostui 16 % kuuden kuukauden varastoinnin aikana. Samassa tutkimuksessa tutkittiin kuivatun hakkuutähdehakkeen kuiva-ainetappion muodostumista, mitä ei ollut havaittavissa varastoinnin aikana (Heinek ym. 2013). Hakkuutähdehakkeen ja hakkuutähdepaalien on huomattu varastoinnin aikana menettävän kuiva-ainetta 1-3 % kuukaudessa. Tutkimuksessa on myös huomattu suuremmat kuiva-ainetappiot kuusivaltaisella hakkuutähteellä verrattuna mäntyvaltaiseen hakkuutähteeseen. Kesän yli palstalla kuivamassa olleisiin hakkuutähteisiin muodostuu vähemmän kuiva-ainetappiota kuin syksyllä hakattu ja tienvarteen ajettu hakkuutähde. Tämä johtunee osittain vähemmästä neulasten määrästä varastoitaessa (Filbakk ym. 2011, Pettersson & Nordfjell 2007). Koivunrankahakkeella kuiva-ainetappiota kuukaudessa on muodostunut lehdettömään hakekasaan 0,1–0,7 %. Tutkimuksessa ei huomattu varastoinnin alussa suurempia kuukausittaista kuiva-ainetappiota, mikä johtunee vihermassan puutteesta hakkeessa (Nurmi 1990).

Hakekasan lämpötilan nousun intensiteetti vaihtelee myös kasan ominaisuuksien mukaan. Matalassa pajuista haketetussa (3 m) korkuisessa hakekasassa lämpötila nousi vasta noin 2 viikon jälkeen, jolloin se saavutti maksimilämpötilansa 60 °C. Samassa tutkimuksessa korkeammassa (6 m) hakekasassa lämpötila nousi jo muutaman päivän jälkeen saavuttaen 40 °C. Tässä kasassa maksimi lämpötila 63 °C saavutettiin kahdeksan päivän varastoinnin jälkeen (Jirjis 2004). Samankaltaisia tuloksia on havaittu myös mäntyhakkeella ja kuusivaltaisella hakkuutähdehakkeella. Mäntyhakekasa saavutti 11 päivän varastoinnin jälkeen 44 °C mittauspisteiden keskiarvon ja kasan keskellä maksimilämpötilan 55 °C. Tämän jälkeen lämpötila putoaa tasaisesti tasolle, joka on 10–20 °C astetta korkeampi kuin ulkolämpötila (Noll ym. 2010). Hakkuutähdehakekasassa on myös saavutettu korkeita maksimilämpötiloja 51 °C jo viiden varastointipäivän aikana, jonka jälkeen lämpötila on lähtenyt laskemaan (Heinek ym. 2015). Edellä mainitussa tutkimuksessa hakkuutähdehakekasoissa lämpötilat pysyivät noin 10 °C korkeampana kuin ulkoilman lämpötila (Heinek ym. 2013).

Tiivistyneessä hakkuutähde- ja hakkuutähdehakekasassa on havaittu suurempi kuiva-ainetappio, kuin tiivistymättömässä kasassa jossa ilmavirtaukset pääsevät kulkemaan (Heinek ym. 2015, Fillbak ym. 2011, Nurmi 1990). Kuiva-ainetappion muodostumisen intensiteetin on todettu olevan suurempaa varastoinnin alussa (Thörnqvist and Jirjis 1990). Kun taas Nurmen (1990) tutkimuksessa ei huomattu suurempaa kuiva-ainetappiota varastoinnin alkujaksolla. Myös kasan tiivistymisen suhteen on todettu poikkeavia tuloksia. Varastoidun havupuun hakkuutähdehakkeen ja tammen runkohakkeen tiiviistetyissä kasoissa sienet kasvoivat heikommin verrattuna tiivistämättömiin kasoihin. Kuitenkin tiivistäminen ei ole viisasta, koska se voi johtaa itsesyttymiseen etenkin kuorta ja neulasia sisältävässä hakkuutähdehakkeessa (Jirjis 1989).

Kuten jo aikaisemmin on todettu hakekasan muodostuvan kolmesta kerroksesta. Uloin kerros on vuorovaikutuksessa sään kanssa, jolloin siihen vaikuttaa ulkoilman lämpötila ja sateet. Tutkimuksessa kerroksen on arvioitu ulottuvan 15–40 cm syvyyteen hakekasassa. Sisemmässä aerobisessa kerroksessa on optimaaliset kasvuolosuhteet sienille. Lämpötila pysyy yleensä 15–40 °C asteen välillä, mutta lämpötila voi nousta otollisessa kohdassa jopa yli 60 °C asteeseen. Hakekasan anaerobinen kerros muodostuu kasan keskelle. Anaerobisessa kerroksessa hapen puutteen takia biomassan hajoaminen ei ole yhtä suurta, mutta itsesyttymisriski on hyvin suuri (Heinek ym. 2013).

#### 1.4 Mikrobitoiminta

Mikrobiyhdyskuntien alkuperä löytyy puun pintaosista, kuten kaarnasta, neulasista ja lehdistä. Puun sisäosiin mikrobeita pääsee puun tuholaishyönteisten mukana. Puun pinnan rikkouduttua mikrobit leviävät puuaineeseen osittain ilmakehän saasteista sateen, sekä tuulen mukana. Varastossa maata vasten olevaan puuaineeseen mikrobit pääsevät myös maanpinnasta tarttumalla. Hakkuutähdehakkeen sekaan tarttuneiden mikrobien alkuperä vaihtelee kasan ominaisuuksien mukaan. Etenkin tuore materiaali on otollista monille mikrobilajeille. Myös haketusprosessi edesauttaa mikrobien tartuntaa lisäämällä paljasta puun tartuntapintaa (Noll & Jirjis 2012).

Sienistä pääasiallisia hajottajia ovat valkolaho ja ruskealaho sienet (Rajala ym. 2010, Noll ym. 2010) Valkolaho käyttää ravinnokseen pääasiassa ligniiniä kosteimmista osista puuta, jonka jälkeen ne hyödyntävät myös osittain puuaineen hemiselluloosan ja selluloosan. Kun taas ruskealaho sienet kuluttavat puuaineen hemiselluloosan ja selluloosan jättäen ligniinin lähes

kokonaan hyödyntämättä. Myös pehmytlaho on merkittävä lahottajasienien ryhmä, joka lahottaa puuainesta ruskealahon tavoin hemiselluloosan ja selluloosaan jättäen ligniinin jäljelle (Schwarze 2007).

Sienien ja mikrobien toiminta hajottaa ensimmäisenä helpoiten hajoavat ja korkea energiapitoiset puun ainesosat, kuten sokerit, aminohapot ja ravinteet. Bakteerit iskevät puuhun vasta sienien jälkeen. Bakteerit eivät yleensä pysty hyödyntämään sydänpuuta, vaan toimivat pintapuunosissa. Bakteeri yhdyskuntia on kuitenkin löydetty kosteiden havupuiden sydänpuu osistakin (Fengel & Wegner 1984). Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa puuaineen polysakkaridien ja proteiinien hajoaminen on ollut keskivertotaso ensimmäiset 101 päivää, jonka jälkeen pitkittyneessä varastoinnissa puuaineksessa tapahtuu merkittäviä tappioita laadun suhteen. (Noll ym. 2010)

Lämpötila ja veden määrä ovat merkittävimmät tekijät hajotusprosessien voimakkuudelle (Heinek ym. 2015). Puuaineksen kosteuden ollessa lähellä puunsyiden kyllästymispistettä noin 25–30 %, sekä lämpötilan vaihtelun ollessa välillä 5–50 °C asteen on olemassa havupuilla hajottajasienien kasvun riski. Lämpötilan pudotessa -5–5 °C asteen välille sienien kasvu hidastuu, mutta on mahdollista puun kosteusprosentin ollessa yli puunsyiden kyllästymispisteen (Viitanen 1994). Lämpötilan nousu 20 °C asteesta 40 °C asteeseen lähes kolminkertaistaa kuukausittaisen kuiva-ainetappion. Biomassan kosteusprosentin kuivuessa alle puunsyiden kyllästymispisteen (25–30 %), sienien kasvu merkittävästi vähenee (Heinek ym. 2015).

### 1.5 Tutkimuksentavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia varastoinnin aikana hakkuutähdehakekasassa muodostuvat ominaisuuksien muutokset. Tavoitteena on seurata hakekasan lämpötilan, kosteuden ja kuiva-ainetappion muutosta varastoinnin aikana. Hakkeen terminaalivarastoinnissa tapahtuvista muutoksista on vähän tietoa ja sen vuoksi tämä tutkimus on tarpeen tehdä. Hakkeen varastointi on hyvin yleistä metsäenergian hankintaketjun välillä, joten varastoinnissa syntyviä epäedullisia muutoksia halutaan minimoida. Tutkimushypoteesina on, että hakkuutähdehakeelle muodostuu varastoinnin aikana kuiva-ainetappiota. Tutkimuksessa tarkastellaan myös hakekasan kosteuden ja lämpötilan vaihteluja kasan eri osa-alueilla varastoinnin aikana ja näiden avulla pohditaan, mitkä asiat ja menetelmät vaikuttavat tutkimuksessa saatuihin tuloksiin.

## 2. TUTKIMUSAINEISTO JA MENETELMÄT

### 2.1 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineistona käytettiin Tohmajärven Onkamossa sijaitsevaa hakkuutähdehakekasa (kuva 1). Hakekasa perustettiin 29.6.–30.6.2015 välisenä aikana, jolloin siihen ajettiin yhteensä 12 kuormaa haketta. Hakkuut suoritettiin 2.6.2015, 5.6.2015 ja 9.6.2015 kuusivaltaisilta päätehakkuu kohteilta. Hakkuutähteet olivat kuivuneet palstalla 3-4 viikkoa ennen haketusta ja Onkamoon kuljetusta. Viileän ja sateisen kesäkuun vaikutuksesta hakkuutähdehakkeen seassa oli vielä runsaasti vihreitä neulasia mukana. Hakekasa oli tilavuudeltaan 1454 i-m<sup>3</sup> ja massaltaan 357 900 kg. Onkamon hakekasa oli peittämätön ja siihen oli sijoitettuna 15 näytteenottoputkea (kuva 1). Näytteenottoputket olivat noin neljä metriä pitkiä pp muoviputkia ja niitä oli sijoitettu kahdeksan kappaletta kasan alaosiin ja seitsemän kappaletta keskiosiin. Näytteenottoputket oli asetettu paikoilleen 3.7.2015. Jokaisesta putkesta otettiin näytteitä kairaamalla noin litran verran. Näytteenottokaira on jääkairasta, kevytmetalliputkesta ja porakoneesta valmistettu työkalu.



**Kuva 1.** Onkamon hakekasa

Näytteitä käytiin keräämässä noin kuukauden välein neljä kertaa (3.7., 3.8., 1.9., 29.9.) ja tämän jälkeen viides näyte otettiin 24.2.2016 juuri ennen kasan purkamista. Hakekasa purettiin neljän päivän aikana (29.2., 1.3., 3.3., 16.3.) ja kuljetettiin Fortumille punnitukseen. Näytteet tutkittiin uunikuivausmenetelmällä Sirkkalassa Karelia-ammattikorkeakoulun tiloissa.

Uunikuivausmenetelmässä näytteet punnitaan, jonka jälkeen niitä kuivataan uunissa vuorokauden ajan. Kuivauksen jälkeen näytteet punnitaan uudelleen. Näin saadaan selville puuaineessa ollut veden määrä, jonka avulla selvitetään hakkeen kosteusprosentti. Jokaisesta näytteestä otetaan myös rinnakkaisnäyte, huonojen näytteiden varalta.

Näytteenottoputkiin oli sijoitettu myös termoelementit, jotka mittasivat jatkuvasti hakekasan lämpötilaa. Termoelementtien lämpötila-aineisto tallentui dataloggeriin (kuva 2), jonka keräämät tiedot käytiin purkamassa noin viikon välein. Lisäksi yksi termoelementti oli sijoitettu mittaamaan ulkolämpötilaa.



**Kuva 2.** Hakeaman lämpötiloja tallentava dataloggeri

## 2.2 Tutkimusmenetelmät

Näytteitä oli otettu hakekasan perustamisen yhteydessä 29.6., 1.7. ja 3.7. Tällöin näytteitä otettiin satunnaisotannalla 18 kappaletta. Ensimmäiset näytteenottoputkista kerätyt näytteet otettiin 3.7. Tämän jälkeen näytteitä otettiin neljä kertaa noin kuukauden välein ja lisäksi kerran kasan purkamisen yhteydessä. Lämpötilojen mittaaminen aloitettiin 7.7. neljän näytteenottoputken osalta. Kaikista putkista lämpötila-aineiston mittaaminen aloitettiin 22.7.

Näytteitä otettiin jokaisesta 15:sta putkesta noin litran verran. Nämä näytteet uunikuivattiin Karelian AMK:n tiloissa kosteuden määrittämiseksi, jonka jälkeen uunikuivatut näytteet lähetettiin Fortumille. Fortumilla hakenäyte hienonnettiin palakooltaan alle 0,5 mm. Näistä 15 hienonnetusta näytteistä muodostettiin kokoomanäyte, joka sisälsi sekoituksen kaikista 15 näytteestä. Sekoituspäätteenä otettiin jokaisen putken näytteestä ruokalusikalla saman verran

näytettä. Kokoumanäytteet muodostettiin jokaisen näytteenottokerran aineistosta. Kokoumanäytteitä syntyi näin neljä kappaletta. Nämä näytteet tutkittiin yliopiston laboratoriossa Plasmaemissiospektrometrillä (ICP-OES) näytteiden tuhkapitoisuuden ja alkuaineiden määrän selvittämiseksi. ICP-mittauksessa hienonnettu näyte uutettiin  $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$  liuoksessa MARS5-mikroaaltomärkäpolttolaitteella. Plasmaemissiospektrometrillä saadut alkuainepitoisuudet oli laskettuna kuiva-ainetta kohti (g/kg).

Näytteenottoputkista kerättyjen kosteusnäytteiden lisäksi kasan purkamisen yhteydessä kerättiin 18 kosteusnäytettä eri puolilta ja eri syvyyksistä kasaa. Näitä näytteitä kerättiin hakekasasta noin 0,8–3 metrin syvyydestä, sekä eri korkeuksilta kasaa. Kasan korkeudessa arvioitiin kasa kolmeen eri tasoon ylä-, keski- ja alaosiin. Näin saatiin järkevästi hahmotettua hakekasan kosteuden vaihtelu eri osa-alueilla.

Hakekasassa muodostuneen kuiva-ainetappion määrittäminen näytteiden tuhkapitoisuutta vertailemalla, sekä hakkeen kuiva-aineen painoa seuraamalla. Tuhkapitoisuuden suhteella orgaaniseen aineeseen määrään voitiin laskea, kuinka paljon tuhkapitoisuus oli noussut suhteessa orgaanisen aineen määrään. Tätä suhdetta vertaamalla voitiin laskea kuiva-aineessa tapahtunut hävikki prosentteina.

Kuiva-ainetappion määrittäminen painoa seuraamalla, tutkittiin vertaamalla kasan perustamisvaiheessa mitattua hakkeen painoa, kasan purkamisvaiheessa mitattuun painoon. Kasan perustamis- ja purkamisvaiheessa mitattujen kosteusprosenttien avulla voitiin laskea hakkeen kuiva-aineen paino. Hakkeen kuiva-aineen osuuksia vertailemalla voitiin laskea varastoinnissa muodostunut kuiva-ainetappio. Kuiva-ainetappion laskentamalli on alla olevassa kaavassa.

$$\text{Kuiva - ainetappio} = 1 - \frac{\text{Hakkeen märkäpaino alussa}(1 - \text{kosteusprosentti})}{\text{Hakkeen märkäpaino lopussa}(1 - \text{kosteusprosentti})}$$

Lisäksi hakekasasta saatiin lennokilla otettuja valokuvia ja lämpökamerakuvaa (kuva 3). Lennokkiin oli kiinnitettynä GoPro HERO 4 action-kamera, jolla saatiin tarkasti hakekasa kuvattua. Lennokilla otetuista kuvista voitiin muodostaa kolmiulotteinen malli hakekasasta (3D-malli). 3D-mallia varten kasan ympärille aseteltiin riittävä määrä tarkkuus GPS:llä paikannettuja pisteitä, joiden avulla kuvatusta materiaalista voitiin laskea kasan mittasuhteita. Näillä tiedoilla voitiin seurata kasan painumista, sekä lämpötilan vaihtelua kasan eri osissa. Hakekasan eriosien lämpötilan vaihtelun määrittämiseksi käytettiin myös hyväksi purkuvaiheessa otettuja poikkileikkaus valokuvia.



**Kuva 3.** Lennokki (Flying Drone) ja GoPro HERO 4, joilla hakekasa kuvattiin ylhäältä päin.

Hakekasan varastointiajan ja alkuainepitoisuuksien välistä riippuvuussuhdetta tarkasteltiin regressioanalyysillä. Regressioanalyysi on tilastotieteen menetelmä, jonka avulla voitiin tarkastella vastemuuttujan riippuvuutta valituista selittävistä muuttujista. Sillä pyrittiin selittämään, kuvaamaan ja ennustamaan selittävän muuttujan  $X$  vaikutusta selitettävän muuttujan  $Y$  vaihteluun. Tutkimuksessa tutkittiin voidaanko näytteiden tuhka- ja alkuainepitoisuudella määrittää varastoinnissa syntyvä kuiva-ainetappio. Selittävänä muuttujana  $X$  oli näytteiden keruu aika ja selitettävän muuttujana  $Y$  näytteiden tuhka- ja alkuainepitoisuudet. Mallin selvittämiseksi funktiomuoto  $f$  piti selvittää. Regressiomallissa pisteaineistoon sovitettiin käyrä, joka kuvasi mahdollisimman hyvin  $Y$ :n riippuvuutta selittäjä  $X$ :stä. Se tarkoittaa regressiomallin määrittämistä  $Y = f(X)$ . Tässä tutkimuksessa käytimme lineaarista mallia, koska toinen muuttujista oli aikamääre. Tämän vuoksi havaintoaineiston ja mallin yhteensopivuutta mitattiin korrelaatiolla. Korrelaatio arvo kertoi kuinka hyvin  $X$  selittää selitettävän  $Y$  vaihtelua. Mallin selitysaste laskettiin kaavalla  $R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$ , missä  $y_i =$  havaintoarvo ja  $\bar{y} =$  havaintojen keskiarvo (Niemi 1994).

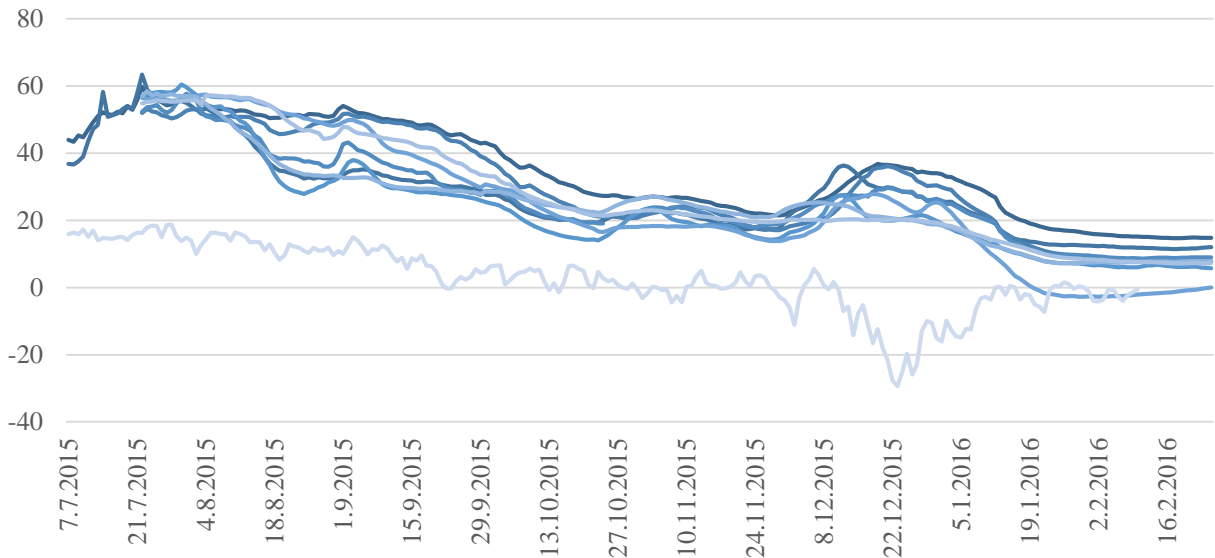
Lisäksi tilastollisessa laskennassa hyödynnettiin yhdenmuuttujan Studentin  $t$ -testiä. Studentin  $t$ -testillä selvitetään eroaako populaation arvot merkittävästi populaation keskiarvosta. Tämä testi oli hyödyllinen tehdä, että voitiin tutkia tapahtuiko näytteiden alkuainepitoisuuksissa merkittävää vaihtelua varastoinninaikana. Nollahypoteesina oli että arvot eivät poikkea merkittävästi populaation keskiarvosta. Nollahypoteesin hyväksymistä tarkastellaan yleensä 1



% tai 5 % riskitasolla. Tässä tutkimuksessa tuloksia tarkasteltiin molemmilla edellä mainituilla riskitasoilla. Tilastollisessa laskennassa aineiston määrällä on merkitystä tutkimuksen laatuun. Tässä tutkimuksessa otanta oli hyvin pieni, joka heikentää tuloksien luotettavuutta. Tutkimus populaation kasvaessa tilastollisen testauksen luotettavuus kasvaa. Kuitenkin De Winter (2013) tutkimuksessaan osoittaa kuinka t-testin käytölle pienellä otoskoollla ei löydy perustavanlaatuista syytä jättää hyödyntämättä. Laskennassa käytettiin hyväksi tilastollista laskentaohjelmistoa IBM SPSS statistics.

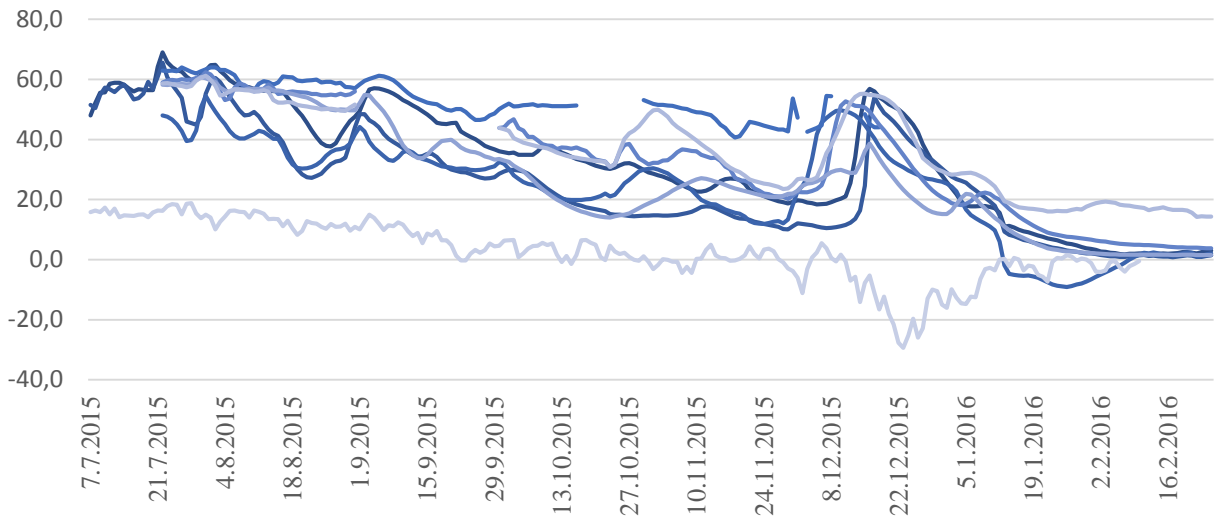
### 3. TULOKSET

Hakekasan lämpötilaa tarkkailtiin 15 eri näytteenottoputkesta jatkuvalla seurannalla. Nämä putket jakautuivat kasan keskiosiin seitsemän kappaletta, sekä kasan alaosiin kahdeksan kappaletta. Lämpötila-aineistosta voidaan huomata hakekasan saavuttaneen kasan alaosissa maksimilämpötilansa varastoinnin alkuvaiheissa (kuva 4). Korkeimmat lämpötilat mitattiinkin 3–4 viikkoa varastoinnin aloituksen jälkeen. Lämpötilahuipun saavuttamisen jälkeen kasan lämpötila lähti laskuun. Korkein mitattu lämpötila kasan alaosista oli 63,4 °C. Lämpötila ei kuitenkaan laskenut tasaisesti varastointiajan kuluessa vaan lämpötilassa tapahtui satunnaisia nousuja, jotka kuitenkin lähtivät nopeasti laskuun. Hakekasa sisälämpötilan laskiessa myös ulkolämpötilassa tapahtui laskua. Varastoinnin alkupuolella tapahtuneen lämpenemisen jälkeen ulkolämpötilalla ja hakekasan sisälämpötilalla oli noin 20–30 °C lämpötila ero. Varastoinnin pitkittyessä noin seitsemän kuukauden jälkeen kasan alaosien keskilämpötila laski tasolle, joka on noin 10 °C korkeampi kuin ulkolämpötila. Termoelementtien purkuhetkellä yhden näytteenottoputken lämpötila oli laskenut ulkolämpötilan kanssa lähes samalle tasolle.



**Kuva 4.** Hakekasan alaosissa olleiden näyttteenottoputkien, sekä kasan ulkopuolella olleen mittarin lämpötilat (°C) varastoinnin aikana.

Hakekasan keskiosien lämpötilat saavuttivat myös maksimilämpötilansa varastoinnin alkuvaiheilla noin 3–4 viikkoa varastoinnin aloituksesta (kuva 5). Maksimilämpötila nousi kasan keskiosissa melko korkeaksi saavuttaen lämpötilan 69 °C. Ainoastaan yhdessä putkessa ei saavutettu yli 60 °C:n rajaa, sen maksimilämpötilan jäädessä 54,5 °C:een. Hakekasan keskiosissakin lämpötila lähti laskuun noin kuukauden kuluttua kasan perustamisesta. Lämpötila kuitenkin vaihteli kesken varastoinnin, välillä tehden lyhytaikaisia lämpötilan nousuja, jotka laskivat myös hyvin nopeasti. Alun lämpenemisen jälkeen kasan lämpötila laski tasolle, joka oli noin 20–30 °C korkeampi kuin ulkolämpötila. Kunnes noin seitsemän kuukauden varastoinnin jälkeen kasan keskiosien lämpötila laskit tasolle, joka oli vain noin 5 °C korkeampi kuin ulkolämpötila terminaalissa.



**Kuva 5.** Hakekasan keskiosissa olleiden näytteenottoputkien, sekä kasan ulkopuolella olleen mittarin lämpötilat (°C) varastoinnin aikana.

Hakekasan kosteuden seuranta aloitettiin kasan perustamisen yhteydessä otetuista näytteistä (29.6 ja 1.7), joiden aritmeettinen keskiarvo oli 33,2 %. Ensimmäiset näytteenottoputkista otetut näytteet kerättiin 3.7.2015, vain muutaman päivän varastoinnin aloituksen jälkeen. Tästä eteenpäin näytteitä kerättiin noin kuukauden välein aina syyskuun loppuun saakka. Tämän jälkeen kerättiin vielä yhden kerran näytteitä päivää ennen näytteenottoputkien purkua. Kaikissa kasan alaosien putkissa hakkeenkosteus väheni syksyn mittauksien aikana hyvinkin matalaksi (taulukko 1). Minimissään hakkeen kosteusprosentti laski jopa 11,1 %:n tasolle. Kuitenkin helmikuussa otetuissa hakenäytteissä on huomattavissa kosteusprosentin nousua verrattuna syyskuunlopun kosteusprosentteihin. Yhtä alaosan putkea lukuun ottamatta muissa putkissa hakkeen kosteusprosentit laskivat varastoinnin aikana.

Hakekasan keskiosien putkissa on myös havaittavissa kosteuden väheneminen hakkeessa syyskuunloppuun mennessä (taulukko 2). Talven aikana myös kasan keskiosissa kosteusprosentti oli lähtenyt nousuun. Kosteus pysyi kuitenkin pysyen matalampana, kuin varastoinnin alussa, lukuun ottamatta yhtä näytettä. Kasan keskiosissa kosteusprosentit laskivat todella mataliksi loppukesän aikana. Syyskuun alussa kerättyjen näytteiden kosteusprosenttien keskiarvo oli vain 12,4 %. Matalimmillaan kosteusprosentti laski näytteissä 9,5 %:n tasolle.

Kokonaisuudessaan tutkittaessa kaikkia näytteenottoputkia, kasan sisäosien kosteus laski alimmillaan 15 % keskikosteuteen (1.9.). Tämän jälkeen keskikosteus nousi, sen ollessa viimeisissä näytteissä 21 % (24.2.).

**Taulukko 1.** Hakekasan alaosien näytteenottoputkista kerättyjen näytteiden kosteusprosentit.

| Näyte                    | Päivämäärä | Putki<br>1 | Putki<br>3 | Putki<br>5 | Putki<br>7 | Putki<br>9 | Putki<br>11 | Putki<br>13 | Putki<br>15 |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1                        | 3.7.2015   | 37,2       | 29,0       | 29,2       | 26,5       | 20,0       | 34,7        | 27,5        | 38,8        |
| 2                        | 3.8.2015   | 25,3       | 26,5       | 16,9       | 25,9       | 15,6       | 18,0        | 23,4        | 11,3        |
| 3                        | 1.9.2015   | 19,4       | 20,6       | 14,1       | 25,6       | 11,1       | 14,0        | 15,9        | 18,2        |
| 4                        | 29.9.2015  | 24,4       | 24,3       | 22,9       | 24,5       | 12,3       | 13,8        | 16,5        | 16,6        |
| 5                        | 24.2.2016  | 29,2       | 20,6       | 17,7       | 19,0       | 20,7       | 19,4        | 15,2        | 13,1        |
| Muutos prosenttiyksikköä |            | 8          | 8,4        | 11,5       | 7,5        | -0,7       | 15,3        | 12,3        | 25,7        |

**Taulukko 2.** Hakekasan keskiosien näytteenottoputkista kerättyjen näytteiden kosteusprosentit.

| Näyte                    | Päivämäärä | Putki<br>2 | Putki<br>4 | Putki<br>6 | Putki<br>8 | Putki<br>10 | Putki<br>12 | Putki<br>14 |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1                        | 3.7.2015   | 29,5       | 23,1       | 26,9       | 47,7       | 33,4        | 31,8        | 36,7        |
| 2                        | 3.8.2015   | 12,5       | 12,6       | 11,1       | 10,2       | 15,1        | 15,1        | 17,0        |
| 3                        | 1.9.2015   | 9,5        | 15,6       | 11,0       | 12,8       | 13,4        | 11,8        | 12,5        |
| 4                        | 29.9.2015  | 11,6       | 12,4       | 11,8       | 16,3       | 12,4        | 14,1        | 9,8         |
| 5                        | 24.2.2016  |            | 17,2       | 21,0       | 53,1       | 17,3        | 16,0        | 13,9        |
| Muutos prosenttiyksikköä |            |            | 5,9        | 5,9        | -5,4       | 16,1        | 15,8        | 22,8        |

Näytteenottoputkista kerätyistä näytteistä mitattiin kosteuden lisäksi alkuainepitoisuudet Plasmaemissiospektrometrillä (ICP-OES). Laitteella saatiin mitattua alkuaineiden lisäksi myös näytteiden tuhkapitoisuudet, sekä orgaanisen aineen määrä. Taulukosta 3 voidaan huomata tuhkan, orgaanisen aineen, kaliumin ja kromin määrän vähentyneen huomattavasti varastoinnin aikana. Taulukon 3 alkuaineissa ei muodostunut voimakasta korrelaatiota varastointiajan suhteen yhdelläkään alkuaineella. Kalsiumin määrällä on huomattavaa positiivista korrelaatiota varastointiajan suhteen. P-arvot olivat lähes kaikissa näytteissä alle 1 % riskitason, luukuun ottamatta kromia jolla nollahypoteesi jää voimaan. Muissa taulukon 3 aineissa on tapahtunut merkittävää muutosta varastoinnin aikana.

**Taulukko 3.** Hakenäytteiden tuhkan, orgaanisen aineen ja alkuaineiden pitoisuudet (g/kg).

| Näyte       | Tuhka<br>% | orgaan.<br>aines% | Al<br>g/kg | B<br>g/kg | Ca<br>g/kg | Cr<br>g/kg | Cu<br>g/kg | Fe<br>g/kg |
|-------------|------------|-------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 1           | 3,51       | 96,5              | 0,17       | 0,0014    | 5,39       | 0,00177    | 0,0031     | 0,23       |
| 2           | 2,77       | 97,2              | 0,11       | 0,0013    | 5,67       | 0,00088    | 0,0029     | 0,13       |
| 3           | 2,60       | 97,4              | 0,12       | 0,0015    | 5,45       | 0,00095    | 0,0030     | 0,13       |
| 4           | 2,75       | 97,3              | 0,13       | 0,0014    | 5,98       | 0,00084    | 0,0033     | 0,16       |
| Korrelaatio | -0,78      | 0,78              | -0,58      | 0,02      | 0,75       | -0,79      | 0,44       | -0,54      |
| P-arvo      | ,001       | ,000              | ,002       | ,000      | ,000       | ,015       | 0,000      | ,006       |

Taulukossa 4 listattujen alkuaineiden osalta fosforilla on tapahtunut voimakasta korrelaatiota varastointiajan suhteen. Muilla alkuaineilla ei ole havaittavissa korrelaatiota varastointiajan suhteen. P-arvot ovat myös hyvin pieniä kaikilla, mutta titaanin arvoilla nollahypoteesi jää voimaan 1 % riskitasolla. Näiden alkuaineiden määrä on hyvin pieni näytteissä. Yleisellä 5 % riskitasolla kaikkien alkuaineiden pitoisuuksissa on tapahtunut merkittäviä muutoksia varastoinnin aikana.

**Taulukko 4.** Näytteiden alkuainepitoisuudet (g/kg)

| Näyte       | K<br>g/kg | Mg<br>g/kg | Mn<br>g/kg | Na<br>g/kg | P<br>g/kg | S<br>g/kg | Ti<br>g/kg | Zn<br>g/kg |
|-------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1           | 2,41      | 0,66       | 0,39       | 0,09       | 0,50      | 0,39      | 0,013      | 0,050      |
| 2           | 2,22      | 0,63       | 0,35       | 0,10       | 0,50      | 0,39      | 0,006      | 0,047      |
| 3           | 2,33      | 0,65       | 0,39       | 0,08       | 0,51      | 0,39      | 0,007      | 0,048      |
| 4           | 2,38      | 0,66       | 0,36       | 0,08       | 0,53      | 0,40      | 0,008      | 0,052      |
| Korrelaatio | 0,04      | 0,13       | -0,21      | -0,57      | 0,82      | 0,43      | -0,59      | 0,31       |
| P-arvo      | ,000      | ,000       | ,000       | ,000       | ,000      | ,000      | ,012       | 0,000      |

Hakekasasta määritettiin kuiva-ainetappio koko varastoinnin jaksolta hakkeen painon perusteella. Tutkimuksessa hakkeen paino lisääntyi varastoinnin aikana, mutta samoin lisääntyi myös hakkeen kosteus (taulukko 5). Tämän seurauksena kuiva-ainetappiota muodostui 2,67 % hakkeen kuiva-aineessa.

**Taulukko 5.** Hakekasan ominaisuustietoja ja kuiva-ainetappio varastoinnin aikana.

|                               | Tutkimusjakson alussa | Tutkimusjakson lopussa |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Hakkeen paino kg              | 357 900               | 368 210                |
| Hakkeen kuiva-aineen paino kg | 238 918               | 233 326                |
| Kosteusprosentti              | 33,2                  | 36,8                   |
| Kuiva-aine tappio %           |                       | 2,67                   |

Hakekasassa kosteus vaihtelee eri kasan osien välillä varastoinnin aikana. Hakekasasta kasan purkamisen yhteydessä otetuista näytteistä kosteuden vaihtelu näkyy selvästi (taulukko 6). Tuloksista voidaan huomata kasan yläosan olevan kosteinta aluetta ja kasan keskivaiheilla ja alaosissa kuivinta aluetta. Hake on todella kosteaa ympäri kasaa, sen pinta-osissa noin 0,8 metrin syvyyteen asti. Tuloksissa metrin syvyydestä otetuissa näytteissä on hake jo kuivempaa verrattuna 0,8 metrin syvyyteen. Tutkimuksessa on huomattu hakkeen kosteuden vähenevän mentäessä syvemmälle kasaan. Kasan ylä- ja alaosissa on todettavissa voimakasta korrelaatiota näytteen keruusyvyiden ja kosteuden suhteen. Myös keskivaiheilla korrelaatio on huomattavaa. Kasan keskivaiheen korrelaation vaikuttaa yksi kasan sisältä mitattu muista arvoista poikkeava hyvin korkea kosteus lukema 53,1 %. Korrelaatio on negatiivinen, koska kosteusprosentti laskee näytteenotto syvyyden kasvaessa.

Kuvasta 6 voidaan huomata kosteuden siirtymä kasan yläosaan keskelle. Kosteaa hake näkyy tummempana, kun taas vaaleampi hake on kuivempaa. Hakekasan poikkileikkauksessa näkyy todella kostean ja kuivan hakkeen raja todella selkeästi. Tuloksista on selvinnyt että myös kasan keskustan ja pintaosien välillä on kosteus eroa, joka ei niin selvästi näy kuvassa. Kasan keskellä oleva märkä alue on kuvassa hieman valunut, joten todellisuudessa todella märän hakkeen raja on huomattavasti ylempänä kasassa. Keskellä ylhäällä oleva tumma hake on kosteuden lisäksi hyvin kuumaa. Kuvassa 6 näkyy tumman alueen höyryävän selkeästi purkuvaiheessa.

**Taulukko 6.** Hakkeen kosteuspitoisuudet koejakson lopussa kasan eri alueilta ja syvyyksiltä.

| Näytteen syvyys m | Kosteusprosentti<br>kasan yläosa | Kosteusprosentti<br>kasan keskiosa | Kosteusprosentti<br>kasan alaosa |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 0                 |                                  | 65,4                               | 67,9                             |
| 0                 |                                  |                                    | 64                               |
| 0,4               | 71,8                             |                                    |                                  |
| 0,5               | 70,9                             |                                    |                                  |
| 0,8               | 62                               | 40,6                               | 63,6                             |
| 0,8               | 68,2                             | 50                                 |                                  |
| 0,8               |                                  | 32,3                               |                                  |
| 0,8               |                                  | 34,9                               |                                  |
| 1                 |                                  | 35,1                               |                                  |
| 1                 |                                  | 40                                 |                                  |
| 1                 |                                  | 41,2                               |                                  |
| 1                 |                                  | 27,7                               |                                  |
| 3                 |                                  |                                    | 23,2                             |
| 3                 |                                  |                                    | 23,0                             |
| 4                 |                                  | 17,2                               | 29,2                             |
| 4                 |                                  | 21,0                               | 20,6                             |
| 4                 |                                  | 53,1                               | 17,7                             |
| 4                 |                                  | 17,3                               | 19,0                             |
| 4                 |                                  | 16,0                               | 20,7                             |
| 4                 |                                  | 13,9                               | 19,4                             |
| 4                 |                                  |                                    | 15,2                             |
| 4                 |                                  |                                    | 13,1                             |
| Korrelaatio       | -0,816                           | -0,651                             | -0,966                           |



**Kuva 6.** Kuva hakekasan poikkileikkauksesta sen purkamisen yhteydessä.

Lennoilla kuvattiin 4.11.2015 hakekasa ylhäältäpäin (kuva 7). Hakekasa oli ollut varastoituna tuolloin noin neljä kuukautta. Lennoilla otetuista kuvista laskemalla hakekasan tilavuudeksi saatiin noin 1025 m<sup>3</sup>. Tämä on 429 m<sup>3</sup> vähemmän verrattuna hakekasan alkuperäiseen tilavuuteen, joka on 1454 m<sup>3</sup>. Tiivistymistä on tapahtunut varastoinnin neljän ensimmäisen varastointikuukauden aikana noin 29,5 %.



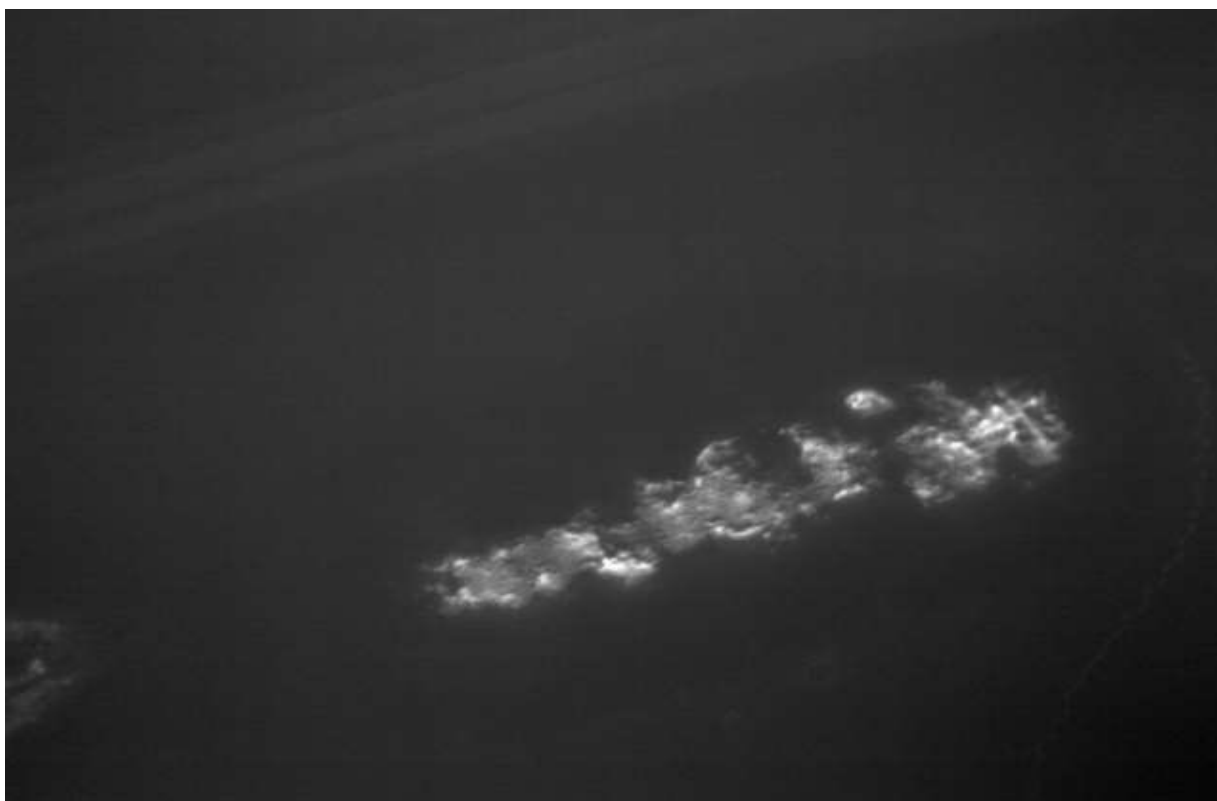


**Kuva 7.** Lennokilla kuvatusta videosta ja valokuvista muodostettu 3D-malli hakekasasta. (Kuva: LUKE/Jukka Antikainen)

Hakekasalan lämpenemistä tutkittiin lämpötilan mittauksen lisäksi uudemmalla menetelmällä, jossa lennokilla lennettiin lämpökameran kanssa hakekasalan yläpuolella. Kuvassa 8 näkyy tavallisella kameralla otettu verrokkikuva. Tässä kuvassa näkyy myös kasan lämpeneminen päältä sulana kohtana. Kuva 9 on lämpökameralla kuvattua materiaalia, jossa vaaleammat kohdat ovat lämpimämpiä kuin tummat alueet. Kuvissa näkyy selvästi miten kasan sisällä muodostunut lämpö kulkeutuu ylöspäin kasan korkeimpaan kohtaan. Lämpökamerakuvassa näkyy selvemmin kuumat alueet, joista huomataan kasan päällä olevan pienialueisia kuumia laikkuja. Tästä kuvasta nähdään kuinka paljon lämpötila vaihtelee alueittain hakekasassa.



**Kuva 8.** Verrokkikuva termokuvalle hakekasasta suoraan ylhäältäpäin. (Kuva: LUKE & VTT)



**Kuva 9.** Lämpökameralla varustetulla lennokilla otettu termokuva hakekasasta. (Kuva: LUKE & VTT)

## 4. TULOSTEN TARKASTELU

Onkamon hakkuutähdehakekasa käyttäytyi terminaalivarastoinnin aikana kasan sisälämpötilan suhteen hyvin tyypillisesti. Lämpötila nousi hyvin aikaisessa vaiheessa ja lähti tästä eteenpäin laskemaan, muutamia lyhyt aikaisia lämpötilan nousuja lukuun ottamatta. Hakekasan maksimilämpötila kasan sisäosissa oli 69 °C, joka saavutettiin kolmen viikon kuluttua kasan perustamisesta. Tällöin hakekasan sisälämpötila vaihteli 48–69 °C:een välillä. Lämpötilan nousuja varastoinnin alussa on todettu muissakin tutkimuksissa (Heinek ym. 2015, Noll ym. 2010, Jirjis 2004). Hakkuutähdehakekasa tutkimuksessa on hakekasa saavuttanut maksilämpötilansa 51 °C jo viiden päivän varastoinnin jälkeen. Samassa tutkimuksessa Heinek ym. 2013 totesi hakkuutähdehakekasan sisälämpötilan voivan nousta otollisessa kohdassa jopa yli 60 °C:een. Mäntyhakekasa lämpeni tätäkin nopeammin saavuttaen 11 päivän varastoinnin jälkeen maksimilämpötilan 55 °C (Noll ym. 2010). Jirjis (2004) tutkimuksessaan huomasi pajuhakekasan saavuttavan maksimilämpötilan 60 °C jo kahden viikon varastoinnin jälkeen, mikä on hieman aikaisemmin kuin tässä tutkimuksessa.

Onkamon hakkuutähdehake saavutti todennäköisesti korkeamman maksilämpötilan suuremmasta hienoaineksen määrästä johtuen (Heinek ym. 2015) verrattuna vanhemmissa tutkimuksissa seurattuihin hakekasoihin. Myös edellä mainituissa tutkimuksissa maksimilämpötilan saavuttamisen jälkeen kasan lämpötila alkoi laskemaan. Hieman poikkeavaa on hakkuutähdehakekasan maksilämpötilan saavuttaminen vasta kolmen viikon varastoinnin jälkeen. Tämäkin johtunee tavallista matalammasta hakkeen lähtökosteudesta. Toisaalta kasa jäähtyi hitaammin verrattuna muiden tutkimusten aineistoon. Hakekasan sisälämpötila pysyi pitkään noin 20–30 °C ulkolämpötilaa korkeampana, kunnes lopulta seitsemän kuukauden varastoinnin jälkeen hakekasan sisälämpötila laski tasolle joka on noin 5–10 °C korkeampi kuin ulkolämpötila. Vanhemmissa tutkimuksissa lämpötila on laskenut aikaisemmassa vaiheessa jo kahden kuukauden varastointiajan jälkeen noin 10 °C ulkolämpötilaa korkeammaksi (Heinek ym. 2013, Noll ym. 2010). Onkamon kasan hidas lämpötilan laskeminen voi johtua myös osin samoista seikoista kuin lämpötilan hidas nousukin. Onkamon hakekasa on melko iso kokoinen verrattuna Heinekin ym. 2013 tutkimukseen, jossa hakkuutähdehakekasojen koko oli vain noin 15–20 m<sup>3</sup>. Toisaalta Noll ym. 2010 mäntyhakkeen tutkimuksissa käytetty mäntyhakekasa oli kooltaan 1800 m<sup>3</sup> ja tutkimuksissa mitatut lämpötilat ovat tästä huolimatta hyvin samansuuntaiset.

Hakkuutähdehake oli poikkeuksellisen kuiva kasan perustamishetkellä, vaikka hakkuutähteet olivat vain kesäkuun ajan kuivamassa palstalla. Hakkuutähde oli kuivunut yllättävän hyvin, vaikka kesä 2015 ei ollut poikkeuksellisen kuiva. Hakekasan aritmeettinen kosteus kasan perustamishetkellä oli vain 33,2 %, vaikka seassa oli runsaasti vihreää neulasta. Hakkuutähde voi kuivaa palstalla hyvissä olosuhteissa alle 40 % (Hillebrand 2009). Suomen ilmastossa harvoin saadaan kuivattua hakkuutähde alle 40 kosteusprosentin, vaan yleensä se saadaan laskemaan 40–50 % väliin (Nurmi 1993, Routa ym. 2015).

Kosteuden muutosta hakekassa tutkittiin neljän ensimmäisen kuukauden aikana, jolloin hakekasan sisäosat kuivuivat todella hyvin. Kolmen kuukauden varastoinnin jälkeen hakekasan sisältä noin neljän metrin syvyydestä otettujen näytteiden aritmeettinen keskikosteus oli vain 15,0 %. Yhtä matalia keskikosteuksia on saatu aiemminkin tutkimuksissa, joissa varastoitu hakkuutähdehake saavutti 15–20 % keskikosteuden kasan sisäosissa (Heinek ym. 2013).

Seuraavat kosteusnäytteet otettiin kasan purkamisen yhteydessä helmikuun loppupuolella noin kahdeksan kuukautta varastoinnin aloituksen jälkeen. Näissä näytteissä keskikosteus oli 21 %, mikä on 6 prosenttiyksikköä korkeampi, kuin syyskuussa mitattu alin kosteus. Kosteuden nousu on tyypillistä syksyn ja talven sateiden seurauksena (Filbakk ym. 2011).

Hakenäytteiden alkuainepitoisuuksissa kaikilla mitatuilla alkuaineilla (K, Ca, Mg, Mn, P, B, S, Na, Fe, Al, Cu, Zn, Cr, Ti) tapahtui merkittävää muutosta varastoinninaikana 5 % riskitasolla. Tähän vaikuttavat myös paljon näytteiden välillä oleva vaihtelu puunosien välillä. Näytteen epähomogeenisuus tulee tässäkin ongelmaksi. Neulasissa on suurin osa alkuaineista ja niiden määrä näytteissä vaikuttaa paljon hakkeen alkuainepitoisuuksiin. Alkuainepitoisuuksia on aiemmin tutkittu kuusenhakkuutähteen tienvarsivarastoinninaikana (Nurmi 1998). Nurmen tutkimuksessa (1998) tutkittavilla alkuaineilla (K, Ca, Mg, Mn, P, B, S, Na, Fe, Al, Cu, Zn) ei tapahtunut varastoinnin aikana merkittävää muutosta. Nurmen (1998) tutkimuksessa neulasten määrä oli vähäinen, minkä seurauksena neulasten aiheuttaman vaihtelu oli jäänyt vähäiseksi. Tässä tutkimuksessa käytetyssä hakkuutähdehakkeessa oli vielä huomattava määrä vihreää neulasta varastoitaessa, mikä todennäköisesti aiheuttaa näytteiden välistä vaihtelua alkuainepitoisuuksissa.

Hakekasalle muodostuu varastoinnin aikana kuiva-ainetappiota mikrobitoinnin seurauksena. Kuiva-ainetappiota tässä tutkimuksessa selvitettiin hakkeen tuhkapitoisuutta seuraamalla, sekä hakkeen kuiva-aineen painoa vertaamalla ennen ja jälkeen varastoinnin. Tuhkapitoisuutta seuraamalla ei saatu johdonmukaisia tuloksia. Näytteiden tuhkapitoisuus käyttäytyi ennako-odotuksiin nähden päinvastaisesti. Tuhkapitoisuus laski varastoinnin

aikana, vaikka sen tulisi lisääntyä varastoinnin aikana. Mikrobitoiminnan seurauksena orgaaninen aines vähenee, jolloin tuhkapitoisuuden suhteellinen osuus kuiva-aineessa kasvaa. Tämän kaltaisia tuloksia on saatu tutkimuksissa seurattaessa hakkuutähteen tienvarsivarastoja (Nurmi 1998, Lehtikangas & Jirjis 1995). Hakkuutähdehakea tutkittaessa on saatu myös samanlaisia tuloksia, ettei kuiva-ainetappion määrittäminen onnistu tuhkapitoisuuden seurannalla. Hakkuutähdehake on ominaisuuksiltaan niin vaihtelevaa, ettei jokaiseen näytteeseen saada suhteessa samaa määrää neulasia, oksia, kuorta ja runkopuuta (Heinek ym. 2013) Neulaset ja kuori sisältävät huomattavasti enemmän tuhkaa, kuin muut puunosat (Voipio & Laakso 1992). Todennäköisesti tässä tutkimuksessa ensimmäiseen näytteeseen sattui suurempi määrä neulasia ja kuorta verrattuna runkopuuhun suuresta tuhkapitoisuudesta päätellen.

Hakkuutähdehakkeen tuhkapitoisuudet eivät olleet poikkeavat, vaikka ennalta odotettua tuhkapitoisuuden nousua ei havaittu. Tässä tutkimuksessa tuhkapitoisuudet varastoinnin neljän ensimmäisen varastointikuukauden aikana vaihtelivat 2,60–3,51 % välillä. Hakkuutähteen varastoinnissa on mitattu tuhkapitoisuuden vaihtelevan 1,0–3,6 % välillä (Nurmi, 1998, Lehtikangas & Jirjis, 1995). Hakkuutähdehakkeen tuhkapitoisuus voi olla hieman matalampi, jos hakkuutähdettä kuivatetaan pitempään palstalla tai tienvarressa ennen haketusta. Tässä tutkimuksessa käytetyssä hakkuutähdehakkeessa oli vielä paljon tuhkaa sisältäviä neulasia mukana. Varsinkin ensimmäiseen näytteeseen kertyi suurempi määrä neulasia, kun ne eivät olleet vielä tarpeeksi kuivia, että olisivat varisseet näytteenoton yhteydessä kasassa alemmas. Toisen näytteen kohdalla näytteenotto tavasta johtuen mahdollisesti osa kuivista neulasista varisee hakekasaan kairatessa eivätkä siksi päädy hakenäytteen sekaan.

Kuiva-aineen painoa ennen ja jälkeen varastoinnin vertaamalla saatiin kuiva-ainetappioksi 2,67 %, mikä on hyvin matala lukema kahdeksan kuukauden varastointiajalla. Aikaisemmissa tutkimuksissa on huomattu kuiva-ainetappion vaihtelevan noin 1-3 % välillä varastointi kuukauden aikana (Fillbak ym. 2011). Kuiva-ainetappion vähäiseen määrään on voinut vaikuttaa tässä tutkimuksessa melko matala lähtökosteus. Heinek ym.(2013) huomasivat tutkimuksessaan kuivan hakkuutähteen kuiva-ainetappion olevan olematonta kahdeksan kuukauden varastointi ajalla, kun taas tuoreen hakkuutähteen kuiva-ainetappio oli 16 % samalla varastointi ajalla. Vähäiseen kuiva-ainetappion määrään on voinut olla osallisena myös näytteenottoputket. Näytteenottoputkien kautta ilma on voinut päästä vaihtumaan hakekasan sisällä edistäen hakkeen kuivumista. Hakekassa mitattu kolmen kuukauden varastoinnin jälkeinen keskikosteus oli vain 15,0 %. Biomassan kosteusprosentin kuivuessa alle puunsyiden

kyllästymispisteen (25–30 %), sienien kasvu ja mikrobitoiminta merkittävästi vähenevät (Heinek ym. 2015, Viitanen 1994).

Lisäksi kuiva-aineen painoon perustuvassa tutkimusmenetelmässä on voinut tulla virheitä mittaustuloksiin kasan purkamisen yhteydessä. Talvella suoritettua hakekasan purkamisen yhteydessä hakkeen sekaan joutui jäätä ja lunta, mikä aiheuttaa kosteuden nousua hakkeessa. Tässä tutkimuksessa hakkeen kosteusnäytteet otettiin juuri ennen purkua, jolloin lumen vaikutus näytteisiin oli hyvin vähäistä. Kuitenkin lunta ja jäätä kulkeutui Fortumilla punnitun hakkeen sekaan, lisäten sen painoa. Myös lumen ja jään vuoksi terminaalista ei voida hyödyntää aivan kaikkea haketta, jolloin aivan kaikkea haketta ei saatu punnitukseen. Myös hakekasan purkaminen tapahtui usean päivän aikana, mikä on voinut aiheuttaa hakkeessa kosteuden muutoksia. Purkuvaiheessa avonainen hakekasan sivusta altistuu säälle ja on näin ollen otollinen alue kosteuden nousulle.

Hakkuutähdehake kasaa tutkittaessa kokonaisuutena varastointiaikana se tiivistyi, kuivui ensin jonka jälkeen kostui lähtötilannetta kosteammaksi. Lisäksi sen lämpötila nousi ja siinä muodostui vain hyvin vähän kuiva-ainetappiota. Kosteuden muutokset kasan sisäosissa olivat maltillisia varastoinnin aikana, mutta hakekasan kosteus eriosa-alueilla vaihtelee hyvin paljon. Hakekasa kuivuu sisältä kuivaksi kaasujen kierron ansioista. Sisällä muodostuva lämpö pyrkii ylöspäin kasassa siirtäen samalla kosteutta pois kasan sisäosista. Kosteus siirtyy kasan yläosiin korkeimman kohdan kohdalle. Hakekasan pinta toimii eristävänä kerroksena jolloin ulkopuolelta tuleva kosteus ei pääse kasan sisäosiin asti. Tässä tutkimuksessa on huomattavissa kosteuden väheneminen mentäessä syvemmälle hakekassa. Hakekasassa on noin 0,8 metrin syvyyteen asti pintakerrosta, joka on todella märkää. Tämän eristävän kerroksen jälkeen hake alkaa kuivua ja olla suojassa ulkoilman vaikutukselta. Kasan pinnasta otetussa näytteessä kosteus oli jopa 71,8 %. Samaan aikaan kasan sisältä mitattiin kosteudeksi 13,1 %. Sama ilmiö on huomattu toisessakin tutkimuksessa hakkuutähdehakekasassa (Heinek, ym.2013).

Tämä samainen ilmiö huomataan myös lennokilla otetuista ilmakuvista, sekä kasan purkamisen yhteydessä otetusta poikkileikkaus valokuvasta. Lennokilla otetussa termokuvassa näkyy selkeästi kuumen massan sijoittuvan kasan päälle. Kasan päällä ei ole juurikaan lunta, koska ylöspäin nouseva lämpö on sulattanut alueen. Lumen sulaminen kasan päältä voi aiheuttaa lisää kostumista, koska sulamisvedet sekoittuvat helpommin hakkeen joukkoon kuin pinnalle satanut lumi.

Hakekasasta rakennettua 3D-mallia ja termokuvaa vertaamalla voi huomata kasan päällä olevien kohoumien ja termokuvan merkitemmän kuumemman alueen välillä yhteyden. Lämpö

pyrkii kasassa mahdollisimman korkeaan kohtaan ennen purkautumista ilmaan. Poikkileikkausvalokuvasta nähdään myös kuuman ja kostean hakkeen olevan ylhäällä ja keskellä. Näiden tulosten perusteella voidaan päätellä hakekasan tilavuudella ja muodolla olevan suuri vaikutus kasan lämpötilaan ja kosteuteen. Hakekasan muotoa muuttamalla korkeammaksi saadaan enemmän tilavuutta kuivalle eristävän pinnan alla olevalle hakkeelle.

Tämän tutkimuksen tuloksista voidaan päätellä hyvin monen asian vaikuttavan varastoinnin aikana tapahtuviin muutoksiin hakkuutähdehakkeella. Varastoinnin tavoitteena on parantaa tai säilyttää hakkeen laatu hyvänä, kunnes sitä hyödynnetään eteenpäin. Haketettavan hakkuutähteen laadulla ja etenkin neulasten määrällä on paljon vaikutusta hakkeen laatuun. Haketettavan hakkuutähteen tulisi olla kuivaa ja sisältää mahdollisimman vähän neulasia. Kuivemmalle hakkuutähteelle muodostuu vähemmän kuiva-ainetappioita. Lisäksi varastointikasaa tehtäessä hakekasan muotoon tulisi kiinnittää huomiota. Kasan sisäosissa hake kuivaa ja päinvastoin pintaosissa kostuu. Hakekasan sisäosien hakkeen määrä maksimoitaessa suhteessa pintaosien hakkeen määrään, hyvä laatuinen hakkeen osuus oletettavasti kasvaa.

## 5. POHDINTA

Tässä tutkimuksessa käytettyjen materiaalien ja menetelmien hyvyttä tutkimuksessa on syytä pohtia. Hakkuutähde haketettiin heti palsta varastoinnin jälkeen, mikä ei ole hyvin tyypillistä, vaan hakkuutähteet yleensä varastoidaan vielä tienvarressa ennen haketusta. Seuraavaa tutkimusta ajatellen olisi mielenkiintoista selvittää tarkemmin kosteuden siirtyminen hakekassa. Tämä voitaisiin toteuttaa asettamalla näytteidenottoputkia eri syvyyksille kasaan. Myös hakekasan muodon vaikutusta kosteuteen olisi syytä tutkia. Kasan muotoa muokkaamalla voisi rakentaa esimerkiksi ”savupiippuja” joita pitkin lämpö nousisi kasassa ylöspäin. Tämän lisäksi mittauspisteitä tulisi lisätä kasan päälle, koska lämpö ja kosteus nousevat kasassa korkeimpaan kohtaan. Toisaalta kasan pintaosat ovat kosteimpia, joten kasan pintaosien pinta-alaa tulisi yrittää minimoida kasaa muodostettaessa.

Putkien käyttö voi olla ongelmallista, koska putken päissä voi olla tapahtunut ylimääräistä kuivumista ilmanvaihdon vuoksi. Näytteenottoputket tulivat liian pitkälle ulos kasasta, mikä voi aiheuttaa lämpötilan muutoksen. Putket tulisi leikata hakekasan sivun kanssa samaan tasoon, ettei ulkona oleva lämpötila pääse vaikuttamaan putkeen.

Tämän tutkimuksen perusteella kuiva-aineen painon seuraamisella on mahdollista tutkia varastoinnin aikana muodostuvaa kuiva-ainetappiota. Samalla myös ilmenivät ongelmat tuhkan perusteella kuiva-ainetappion määrittämisessä. Muita toimivia menetelmiä voisivat olla puuaineen kuiva-ainetappion määrittäminen tutkimalla puuaineen sellulloosa, hemiselluloosa, sekä ligniini pitoisuuksia. Sienet ja mikrobit hajottavat puuaineista edellä mainittuja orgaanisia aineita, joten näiden pitoisuuksia seuraamalla voidaan päästä käsiksi kuiva-ainetappioon. Puunorgaanisen aineen seurantaan on monia toimivia vaihtoehtoja, kuten DRIFT spectroscopy, wet chemical analyze (Ferraz ym.), FTIR spectroscopy ja Van Soest analyysi (Huilun ym. 2010). Kaikissa edellä mainituissa menetelmissä ongelmaksi muodostuu näytteen heterogeenisuus samoin kuin tuhka pitoisuudella kuiva-ainetappiota määritettäessä.



## KIRJALLISUUSLUETTELO

- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT. 159 s.
- Asplund, D., Nikku, P. & Savolainen, M. 1999. Bioenergian tutkimusohjelman loppuraportti 1993–1998. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. 244 s.
- Chena, H., Ferrari, C., Angiulib, M., Yaoa, J., Raspic, C & Bramantib, E. 2010. Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Carbohydrate Polymers* 82: 772–778.
- De Winter, J.C.F. 2013. Using the Student's t-test with extremely small sample. *Practical assessment, research & evaluation*. 10: 12 s.
- Fengel, D. & Wegener, G. 1984. *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin: Walter de Gruyter & Co. 618 s.
- Ferraz, A., Baeza, J., Rodriguez, J. & Freer, J. 2000. Estimating the chemical composition of biodegraded pine and eucalyptus wood by DRIFT spectroscopy and multivariate analysis. *Bioresource Technology* 74: 201–212.
- Ferrero, F., Lohrer, C., Schmidt, B., M., Noll, M. & Malow, M. 2009. A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22: 439–448.
- Filbakk T., Hoibo OA., Dibdiakova J. & Nurmi J. 2011. Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 267–277.
- Hakkila, P. 1964. Koivujen kuivuminen rasissa ja niistä tehtyjen pinotavarapölkkyjen vetyminen uitossa. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 57. 32 s.
- Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Folia Forestalia* 773. 24 s.
- Hakkila, P. 1992. Metsäenergia. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 422, Helsinki. 51 s.
- Heinek, S., Larch, C., Kirchmair, C., Flörl, K. & Huber, M. 2015. Biomass conditioning – an investigation of the degradation process of woodchips and forest residues during storage in western Austria. *Materials, Methods & Technologies Volume* 9: 37–44
- Heinek, S., Polanz, s., Huber, M.B., Hofmann, A., Monthaler, G., Fuchs, H.P., Larch, C & Giovannini, S. 2013. Biomass conditioning degradation of biomass during the storage of woodchips. 9s.
- Hillebrand, K. 2009. Energiapuun kuivaus ja varastointi. VTT. 17 s.
- Huilun, C., Ferrari, C., Angiulib, M., Yaoa, J., Raspic, C. & Bramantib, E. 2010. Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Carbohydrate Polymers* 82: 772–778.
- Jirjis, R. 2004. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy* 28: 193–201.
- Jirjis, R. 1989 Enumeration and distribution of fungi in stored fuel chip piles. *Material und Organismen* 24: 27–38.

- Kärhä, K. 2014. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2013. Metsätehon tulosalvosarja 5/2014. 24 s.
- Kärkkäinen, M. 2007. Puu rakenne ja ominaisuudet. Metsäkustannus. 468 s.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT tiedotteita 2564. 149s.
- Lehtikangas, P. & Jirjis, R. 1995. Hyggesrester i täckta vältor – Nedebördens inverkan på bränslekvaliteten. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för virkeslära, nro 173. 18 s.
- Lund P. D. 2007. The link between political decision-making and energy options: assessing future role of renewable energy and energy efficiency in Finland. *Energy* 32: 2271–2281.
- Niemi, E. 1994. Tilastotieteen perusteet. Aktiivimoniste. Helsinki. 176 s.
- Nilsson, B., Blom, Å. & Thörnqvist, T. 2013. The influence of two different handling methods on the moisture content and composition of logging residues. *Biomass and bioenergy* 52: 34–42
- Noll, M. & Jirjis, R. 2012. Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. *Appl Microbiol Biotechnol* 95: 551–563
- Noll, M., Naumann, A., Ferrero, F. & Malow, M. 2010. Exothermic processes in industrial-scale piles of chipped pine-wood are linked to shifts in gamma-, alphaproteobacterial and fungal ascomycete communities. *International Biodeterioration & Biodegradation* 64: 629–637.
- Nurmi, J. 1990. Polttohakkeen varastointi suurissa aumoissa. *Folia Forestalia* 767, 18 s.
- Nurmi, J. 1998. Puupolttolaadunvalvonta-125. Bioenergian loppuraportti. 27 s.
- Nurmi, J. 1999. The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy* 17: 41–47.
- Nurmi, J. 2004. Hakkuutähteen kuivatus palstalla. *Metla Bioenergiaametsästä.*
- Pettersson, M. & Nordfjell, T. 2007. Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. *Biomass and Bioenergy* 31: 782–792.
- Rajala, T., Peltoniemi, M., Pennanen, T. & Mäkipää, R. 2010. Relationship between wood-inhabiting fungi determined by molecular analysis (denaturing gradient gel electrophoresis) and quality of decaying logs. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 2384–2397
- Röser, D., Mola-Yudego, B., Sikanen, L., Prinz, R., Gritten, D., Emer, B., Väätäinen, K. & Erkkilä, A. 2011. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass Bioenergy* 35: 4238–4247
- Schwarze, F. 2007. Wood decay under the microscope. *Fungal biology reviews*, s. 1–38.
- Torvelainen, J. 2014. Metsätalastollinen vuosikirja 2014. Metsäntutkimuslaitos. *Energia* 9: 267–288
- Thörnqvist, T. & Jirjis, R. 1990. Changes in fuel chips during storage in large piles. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products 219. 49 s.
- Viitanen, H. 1994. Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. *Materials and structures*. 172: 483–493.

Voipio, R. & Laakso, T. 1992. Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan kemiallinen koostumus. *Folia Forestalia* 789. 22 s.