

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Mika Aalto

**RANKAPUUN JA -HAKKEEN LAADUN VAIHTELU
TERMINAALIVARASTOINNISSA**

Työn tarkastajat: Prof. TkT Tapio Ranta
MMM Olli-Jussi Korpinen

Työn ohjaaja: MMM Olli-Jussi Korpinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Mika Aalto

Rankapuun ja -hakkeen laadun vaihtelu terminaalivarastoinnissa

Diplomityö

2015

63 sivua, 26 kuvaa, 12 taulukkoa, 10 liitettä

Työn tarkastajat: Prof. TkT Tapio Ranta
MMM Olli-Jussi Korpinen

Hakusanat: Bioenergia, rankapuu, hake, puupolttoaine, kosteuspitoisuus, lämpöarvo
Keywords: Bioenergy, stem wood, wood chip, solid fuel wood, moisture content, heat value

Työssä tutkittiin polttoaineterminaalissa varastoitavan puupolttoaineen laadunmuutoksia. Tutkimuksessa tarkasteltiin hakettamattomien rankapuiden ja rankapuuhakkeen kosteuden ja lämpöarvon muutosta. Myös kuiva-ainetappiota tutkittiin aikaisempien tutkimusten perusteella.

Tutkimusaineisto kerättiin Etelä-Savon Energian polttoaineterminaaleista. Kosteuspitoisuuksia mitattiin Hydromette M2050 -pikakosteusmittarilla ja uunikuivausmenetelmällä standardin SFS-EN 14774 mukaisesti.

Tutkimuksessa huomattiin pikakosteusmittarin toimivan riittävän luotettavalla tasolla rankapuiden mittauksissa, mutta hakkeen mittauksissa mittari osoittautui toimimattomaksi. Varastointiaika ei vaikuttanut polttoaineiden lämpöarvoihin, mutta kosteuspitoisuus vaihteli suuresti.

Tutkimustuloksista pääteltiin rangan kuivuvan terminaalivarastossa ja hakkeen kosteuden pysyvän vakiona. Energiasisällön puolesta rankapuuta voidaan varastoida yli 2 vuotta, mutta hakkeen varastointiaika tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Technology
Energy Technology

Mika Aalto

Variation in the quality of small diameter trees in the fuel wood terminal storage

Master's Thesis

2015

63 pages, 26 figures, 12 tables, 10 appendices

Examiners: Prof. D. Sc. (Tech.) Tapio Ranta
M. Sc. (For.) Olli-Jussi Korpinen

Keywords: Bioenergy, stem wood, wood chip, solid fuel wood, moisture content, heat value

The thesis studied fuel quality changes in solid fuel wood terminal. The study examined moisture content and heat value of uncommuted small diameter trees and chipped small diameter trees. Dry matter losses were also investigated by reviewing previous studies.

Research material was collected at the fuel terminals of Etelä-Savon Energia. The moisture content was measured with instant moisture content meter, Hydromette M2050. Also oven drying method with guidance of standard SFS-EN 14774 was used.

The study noticed that instant moisture meter works with sufficient reliability at small diameter tree measurements, but was insufficient for measurements of chipped small diameter trees. The storage period had no effect on fuel calorific value, but the moisture content measured by the meter varied greatly.

Study concluded that the drying of small diameter trees was fast in the fuel terminal and the moisture of wood chips remained the same. Considering energy content, small diameter woods can be in storage for over 2 years, but storage time of chips should stay as short as possible.

ALKUSANAT

Diplomityön tekeminen aloitettiin 2015 vuoden alussa ja se saatiin valmiiksi toukokuussa 2015. Kiitokset Etelä-Savo Energia Oy:lle ja Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle mahdollisuudesta tehdä tämä työ.

Diplomityön alussa kuvittelin tietäväni aiheesta tarpeeksi tehdäkseeni diplomityön. Kuukauden työskentelyn jälkeen tajusin, että en. Loppuvaiheessa työtä huomasin oppineeni tarpeeksi. Nyt työn jälkeen huomaan haluavani oppia lisää.

Diplomityön sijasta voisin sanoa saman asian opiskelusta kokonaisuutena. Molemmissa mielikuviani muokkasivat hyvät ystävät, opiskelukaverit, työkaverit ja raakkaat ihmiset ympärilläni. Kiitoksia teille, kun jaksoitte huomauttaa kun olin väärässä. Joskus jopa kuukausia. Kiitoksia rentouttavista hetkistä, jotta jaksoin jatkaa urakkaa. Kiitoksia kaikesta tuesta ja avusta.

Erityiskiitokset Olli-Jussi Korpiselle ja Tapio Rannalle hyvästä ja ahkerasta työn ohjaamisesta sekä tarkastamisesta. Työstä oli varmasti helppo löytää virheitä, koska niitä oli paljon. Ymmärrän, että muutama piti jättää muidenkin löydettäväksi.

Vanhempani ovat minut tälle tielle päästäneet ja ohjanneet. Kiitos luottamuksesta, että pystyn olemaan parempi opiskelija mitä peruskoulussa olin.

Viimeisenä haluan kiittää rakasta puolisoani, joka on jaksanut katsoa menoani koko opiskelun ajan ja toivottavasti vielä pitkään sen jälkeen.

Mikkelissä 18.5.2015

Mika Aalto

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO.....	7
1 JOHDANTO.....	9
1.1 YLEISTÄ.....	9
1.2 YRITYSESITTELY.....	10
1.2.1 Pursialan voimalaitos.....	11
1.3 TYÖN TAUSTA.....	13
1.4 TYÖN SUORITUS.....	14
2 PUUPOLTTOAINEET ENERGIAN TUOTANNOSSA	15
2.1 PUUPOLTTOAINEIDEN KÄYTTÖ.....	15
2.2 PUUPOLTTOAINEEN LAATUUN VAIKUTTAVAT OMINAISUUDET.....	16
2.2.1 Puupolttoaineen kosteus, lämpöarvo ja tuhkapitoisuus	17
2.3 RANKAPUU	19
2.3.1 Käyttö.....	19
2.3.2 Varastointi.....	20
2.3.3 Kuiva-ainetappiot.....	24
3 TUTKIMUSKOHTEET JA VARASTOT.....	27
3.1 TUTKIMUSKOHTEET	27
3.2 VARASTOT	28
3.2.1 Kivikangas	30
3.2.2 Metsä-Sairila.....	30
3.2.3 Puuskakangas.....	31
3.2.4 Kurkvuori.....	31
3.3 KETJU ILMAN VARMUUSVARASTOINTIA.....	33
4 MITTAUKSET	34
4.1 YLEISTÄ.....	34
4.1.1 Pikakosteusmittaukset.....	34
4.2 ESIVALMISTELUT	36
4.3 HAKKEEN MITTAAMINEN	36
4.4 RANKAPUIDEN MITTAAMINEN.....	38
4.5 MITTAAMISEN JÄLKEEN.....	40
4.5.1 Puupolttoaineen kosteuspitoisuus.....	40

4.5.2	Puupolttoaineen lämpöarvon määrittäminen.....	41
4.5.3	Puupolttoaineen tuhkapitoisuus	43
4.5.4	Virhearviointi.....	44
5	TULOKSET	46
5.1	HAKE	46
5.2	RANKA.....	47
5.3	VIRHEARVIOINTI.....	48
5.3.1	Mittarien aiheuttama virhe.....	49
5.3.2	Sääolosuhteet	52
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	53
6.1	KOSTEUSPITOISUUS	53
6.2	LÄMPÖARVO.....	55
6.3	KUIVA-AINETAPPIOT.....	57
7	YHTEENVETO	59
	LÄHTEET	60

LIITTEET

LIITE I: Tutkimuskohteen 1 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

LIITE II: Tutkimuskohteen 2 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

LIITE III: Tutkimuskohteen 3 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

LIITE IV: Tutkimuskohteen 4 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

LIITE V: Tienvarsivaraston tulokset

LIITE VI: Virhearvioinnin tulokset

LIITE VII: Analyysikosteuden ja tuhkapitoisuuksien tulokset

LIITE VIII: Tutkimuskohteiden 1, 3 ja 4 Lämpöarvoanalyysin tulokset

LIITE IX: Tutkimuskohteen 2 Lämpöarvoanalyysin tulokset

LIITE X: Otanta Studentin t-taulukosta

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Tuhkapitoisuus	[%]
E	Systemaattinen virhe	[%]
H	Vedyn muodostama veden määrä	[%]
m	Massa	[kg]
M	Suhteellinen kosteuspitoisuus	[%]
M_H	Vedyn moolimassa	[g/mol]
M_{H_2O}	Veden moolimassa	[g/mol]
n	Kappalemäärä	[-]
Q	Lämpöarvo	[MJ/kg]
s	Keskihajonta	[-]
t	t-jakauman luottamustasoa vastaava arvo	[-]
u	Absoluuttinen kosteuspitoisuus	[%]
U	Veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä	[MJ/kg]
W	Energiamäärä	[MWh]
x	Mittaustulos	[-]
\bar{x}	Mittaustuloksien keskiarvo	[-]
μ	Todellinen arvo	[-]

Alaindeksit

ash	Tuhka
c	Kalibrointi
d	Kuiva
e	Todellinen arvo
gr	Kalorimetrinen, ylempi
i	Juokseva numero
net	Tehollinen, alempi
w	Märkä

Lyhenteet

CHP	Lämmön ja sähkön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
ESE	Etelä-Savon Energia Oy
FLK	Leijukerroskattila
LUT	Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT-Savo	LUT Savo Sustainable Technologies
MAMK	Mikkelin ammattikorkeakoulu

1 JOHDANTO

1.1 Yleistä

Diplomityössä tutkittiin puupolttoaineiden varastoinnin ja käytön optimointia. Työssä keskityttiin Pursialan voimalaitoksen käyttämiin varmuusvarastoissa oleviin polttoaineisiin, jolloin tarkastelun kohteena oli erityisesti rankapuu. Tutkittavat arvot olivat puun kosteuspitoisuuden muutos ja kuiva-ainetappiot pitkän varastoinnin aikana. Polttoaineen energiatehokkuutta tutkittiin vertailemalla varastoinnin vaikutusta polttoaineen lämpöarvoon.

Tutkimus toteutettiin yhteistyössä Etelä-Savon Energia Oy:n (ESE) kanssa. Tutkimusaineisto kerättiin ESE:n osoittamilta varastoilta ja kosteus- ja tuhka-analyysi suoritettiin LUT Savo Sustainable Technologies (LUT-Savo) toimipisteessä. Tämän lisäksi lämpöarvoanalyysi suoritettiin Mikkelin ammattikorkeakoululla (MAMK). Tutkittava aineisto koostui rankapuun näytteistä, jotka kerättiin polttoaineterminaaleista. Näytteet olivat hakettamattomasta rankapuusta ja rankapuuhakkeesta.

Polttoaineesta määritettiin kosteuspitoisuus, tuhkapitoisuus ja tehollinen lämpöarvo. Kosteuspitoisuus mitattiin Hydromette M2050 -pikakosteusmittarilla ja laboratoriossa suoritettulla uunikuivausmenetelmällä SFS-EN 14774 standardin mukaisesti. Lämpöarvon määrittäminen suoritettiin pommikalorimetrillä SFS-EN 14918 mukaisesti. Puun tuhkapitoisuuden määrittäminen suoritettiin SFS-EN 14775 standardin mukaisesti.

Tuloksista selvitettiin puun laadun muuttuminen varastointiajan suhteen; miten puulaji vaikuttaa laadun muutokseen ja mikä on varastoinnin tiiviyyden merkitys. Tuloksien avulla kehitettiin varmuusvarastointia, jotta puupolttoaineen varastointi ja käyttö tehostuisi. Tämä tarkoittaa varastoinnin aikaisen kuivumisen maksimointia ja kuiva-ainetappioiden minimointia. Optimoitu käyttö ja varastointi parantavat voimalaitosten energiatehokkuutta ja täten vähentävät kustannuksia sekä ympäristörasitteita.

1.2 Yritysesittely

Etelä-Savon Energia on Mikkelin kaupungin omistama yritys. Se on perustettu 9.10.1900, jolloin sen nimi oli Mikkelin sähkölaitos. Konserniin kuuluvat emoyhtiön lisäksi ESE-Verkko Oy, ESE-Tekniikka OY ja OOO ESE ja Russkij LES. Konsernissa työskenteli 103 henkilöä ja liikevaihto oli 53,2 miljoonaa euroa vuonna 2013. Yrityksen toimintaan kuuluu kaukolämmön- ja sähköntuotto sekä jakelu omalla jakeluverkkoalueella. (ESE. 2014a, 6-9)

ESE tuottaa energiaa Pursialan voimalaitoksella sekä tuuli- ja vesivoimalla. Pursialan lauhdevoimalaitos on yhteistuotantolaitos (CHP), eli se tuottaa sekä sähköä että kaukolämpöä. Laitoksen sähköteho on noin 60 MW ja kaukolämpöteho noin 130 MW. Laitoksen käyttö ja polttoaineen hankinta työllistävät noin 300 henkilöä vuodessa. (ESE. 2014a, 12)

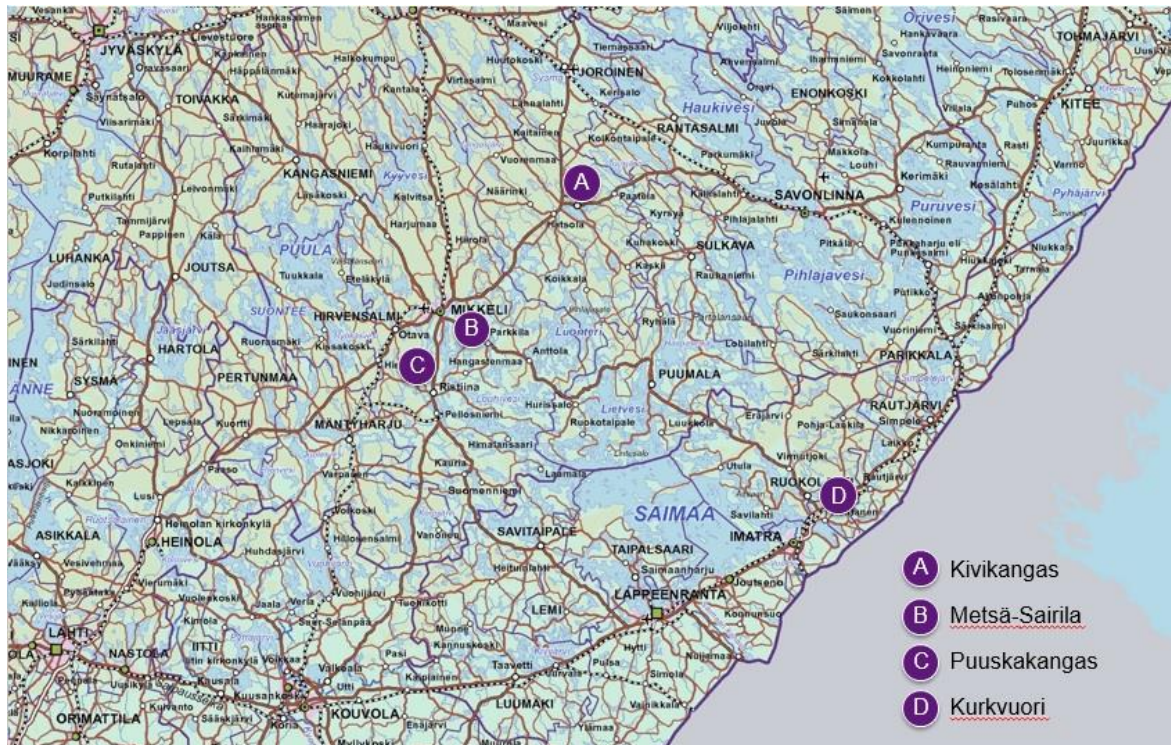
ESE:n arvoina ovat paikallisuus ja ympäristöystävällisyys, jonka vuoksi kotimaisen polttoaineen käyttäminen on yritykselle tärkeää. Laitoksen polttoaineesta merkittävin osa on puupohjaista ja tuotu lähialueelta. Voimalaitoksen Pursiala 2 kattilaan tehtiin muutostyö 2013 kesänä, minkä vaikutuksesta turpeen käyttö väheni ja tätä kautta päästöt vähenivät. (ESE. 2014a, 4; ESE. 2014b, 23)

Taulukossa 1 on ilmoitettu käytetyt polttoaineet vuonna 2013.

Taulukko 1. Pursialan voimalaitoksella käytetyt polttoaineet vuonna 2013. (ESE. 2014a, 17)

POLTTOAINE	MÄÄRÄ		
	GWh	Tonnia	i-m ³
Metsäenergiapuu	495	179 282	636 507
Teollisuuden puutähdde	191	91 295	288 799
Polttoturve	265	102 616	318 784
Polttoöljy	4	339	348
Peltoenergia	1	702	5 971
Kivihiiili	2	310	310
YHTEENSÄ	958	374 544	1 250 719

Työssä käytetty tutkimusmateriaali kerättiin neljältä ESE:n polttoaineterminalilta, joissa pääasiassa varmuusvarastoidaan rankapuuta ja rankapuuhaketta. Kuvassa 1 on merkitty terminaalien sijainnit kartalla. (ESE. 2014a, 20)



Kuva 1. ESE:n polttoaineterminaalien sijainnit. (ESE. 2014a, 21; Taustakartta © MML)

1.2.1 Pursialan voimalaitos

Pursialan voimalaitos sijaitsee Saimaan rannalla Mikkelin kaupungissa Pursialan teollisuusalueella. Voimalaitoksessa on kaksi yksikköä ja lämpökattila. Laitoksen yhteenlaskettu polttoaineteho on 223 MW. Laitos tuottaa sähköä valtakunnalliseen verkkoon ja kaukolämpöä Mikkelin kaupungin kaukolämpöverkkoon. (Aluehallintovirasto. 2014, 1)

Voimalaitoksen kiertopetikkattila, Pursiala 1, on valmistettu 1990. Sen polttoaineteho on 95 MW. Kattila pystyy tuottamaan kiinteällä polttoaineella 30 MW teholla sähköä ja 65 MW teholla kaukolämpöä. Kattilan keskimääräinen hyötysuhde on 90 %. Vuosina 2007–2011 kattilassa eniten käytetty polttoaine oli metsähake (41,9 %). Tämän lisäksi kattilassa käytettyjen muiden puupolttoaineiden osuudet olivat: teollisuuden puutähdettä (32,5 %), turvetta (21,1 %) ja kierrätyspuuta (3,3 %). Kattilassa käytettiin tarpeen vaatiessa kivihiiltä (0,9 %) ja sytytykseen raskasta polttoöljyä (0,3 %). (Aluehallintovirasto. 2014, 4)

Voimalaitoksen leijukerroskattila, Pursiala 2, on valmistettu vuonna 2005. Sen polttoaineteho on 98 MW. Kattila pystyy tuottamaan kiinteällä polttoaineella 32 MW teholla sähköä ja 60 MW teholla kaukolämpöä. Kattilan keskimääräinen hyötysuhde on 90 %. Kesällä 2013 Pursiala 2 kattilaan tehtiin muutostyö, joilla lisättiin puuperäisten polttoaineitten käyttöastetta. Ennen korjaustöitä, vuosina 2007–2011, eniten käytetty polttoaine oli turve (53,1 %). Korjaustyöt mahdollistavat turpeen pois jättämisen kokonaan (ESE 2014b, 4). Tämä tarkoittaa mahdollisuutta lisätä uusiutuvien polttoaineiden osuutta 85 %:iin aikaisemmasta 70 %:sta. (Aluehallintovirasto. 2014, 4-5)

Kahden pääkattilan lisäksi laitoksella on vara- ja huippukattila FLK 2, joka käynnistetään häiriötilanteissa sekä huippukulutuksen aikana. FLK 2 on leijukerroskattila, jonka polttoaineteho on 30 MW. Sillä pystytään tuottamaan 27 MW teholla kaukolämpöä. Kattilan keskimääräinen hyötysuhde on 90 %. Vuosina 2007–2011 kattilassa käytettiin turvetta 97,4 % ja kevyttä polttoöljyä 0,3 %. Tämän lisäksi käynnistämiseen käytettiin raskasta polttoöljyä (2,3 %). (Aluehallintovirasto. 2014, 5)

Vuonna 2012 Pursialan voimalaitoksella käytetyn metsähakkeen kosteus oli keskimäärin 41,5 %. Lämpömäärä metsähakkeella oli 19,0 MJ/kg. Metsähakkeen tuhkapitoisuutta ei ole ilmoitettu, mutta puupolttoaineilla se on hyvin alhainen, jopa alle prosentin (Alakangas, E. 2000. 35). Turpeella kosteus oli 44,9 % ja lämpöarvo 21,0 MJ/kg. Tuhkapitoisuus Pursialan käyttämällä turpeella oli 7,9 % vuonna 2012. Turpeen rikkipitoisuus oli 0,3 %, kun taas puupolttoaineilla se oli 0,0 %. Pursialan voimalaitoksella käytettyjen polttoaineiden ominaisuuksista pystytään toteamaan metsähakkeen olevan laadultaan parempaa kattilalle ja ympäristölle. (Aluehallintovirasto. 2014, 6)

1.3 Työn tausta

Puupolttoaineiden suhteellisen pienen energiasisällön takia voimalaitoksissa käytettävän polttoaineen tilantarve on suuri. Polttoaineterminaalien varastot toimivat varmuusvarastoina, eli niitä käytetään, kun polttoaineen tarve kasvaa yllättävästi. Varmuusvarastoja käytetään pääsääntöisesti kylminä talvipäivinä, kun energian tarve on suuri. Vastaavasti puupolttoaineiden hankintaa tapahtuu myös kesän aikana, kun energian tarve on vähäinen. Epätasaisen tarpeen ja hankinnan takia polttoaineen varastointiaika vaihtelee suuresti. (Jirjis R. 1995, 181)

Polttoaineterminaaleissa rankapuuta varastoidaan hakettuna tai hakettamattomana. Tässä tutkimuksessa tutkittu rankapuu oli tuotu Venäjältä. Hake oli lehti- ja havupuuta sekasin, ja se oli hakettu juuri ennen junaan lastaamista ja sen jälkeistä kuljetusta Suomen puolelle.

Puupolttoaineiden varastoinnin aikaisia laadun muutoksia ovat aikaisemmin tutkineet mm. Jahkonen et al. (2012), Elberg et al. (2014), Jirjis (1995) sekä Nurmi ja Hillebrand (2007). Aikaisemmat tutkimukset osoittavat puupolttoaineen kuivuvan nopeammin keväällä ja alkukesästä. Puiden uudelleen kastumista tapahtuu syksyllä ja talvella. Uudelleen kastumista ilmentyy lumen sulamisen yhteydessä ja sateisella säällä. Tutkimuksissa todetaan kuivumisolosuhteiden olevan tärkeämpiä kuin ajan.

Ranka- ja kokopuu kuivuvat yhtä nopeasti. Kokopuussa kuivumista edistää tuore lehti- ja havumassa, kun taas rankapuussa karsinnan aikana rikkoutunut kuori. (Lepistö T. et al. 2010, 26)

Rankapuun pitkät varastointiajat aiheuttavat biologisen hajoamisen ja homehtumisen myötä kuiva-ainetappioita. Tähän vaikuttaa suuresti polttoaineen kosteus. Suuremmalla kosteudella hajoamista ja homehtumista tapahtuu enemmän. Kuivempi polttoaine on myös energiatehokkaampaa polttaa voimalaitoksessa. Vaikka polttoaine voi olla liian kuivaa kattilalle, tämä kuivuus on ulkoilmakuivauksen yhteydessä lähes mahdotonta saavuttaa (Karppanen, J. 2015). Tämän vuoksi työssä katsottiin mahdollisimman kuiva polttoaine parhaimmaksi vaihtoehdoksi. (Nurmi J & Hillebrand K. 2007, 381–382)

1.4 Työn suoritus

Työn teoriaosuudessa tarkasteltiin bioenergiaa yleisesti ja sen käyttöä Suomessa. Tarkemmin perehdyttiin puupolttoaineisiin sekä erityisesti rankapuuhun ja sen ominaisuuksiin. Koska työ käsittelee voimalaitoksella käytettävää puupolttoainetta, tärkeimpinä ominaisuuksina olivat kosteus ja lämpöarvo. Näiden arvojen mittaukset suoritettiin pikakosteusmittarilla sekä keräämällä näytteitä, joille suoritettiin laboratoriossa kosteuspitoisuus-, lämpöarvo- ja tuhkapitoisuusanalyysi.

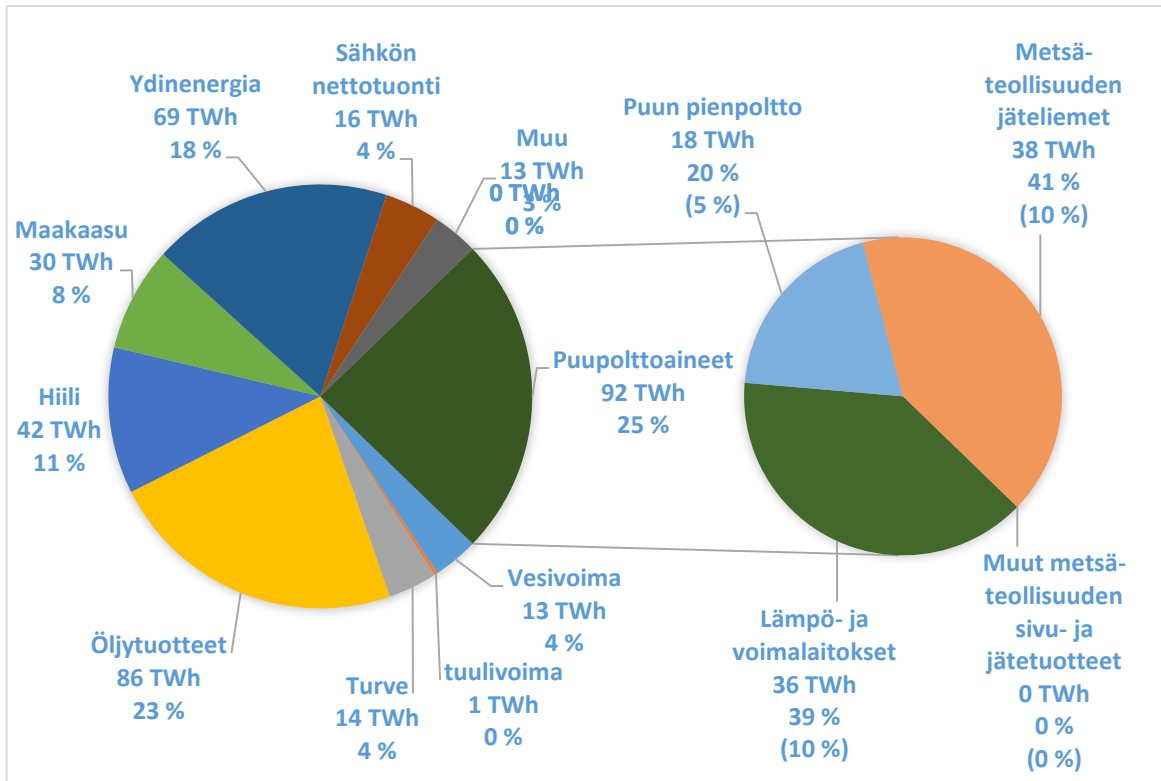
Puupolttoaineen kuiva-ainetappiot olivat yksi kiinnostuksen kohde työssä. Kuiva-ainetappiot pystytään mittaamaan polttoaineen massan ja tiheyden muutoksen avulla (Feist et al. 1972, 187). Koska tutkimuksessa ei ollut tiedossa alkuperäisiä polttoaineiden massoja tai tiheyksiä, oli tappioiden määrittäminen haasteellista. Tästä syystä kuiva-ainetappiot arvioitiin silmämääräisesti ja aikaisempien tutkimusten perusteella.

2 PUUPOLTTOAINEET ENERGIAN TUOTANNOSSA

2.1 Puupolttoaineiden käyttö

Suomessa tärkein bioenergian raaka-aine on puu. Puupolttoaineiden osuus oli vuonna 2013 neljäsosa Suomen energian kokonaiskulutuksesta. Lämpö- ja voimalaitokset käyttivät kiinteitä puupolttoaineita 18,7 miljoonaa kuutiometriä. Energiasisällöltään tämä vastaa 36 TWh, joka oli 10 % Suomen energian kokonaiskulutuksesta. Edellisvuodesta puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa kasvoi 5 % eli 0,9 miljoonaa kuutiometriä. Kiinteissä puupolttoaineissa eniten käytetty polttoaine oli metsähake. Vuonna 2013 metsähakkeen käyttö kasvoi 8,0 miljoonaan kuutiometriin. Kasvu oli 5 % edellisvuodesta. (Torvelainen et al. 2014, 1)

Kuvassa 2 on esitelty Suomen eri energiamuotojen käyttö vuonna 2013. Vasemmalla on kokonaiskäyttö, joka oli 376 TWh. Puupolttoaineiden käytön osuus kokonaiskäytöstä oli 25 % ja tällä on suurin osuus kokonaiskäytöstä. Oikealla on eri puupolttoaineiden muotojen käyttöosuudet. Metsäteollisuuden jäteliemien osuus on tästä suurin, 41 %. Suluissa ilmoitettu luku on osuus kokonaiskulutuksesta, joka on metsäteollisuuden jäteliemellä 10 %. Mielenkiintomme on lämpö- ja voimalaitosten osuudessa. Tämä jakaantuu metsähakkeeseen (42,8 %), kuoreen (35,3 %), puruun (12,3 %), teollisuuden puutähdehakkeeseen (5,3 %) ja muihin (4,3 %). (Torvelainen et al. 2014, 4)

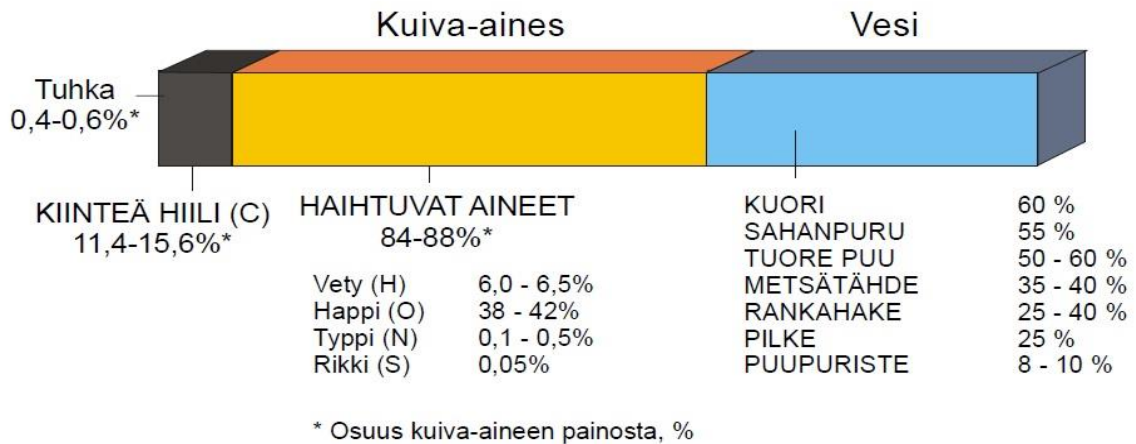


Kuva 2. Eri energiamuotojen osuudet Suomen energian kokonaiskäytöstä vuonna 2013. (Torvelainen et al. 2014, 6)

Puupolttoaineiden käyttö on lisääntynyt tasaisesti ja erilaisten tavoitteiden toteutuminen näyttää tapahtuvan. Kansallisessa metsäohjelmassa metsähakkeen käytön tavoite on vuodelle 2015 10–12 miljoonaa kuutiometriä ja Suomen energia- ja ilmastostrategian tavoite vuodelle 2020 on 25 TWh, joka vastaa 13 miljoonaa kuutiometriä. Molemmat tavoitteet ovat mahdollisia saavuttaa, mutta vaativat puupolttoaineiden käytön kasvun jatkumista. (Torvelainen et al. 2014, 1)

2.2 Puupolttoaineen laatuun vaikuttavat ominaisuudet

Puun ominaisuuksiin vaikuttaa puulaji, kasvupaikka ja ikä. Puu koostuu siihen sitoutuneesta vedestä, haihtuvista aineista, hiilestä ja tuhkasta. Hiilen, vedyn ja hapen osuus kuiva-aineessa on noin 99 % (Alakangas, E. 2000. 35). Kuvassa 3 on esitelty puun koostumus.



Kuva 3. Puun koostumus. (Alakangas, E. 2000. 35)

Energiatuotannon kannalta puun tärkeimpiä ominaisuuksia ovat sen lämpöarvo ja kosteus. Nämä määrittelevät kuinka paljon energiaa pystytään puusta saamaan. Tuhkapitoisuuden vaikutus on vähäisempi, mutta sen käsittely tuo kustannuksia ja tuhkan sulaminen aiheuttaa haittoja kattilassa. Tämän vuoksi puun vähäinen tuhkapitoisuus on polttoaineelle eduksi. (Alakangas, E. 2000. 37)

2.2.1 Puupolttoaineen kosteus, lämpöarvo ja tuhkapitoisuus

Lämpöarvosta voidaan puhua alempana tai ylempänä lämpöarvona. Ylempi lämpöarvo, eli kalorimetrinen lämpöarvo on vapautuneen lämpöenergian määrä massayksikköä kohden, kun mitattava aine palaa täydellisesti ja jäähtyy 25 °C lämpötilaan. Tämä arvo saadaan määritettyä pommikalorimetrissä. Alempi, eli tehollinen lämpöarvo on vapautuneen lämpöenergian määrä massayksikköä kohden, kun polton yhteydessä muodostunut vesi höyrystyy ja jäähtyy takaisin alkulämpötilaan pysyen höyrynä. Muodostuvan veden määrä riippuu aineen vetypitoisuudesta. Alempi lämpöarvo voidaan ilmoittaa kuivaa polttoainetta kohden tai saapumistilassa. Saapumistilassa aineeseen imeytynyt kosteus on mukana lämpöarvossa ja veden höyrystymiseen kuluva energia vähennetään lämpöarvosta. Voimalaitoksissa kiinnostuksen kohteena on polttoaineen saapumistilassa oleva lämpöarvo, koska tämä kuvastaa polttoaineesta saatavaa energiamäärää parhaiten. (Alakangas, E. 2000, 27–29)

Lämpöarvon määrittäminen on työn kannalta tärkeää, koska se on voimalaitokselle tärkein polttoaineen ominaisuus. Varastossa olevan polttoaineen laatua tarkastellessa käytämme saapumistilassa olevaa alempaa lämpöarvoa. Tämä antaa kuvan puuaineen ominaisuuksista, huomioiden kosteuden vaikutuksen. Tämä arvo kuvaa polttoainetta voimalaitoskäytössä parhaiten, koska poltettaessa puupolttoaineita energian saanti on kostean polttoaineen alemman lämpöarvon mukainen.

Kosteassa hakkeessa ilmenee biologista hajoamista ja lämpenemistä pitkän varastoinnin aikana. Tämä lisää kuiva-ainetappioita ja itsestään syttymisen vaaraa. Talvella märän hakkeen jäätyminen aiheuttaa käyttöongelmia ja vaurioita syöttökuljettimelle. Poltettaessa märkä hake lisää tuhkan määrää, joka tuo laitokselle lisäkustannuksia. (Lepistö T. et al. 2010, 7)

Kuvassa 4 on lämpöarvon muutos polttoaineen kosteuspitoisuuden mukaan. Kuvaaja on muodostettu myöhemmin kappaleessa 4.5.2 esitellyn yhtälön (3) avulla ja lähtöarvona on käytetty 19,0 MJ/kg.



Kuva 4. Lämpöarvon muutos kosteuspitoisuuden mukaan.

Tuhkapitoisuus on puupolttoaineissa vähäistä verrattuna muihin kiinteisiin polttoaineisiin Alakangas, E. 2000, 37). Laitila et. al. (2013) mukaan kokopuumurskeella tuhkapitoisuus on 1,35 %, hakkuutähdemurskeella 4,35 % ja kantomurskeella 12,9 %. Laitilan et al. tutkimuksessa tuhkapitoisuutta nostaa polttoaineeseen jäänyt maa-aines. Alakangas (2000) ilmoittaa kokopuuhakkeen tuhkapitoisuuden olevan 0,50 %, hakkuutähdehakkeen 1,33 % ja kantohakkeen 0,50 %, kun kyseessä on maa-aineksesta puhdas polttoaine.

2.3 Rankapuu

Ranka on puun runko-osa karsittuna. Tämä tarkoittaa kannon yläpuolelta leikattua oksatonta puuta, josta myös latvusto on poistettu (Alakangas et al. 2014, 16). Voimalaitoskäytössä järeä runkopuu on runkohukkapuuta. Puu ei siis ole kelvannut ainespuuksi, joten se hyödynnetään energiateollisuudessa polttamalla.

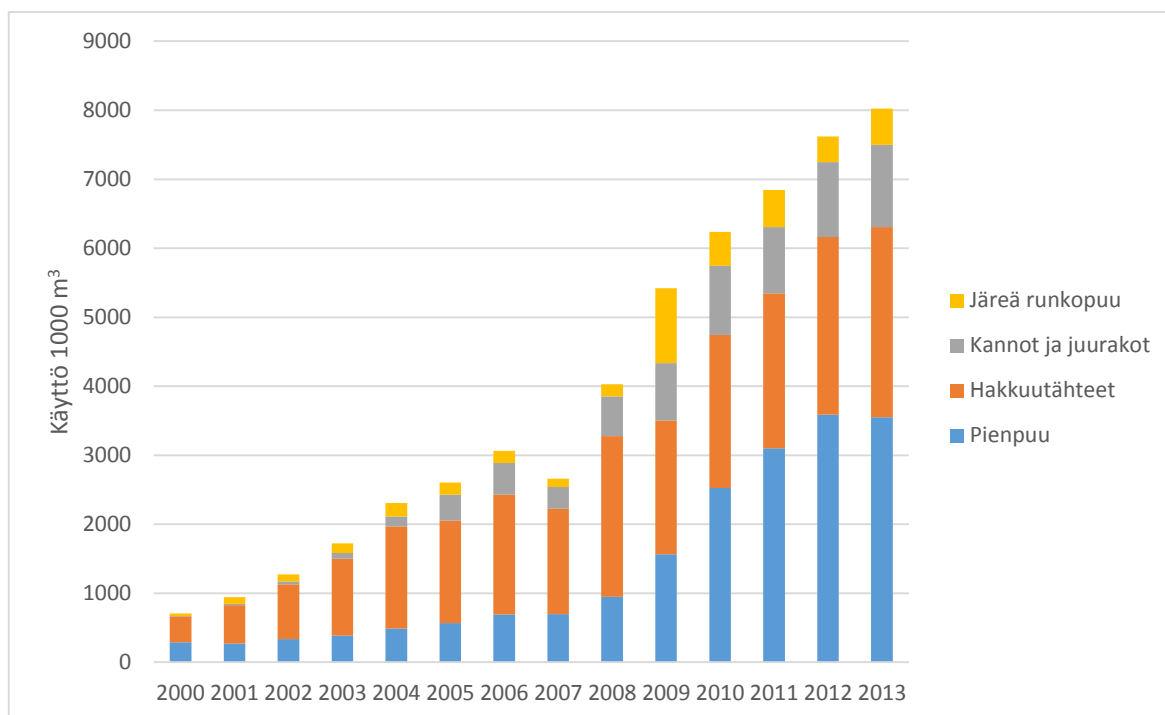
Tässä tutkimuksessa rankapuulla tarkoitetaan kuitenkin pieniläpimittaista puuta, eli pienpuuta.

Pienpuuta korjataan voimalaitoskäyttöön pääasiassa varttuneista taimikoista ja nuorista kasvumetsistä harvennuksen yhteydessä. Varttuneissa taimikoissa puun rinnankorkeusläpimitta on alle 8 cm. Havupuiden valtapituus on alle 7 m ja koivujen 9 m. Nuorissa kasvumetsissä rinnankorkeusläpimitta on 8–16 cm ja valtapituus on yli 7 m. Rankapuuta voidaan kerätä myös tien-, ojan-, ja pellonvarsien harvennuksien yhteydessä. Tällöin saannin tulee olla riittävä ja kustannusten matalat. (Lepistö et al. 2010, 8)

2.3.1 Käyttö

Rankapuu oli vuonna 2014 ensimmäisellä neljänneksellä kallein energiapuu, mutta eniten ostettu energiapuulaji. Rankapuu on yksi osa pienpuuta, joka on suurin osa metsähakkeesta. Pienpuun käyttö oli vuonna 2013 3,6 miljoonaa kuutiometriä, joka on hieman vajaa puolet metsähakkeesta (8 milj. m³). Tammi-maaliskuussa 2014 rankapuun keskimääräinen hankintahinta, tienvarteen toimitettuna, oli koko maassa 22,00 €/m³ ja sen osuus energiapuukaupoista oli 42 %. Kokopuun osuus energiapuukaupoista oli vain 8 %, ja sen hankintahinta oli 20,00 €/m³. (Torvelainen, J. 2014, 1) Kuvassa 5 on esitelty metsähakkeen kokonaiskäyttö vuosina 2000–2013. Kuvasta huomataan metsähakkeen käytön ja pienpuun osuuden kasvaminen.

Rankapuun suuri puuainesosuus ja pieni viherainesmäärä tekevät puusta helppokäyttöisen polttoaineen voimalaitokselle. Oksien karsiminen jättää ravinteita kasvupaikalle ja mahdollistaa tiiviimmän varastoinnin. Kuivuminen on myös nopeampaa karsittujen oksien kohdalla. Lisäksi voimalaitoksen kattilan kuumakorroosion riski pienenee vähäisen neulasmäärän ansiosta. Haittapuolena on noin 20 % heikompi energiapuukertymä hakkuupalstalta ja kalliimpi hinta. (Lepistö et al. 2010, 11)



Kuva 5. Metsähakkeen kokonaiskäyttö raaka-aineittain 2000–2013. (Torvelainen et al. 2014, 5)

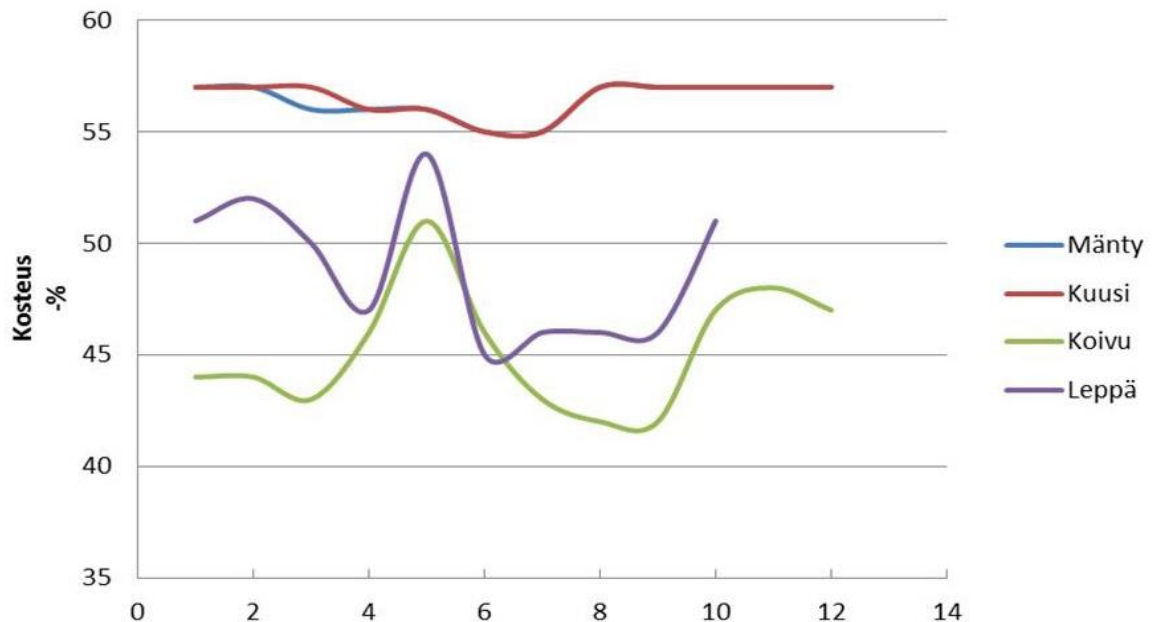
2.3.2 Varastointi

Puupolttoaineiden varastoinnissa haasteena ovat varastoinnin aikana ilmenevä kosteuspitoisuuden vaihtelu ja kuiva-ainetappiot. Näitä pystytään vähentämään hyvällä varaston rakenteella ja oikealla varastointipaikalla. Hakettamattomalla rankapuulla tämä tarkoittaa varaston kuivaa ja puhdasta alustaa, varaston sijoittamista tuuliseen ja aurinkoiseen paikkaan sekä ilmavan varastopinon tekemistä aluspuiden päälle. Ilmavuutta voidaan parantaa myös laittamalla poikkipuita varaston väleihin. Rangat tulisi pinota niin, että ylimmät rangat luovat lipan, jonka pituus on noin 0,5–1 m. Tällöin sateen ja lumen aiheuttamat haitat vähenevät. Vaihtoehtoisesti varastopinon voi peitellä. (Lepistö et al. 2010, 21)

Koska rankapuu ei sisällä oksia, latvoja eikä kantoja, on rankapuun laatu yleisesti hyvää ja tasaista. Viheraineiden määrä on vähäisempää kuin kokopuussa tai hakkuutähteessä, mikä vähentää biologisen hajoamisen ja homehtumisen tapahtumista polttoaineessa. Koska rangassa kuoren osuus on huomattavasti vähäisempää kuin oksissa tai muissa hakkuutähteissä, on sen tuhkapitoisuus pienempi. Muutenkin suurempi puuaineen määrä kokonaismäärässä takaa tasaisemman ja paremman laadun polttoaineessa. (Alakangas, E. 2000. 35–39)

Rankapuun hyvä varastoitavuus mahdollistaa sen käytön varmuusvarastoinnissa. Rankapuuta voidaan varastoida sellaisenaan pinoihin tai hakkeena aumoihin. Hakettamaton ranka voidaan varastoida tienvarsiin tai terminaaliin. Hakettua rankapuuta varastoidaan terminaaleissa ja voimalaitoksilla.

Rankojen varastoinnin aikaisessa laadunmuutoksessa merkittävin muutos tapahtuu kosteuspitoisuudessa. Rankojen alkukosteus riippuu kaatoajasta, kasvupaikasta ja puulajista (Raitila J. 2014, 4). Kuvassa 6 on eri puulajien kaatokosteuksia kaatokuukauden mukaan. Rankojen kuivumiseen varastoinnin aikana vaikuttavat paikka, varaston laatu ja sääolosuhteet. Näistä merkittävin tekijä on sääolosuhteet. Sääolosuhteiden negatiivisia vaikutuksia voidaan pienentää hyvällä varastopaikalla ja peitteellä. (Raitila J. 2014, 3; 7).



Kuva 6. Eri puulajien kosteuspitoisuudet kaatokuukauden mukaan. (Raitila J. 2014,4)

Rankapuut kuivuvat nopeasti. Hyvissä sääolosuhteissa rankapuut voivat kuivua jo ensimmäisenä vuonna melkein 20 %:n kosteuspitoisuuteen. Erityisesti lehtipuut kuivuvat nopeasti rankana. Varastoinnin aikaista uudelleenkastumista voidaan estää peittämällä rankapino. (Raitila J. 2014, 11)

Rankapuiden kuivumiseen pystytään vaikuttamaan rikkomalla puun kuorta. Kuori hidastaa kosteuspitoisuuden muutosta, joten kuoren poistaminen nopeuttaa myös uudelleenkastumista. Lehtipuilla kuivuminen nopeutuu jo pienestä kuoren raapimisesta. Männyllä kuoren rikkomisen ei ole havaittu vaikuttavan kuivumiseen yhtä merkittävästi. Rankapuiden keruun aikana kuoreen syntyy pieniä vahinkoja ja oksien poisto jättää puuaineen paljaaksi. Harvesterikouralla rangasta poistuu kuorta 3–6 % (Lehtimäki, L. & Nurmi, J. 2006). Tämä on riittävästi tehostaakseen rangan kuivumista. Kuivumisen lisätehostamiseksi voidaan kuorta poistaa vielä enemmän. (Röser et al. 2010, 57)

Hakkeen palakoolla ei ole polton kannalta merkitystä, jos hakkeen kosteuspitoisuus on 40–50 %. Kuivemmalla hakkeella pieni palakoko aiheuttaa pölyämistä, joka voi aiheuttaa polttoaineen menettämistä varastoinnin aikana. Märällä hakkeella palamisen yhteydessä pienet partikkelit saattavat jäädä palamatta, kun ne kulkeutuvat kattilasta pois savukaasujen mukana. Suurilla paloilla palaminen on hidasta ja tehontuotto alhaisempaa. Tasainen palakoko helpottaa hakkeen käyttöä voimalaitoskäytössä ja varastoinnissa. (Jylhä P. 2013, 5)

Hakkeen varastoinnin yhteydessä tapahtuva itsestään lämpiäminen vaikuttaa hakkeen kuivumiseen. Auman keskellä lämpenevä hake kuivuu nopeammin. Lämmönvaikutuksesta vesi haihtuu ja siirtyy aumassa ylös ja reunoille. (Eriksson A. 2011, 21)

Kosteuspitoisuus ei ole tasaisesti jakautunut, vaan se kertyy omaksi alueeksi. Nämä kosteuskertymät näkyvät avonaisessa aumassa tummempana hakkeena ja kosteuspitoisuus on reilusti korkeampi, jopa yli 60 %. Kosteuskertymän alue on suurempi auman matalammassa kohdassa. Tällöin hake muodostaa kulhon, johon vesi ja lumi kertyvät. Koska vesi ei valu pois, se imeytyy hakkeeseen, aiheuttaen huomattavasti kosteamman kohdan aumaan. Kosteus lisää homehtumista ja biologista hajoamista hakkeessa. Kuvassa 7 näkyy homehtunutta haketta kosteuskertymän läheisyydessä. (Eriksson A. 2011, 21)



Kuva 7. Hakkeessa olevaa hometta kosteuskertymän alapuolella.

Jirjis ja Lehtikangas tutkivat 1998 hakeauman laadun muutosta. Tutkimuksessa alkukosteus oli hyvin alhainen, 24–26 %. Tutkimuksen 6 m korkean hakeauman kokonaiskosteus pysyi lähes vakiona 8 kuukauden tutkimuksen ajan. Kosteus oli siirtynyt hakeauman yläosiin. Tutkimuksessa kuiva-ainetappiot vaihtelivat merkittävästi mittauspisteiden välillä. Kuiva-ainetappiot ajoittuivat tutkimuksen alkuvaiheeseen ja olivat hyvin vähäisiä, keskimäärin 0,2 % kuukaudessa, pidemmällä varastointiajalla. Tutkimus puoltaa kuivan hakkeen varastoinnin etuja ja kosteuden kertymistä auman yläosiin.

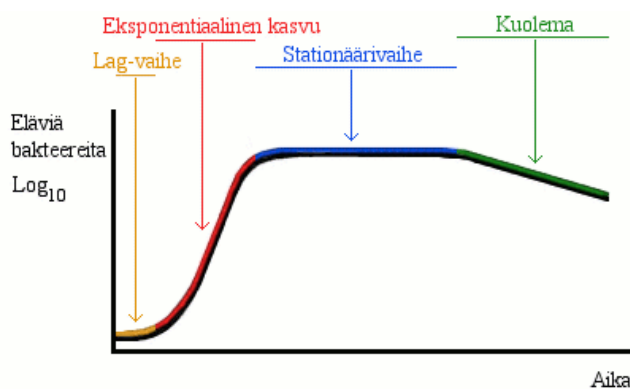
Talvella pakkasen jäädyttää päällisen hakkeen. Jäätäneen hakkeen paksuus riippuu sääoloista. Mittauksien aikana noin metrin verran auman päällä olevaa haketta oli jäänyt kiinteäksi. Tämä jäänyt kerros ei sovellu mittauspisteeksi, eikä voimalaitoskäyttöön. Haketta haettaessa polttoon jäänyt kerros poistetaan omaan kasaan, jossa se seisoo, kunnes on sulanut ja valmis polttoon. Tämä jäänyt kerros luo eristävän kerroksen hakkeelle, joka suojaa haketta sään vaikutuksilta, mutta samalla estää kosteuden ulospääsemistä aumasta. (Eriksson A. 2011, 21)

2.3.3 Kuiva-ainetappiot

Rankahakkeen varastoinnissa esiintyy kuiva-ainetappioita ja itsestään lämpenemistä. Näiden esiintyminen on harvinaisempaa, jos ranka varastoidaan hakettamattomana pinoihin (Erber et al. 2014, 15). Hakkeen pienempi palakoko luo enemmän pinta-alaa puuainekselle, jota pieneliöt syövät. Myös huonompi ilmanvaihto edistää aumassa tapahtuvaa hajoamista ja homehtumista. Nämä lisäävät myös hakkeen itsestään lämpenemistä. (Halkonen T. 2005, 10)

Hakettamattoman rangan kuiva-ainetappiot arvioidaan tässä työssä ainoastaan silmämääräisesti ja ne oletetaan vähäisiksi.

Kuiva-ainetappiot syntyvät varastoinnin aikana mikrobiologisesta toiminnasta ja homehtumisesta. Mikrobiologinen toiminta noudattaa kuvan 8 mukaista kasvukäyrää. Alussa olevassa lag-vaiheessa mikropopulaatio tottuu uuteen ympäristöönsä. Tämän jälkeen alkaa populaation kasvu. Kasvun nopeuteen vaikuttaa lämpötila, kosteus, pH ja saatavilla oleva ravinto (Alakangas E. 2000, 113). Kasvuvaiheen jälkeen populaation määrä hakeutuu tasapainotilaan, jonka jälkeen kuolemisen myötä populaation koko alkaa vähenemään.



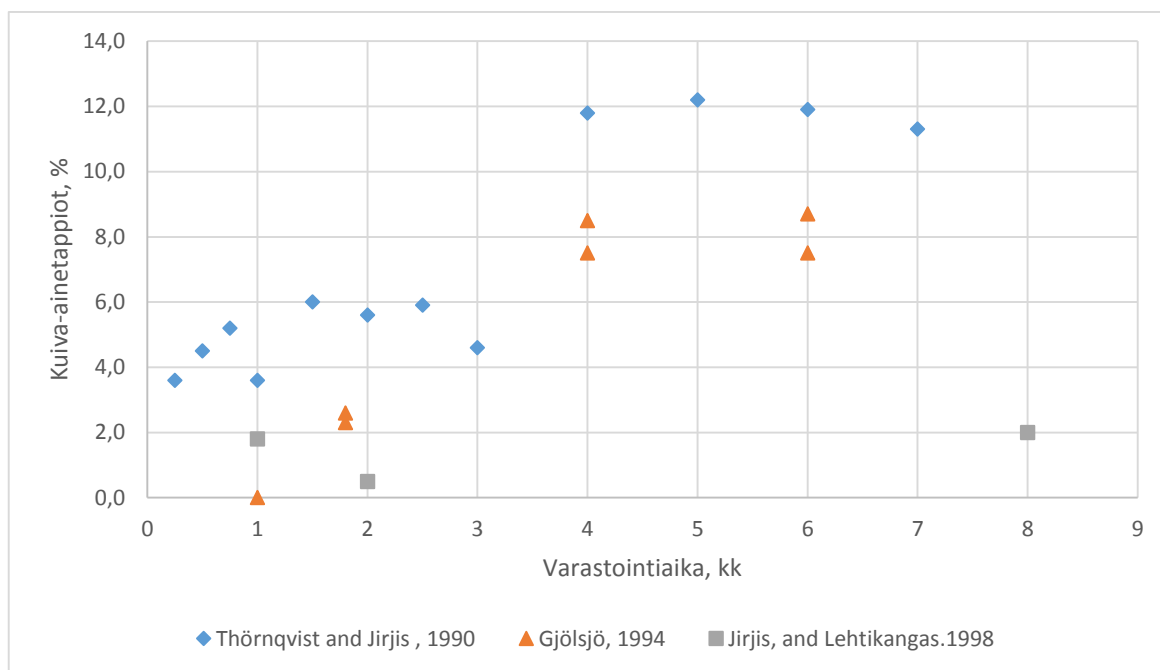
Kuva 8. Mikrobiologinen kasvukäyrä. (Solunetti, 2006)

Thörnqvist ja Jirjis (1990), Gjölsjö (1995) ja Jirjis & Lehtikangas (1998) ovat aikaisemmin tutkineet hakkeen kuiva-ainetappioita. Tutkimuksien perusteella kuiva-ainetappiot ovat suurimmat varastoinnin alussa ja merkittävin tekijä kuiva-ainetappioiden määrään on hakkeen alkukosteus. Näiden tutkimusten perusteella voidaan olettaa hakkeessa mikrobiologisen kasvukäyrän lag-vaiheen olevan lyhyt. Tätä oletusta tukee Raitilan (2015) tekemä tutkimus, jossa hakkeen lämpötilan avulla arvioitiin kuiva-ainetappioita. Tutkimuksessa hakeumat saavuttivat maksimilämpötilansa muutamassa päivässä.

Mikrobien kasvuun ja stationäärivaiheen populaation määrään vaikuttaa saatavilla olevan ravinnon määrä ja typen määrä. Typpi on tärkeä solujen kasvun ja toiminnan takia. Tästä syystä viheraineiden suuri typen määrä lisää hakkeessa kuiva-ainetappioita. Hiilen ja typen optimisuhte on mikrobien toiminnan kannalta 25–40 C/N, mutta tämä saattaa vaihdella alustan mukaan. (Tuomela et al. 2000, 172)

Kuiva-ainetappioiden määrittäminen tässä työssä on hankalaa, kun varastojen alkuperäisiä massoja tai tiheyksiä ei tunneta. Tämän vuoksi kuiva-ainetappioita arvioidaan seuraavien tutkimusten avulla: Thörnqvist ja Jirjis (1990), Gjölsjö (1995) ja Jirjis & Lehtikangas (1998). Kaikki tutkimukset puoltavat kosteamman hakkeen aiheuttavan suuremmat kuiva-ainetappiot. Tutkimukset osoittavat myös kuiva-ainetappioiden suuremman osuuden varastoinnin alkuvaiheessa.

Kuvassa 9 on kaikkien kolmen tutkimuksen tulokset kuiva-ainetappioiden määrästä varastoinnin aikana. Jirjisin ja Lehtikankaan (1998) tutkimuksessa varastoidun hakkeen kosteuspitoisuus oli alhainen ja tämän takia kuiva-ainetappiot ovat reilusti pienemmät. Gjölsjön (1995) tutkimuksessa tarkasteltiin palakoon vaikutusta rankahakkeen laadunmuutoksiin varastoinnin aikana. Thörnqvistin ja Jirjisin (1990) tutkimuksessa tutkittiin 7 m korkean auman laadunmuutoksia. Tutkimuksen hake oli hakkuutähteestä, jonka viherainemäärä on huomattavasti suurempi kuin rankahakkeen. Tämän takia kuiva-ainetappiot ovat myös suurempia.



Kuva 9. Aikaisempien tutkimusten kuiva-ainetappioita.

Koska työssä tutkitaan laadunmuutosta pitkäaikaisen varastoinnin yhteydessä, alkuvaiheen suurempi kuiva-ainehävikki on kaikissa varastoissa mukana. Tämän jälkeen kuiva-ainetappiot vähenevät. Gjösjön (1995) tutkimuksen pienemmän partikkelikoon hakkeen arvoja apuna käyttäen tehdään oletus, että kuiva-ainetappiot ovat 10 % alle vuoden ikäisellä hakkeella. Yli vuoden ikäisillä varastoilla kuiva-ainetappioiden oletetaan olevan 12 % ja yli kaksi vuotta varastoidulla hakkeella 13 %.

Oletuksen kuiva-ainetappioiden määrät ovat huomattavasti pienemmät kuin mitä Thörnqvist ja Jirjis (1990) esittävät omassa tutkimuksessaan metsähakkeelle, koska kyseessä on nyt rankahake. Jirjis, ja Lehtikangas (1998) esittävät huomattavasti pienempiä kuiva-ainetappiota, mutta heidän tutkimuksensa hakkeen alkukosteus oli huomattavasti alhaisempi.

Koska varastojen tarkkoja aumauspäiviä ei tunneta, alkuvaiheen kuiva-ainetappioiden arviointi on mahdotonta. Varastojen oletettiin olevan yli 6 kuukautta vanhoja, jolloin suurin osa kuiva-ainetappioista oli todennäköisesti tapahtunut. Oletus aiheuttaa virhettä nuorille varastoille, mutta tarkempien varastojen tietojen puuttumisen takia oletusta ei voida tarkentaa.

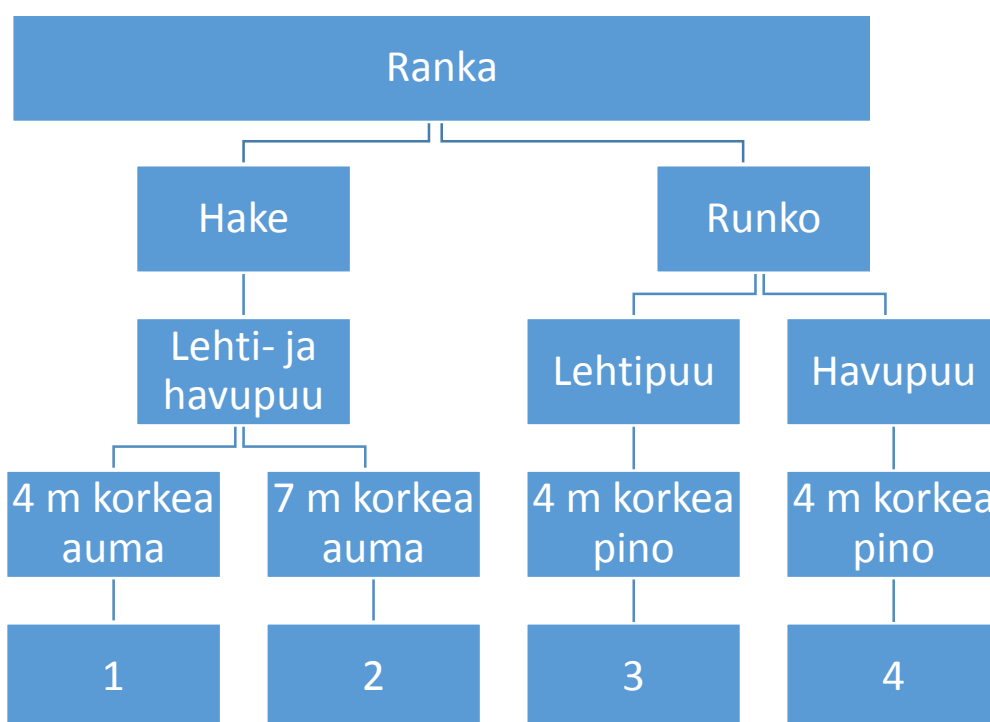
3 TUTKIMUSKOHTEET JA VARASTOT

3.1 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteita oli neljä, jotka jakautuivat varastointitavan, puulajin ja puun käsittelyn mukaan. Tutkimuskohteet olivat:

1. Haketettu ranka, 4 m korkeassa aumassa. Lehti- ja havupuu sekaisin.
2. Haketettu ranka, 7 m korkeassa aumassa. Lehti- ja havupuu sekaisin.
3. Hakettamaton ranka. 4 m korkeassa pinossa. Lehtipuu.
4. Hakettamaton ranka. 4 m korkeassa pinossa. Havupuu.

Tutkimuskohteisiin viitataan tässä työssä yllä olevilla numeroilla. Kuvassa 10 on hierarkkinen kuva tutkimuskohteista ja niiden eroavaisuuksista.



Kuva 10. Hierarkiakuva tutkimuskohteista.

Tutkimuskohteista haluttiin tietää polttoaineen laadunmuutos varastoinnin aikana. Tämän takia jokaisesta kohteesta otettiin eri-ikäisistä varastoista näytteitä. Varastointiaikaa tarkasteltiin kolmessa ikäluokassa; 1) alle vuoden, 2) yhdestä kahteen vuotta ja 3) yli kaksi vuotta varastoitu ranka tai hake. Tämä aika on ainoastaan terminaalivarastoinnin aika. Tämän lisäksi runkopuut ovat olleet tienvarsivarastossa tuntemattoman ajan.

Tutkimuskohteissa 1 ja 2 näytteet kerättiin hakkeena. Näistä kahdesta tutkimuskohteesta tarkasteltiin varaston korkeuden merkitystä hakkeen laatuun. Mittaukset suoritettiin kahdesta eri korkeudesta tutkimuskohteessa 1 ja kolmesta eri korkeudesta tutkimuskohteessa 2. Koko aumaa kuvaavan mittauksen vuoksi suoritettiin mittauksia neljässä eri pisteessä, joissa mitattiin 3 arvoa yhdestä korkeudesta. Mittauksien jälkeen kerättiin kokoomanäytteet neljästä pisteestä, joissa mittaukset suoritettiin. Yhteensä yhdestä korkeudesta mitattiin 12 arvoa ja kerättiin 4 kokoomanäytettä. Reunavaikutuksen välttämiseksi mittaukset suoritettiin vähintään puoli metriä auman reunoista. Koska tutkimuskohteessa 1 oli vain yhden ikäluokan hakeama ja tutkimuskohteessa 2 kahden ikäluokan, ikäluokkavertailu tehtiin yhdistämällä tutkimuskohteiden tulokset.

Tutkimuskohteissa 3 ja 4 kerättiin 8 kokoomanäytettä yhdestä varastosta. Yhdestä rangasta kerättiin kolme yksittäisnäytettä, jotka koottiin kokoomanäytteeksi. Rangat otettiin eri puolelta pinoa ja vähintään puoli metriä reunoista. Rangoista näytteet kerättiin kiekkoina, jotka pienennettiin kirveellä pienempään palakokoon.

Taulukossa 2 on kirjattu ylös eri tutkimuskohteista ja varastoista otettujen mittauksien ja näytteiden määrät. Kaikkiaan kerättiin 80 kokoomanäytettä, joista jokainen sisälsi 3 yksittäisnäytettä, joten kaikkiaan näytteitä kerättiin 240 eri pisteestä.

Taulukko 2. Suoritetujen mittauksien ja kerättyjen näytteiden määrät.

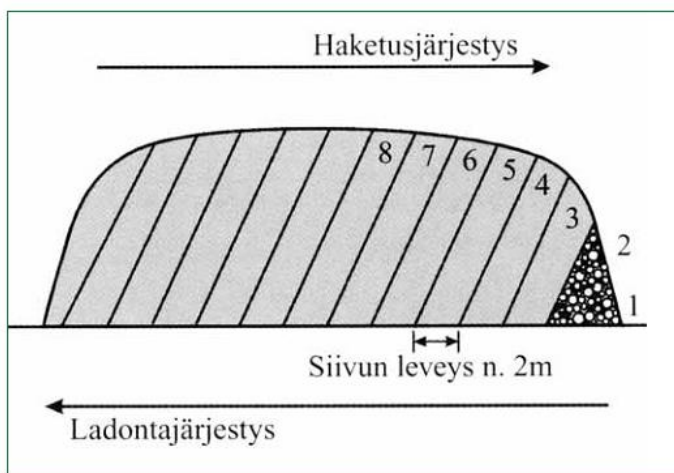
Varastointiaika	Tutkimuskohteesta näytteitä				Yhteensä
	1	2	3	4	
Tutkimuskohde					
< 1 vuoden	8	-	8	8	24
1-2 vuotta	-	12	8	8	28
> 2 vuotta	-	12	8	8	28
Pikakosteusmittauksia	-	-	72	72	144
Kosteusnäytteitä	8	24	12	13	57
Tuhkapitoisuusnäytteitä	1	2	2	2	7
Lämpöarvonäytteitä	8	24	6	6	44

3.2 Varastot

Näytteitä kerättiin neljältä eri terminaalilta. Terminaalit on esitetty kartalla kuvassa 1. Terminaaleissa oli useita eri varastopinoja, joista osa ei soveltunut tutkimuskohteisiin. Osa varastoista sopi jopa kahteen eri tutkimuskohteeseen. Tämä johtui rankapuupinoista, joihin oli lehti- ja havupuut pinottu sekaisin.

Rankapuun kohdalla varastossa oli vain yhden ikäluokan polttoainetta, mutta hakkeen tapauksessa yhdessä varastossa saattoi olla useampaa ikäluokkaa. Ikäluokat olivat eri kohdissa varastoa, joten reuna-alueen vaikutusta mittaustuloksiin pyrittiin estämään välttelemällä mittauksia reuna-alueella.

Rankapuupinoissa ikäluokka oli sama, vaikka puiden varastointiaika vaihteli varaston sisäisesti. Rankapuupinoa tarkastellessa arvioitiin, ettei pinon sisällä ollut liian suurta ikävaihtelua. Pinojen kokoaminen oli oletettavasti tehty kuvan 11 mukaisesti ja tämä auttoi rankojen iän arvioinnissa. Taulukossa 3 on esitelty työn kaikki varastot ja niiden tiedot.



Kuva 11. Rankapuun varastoinnin ja haketuksen järjestys. (Lepistö T. et al. 2010, 21)

Taulukko 3. Varastojen tiedot.

Nro.	Sijainti	GPS	Laji	Peitos	Korkeus	Ikäryhmä
1	Mikkeli Metsä-Sairila	61°40'01" N 27°22'51" E	Hake	Peittämätön	4 m	< 1
2	Mikkeli Metsä-Sairila	61°40'01" N 27°22'52" E	Ranka	Peitetty	4 m	< 1
3	Mikkeli Metsä-Sairila	61°40'01" N 27°22'54" E	Ranka	Peittämätön	4 m	< 1
4	Juva Kivikangas	61°57'10" N 27°48'41" E	Ranka	Peitetty	4 m	1-2
6	Ristiina Puuskakangas	61°32'02" N 27°09'56" E	Ranka	Peittämätön	5 m	> 2
8	Imatra Kurkvuori	61°15'19" N 27°53'35" E	Hake	Peittämätön	7 m	1-2
9	Imatra Kurkvuori	61°15'16" N 27°53'37" E	Hake	Peittämätön	7 m	>2

Kuten taulukoista 2 ja 3 voidaan huomata, tutkimuskohteessa 1 ei ole kuin yhtä ikäluokkaa. Toisaalta tutkimuskohteesta 2 puuttuu kyseinen ikäluokka. Molemmissa tapauksissa tutkitaan haketta ja erona on ainoastaan auman korkeus. Tuloksia oletettiin voitavan vertailla tutkimuskohteissa ristiin, ilman suurempia virheitä. Vertailussa huomioitiin varastojen sijainnin ja mittausajankohdan erot.

3.2.1 Kivikangas

Kivikankaan terminaali sijaitsee alle 10 kilometrin päässä Juvalta pohjoisen suuntaan. Kuvassa 1 terminaali on merkitty karttaan A kirjaimella. Terminaalista löytyi tutkimuskohteisiin 3 ja 4 soveltuvia varastoja. Varastosta mitattiin 1 – 2 vuotta varastoituja rankoja.

Kivikankaalla on useaa eri ikäluokkaa ja suuri määrä rankaa. Varastot ovat tutkimuksen suurimmat, jopa 200 m pitkiä ja 4 metriä korkeita pinoja. Rankojen pituus varastoissa on noin 4 metriä. Varastot on peitetty paperilla. Joissakin varastoissa oli jäänyt peite puoliväliin pinoa. Peite ei oletettavasti edistä, eikä hidasta rankojen kuivumista, joten sen vaikutusta ei huomioitu tutkimuksessa.

Tutkimuksessa käytetyt varastot olivat hyvin pinottuja. Pinot olivat aluspuiden päällä, tasaiset ja peitetty. Lumikerros pinojen päällä oli noin 10 cm. Mittauksien aikana oli huomattavissa lumen sulamista ja tämä aiheutti rangoissa uudelleenkastumista.

3.2.2 Metsä-Sairila

Metsä-Sairilan terminaali sijaitsee alle 10 kilometrin päässä Mikkelin keskustasta kaakon suuntaan. Kuvassa 1 Terminaali on merkitty karttaan B kirjaimella. Terminaalista löytyy tutkimuskohteeseen 1 soveltuva varasto ja tutkimuskohteisiin 3 ja 4 soveltuvia varastoja. Terminaali on asfaltoitu, jolloin vesi ei imeydy maahan. Asfaltoinnissa on kuitenkin hyvät kaadot, joiden mukana vesi valuu pois.

Tutkimuskohteen 1 varasto on yhtä ikäluokkaa, alle vuoden ikäistä. Auman korkeus on 4 metriä ja pituutta aumalla on 100 metriä. Aumasta on otettu haketta polttoon läntiseltä reunalta. Jo pelkästään silmämääräisesti huomaa hakkeen olevan kosteaa. Aumassa on selkeät kosteuskertymät.

Tutkimuskohteeseen 3 ja 4 soveltuvat varastot olivat rankapuupinoja. Tutkimuksessa käytettyjä varastoja oli kaksi kappaletta ja molemmat olivat n. 4 metriä korkeita ja 100 metriä pitkiä. Puiden pituus varastoissa oli 4 metriä.

Molemmat varastot olivat samankokoisia, mutta pinoamistyön jälki oli toisessa heikompi. Pinon reunasta rangat tulivat ulos metrin ja joskus jopa kaksi. Tämän lisäksi pinossa oli huomattava määrä oksia mukana. Varaston päältä puuttui myös peite. Peite olisi suojannut rankoja lumen sulamisen yhteydessä tapahtuvalta uudelleen kastumiselta. Lunta oli molempien pinojen päällä tutkimuksen alussa n. 20 cm. Paremmiin kasatussa pinossa oli peite ja hyvät aluspuut. Rangat oli pinottu tasaisesti niin, ettei yksittäisiä selkeästi ulkonevia rankoja ollut.

3.2.3 Puuskakangas

Puuskakankaan terminaali sijaitsee alle 10 kilometrin päässä Ristiinasta lännen suuntaan. Kuvassa 1 terminaali on merkitty karttaan C kirjaimella. Terminaalista oli tutkimuskohteisiin 3 ja 4 soveltuvia varastoja.

Puuskakankaan terminaalilla varastojen ikäluokka oli yli 2 vuotta. Puut oli varastoitu pinoihin, joiden pituus oli 70 metriä ja korkeus 5 metriä. Rangat olivat noin neljä metriä pitkiä. Terminaalilla käynnin yhteydessä havaittiin lumen sulavan reilusti auringon vaikutuksesta, jolloin rangat kastuivat uudelleen. Koska pinot olivat peittämättömiä, uudelleen kastumisen vaikutus oli suurempi.

3.2.4 Kurkvuori

Kurkvuoren terminaali sijaitsee noin 10 kilometrin päässä Imatran keskustasta koillisen suuntaan. Kuvassa 1 terminaali on merkitty karttaan D kirjaimella. Kurkvuoren terminaalissa oli tutkimuskohteen 2 varasto. Varastossa on karkea sorapohja, jolloin vesi pystyy imeytymään soran läpi maahan.

Varasto oli noin 7 m korkea auma, joka oli levinyt noin hehtaarin kokoiselle alueelle, kun haketta on purettu junista. Auman eri ikäluokkia edustavien osien reuna-alueita oli vaikea huomata, varsinkaan lumipeitteen alta. Näytteet otettiin paikoista, joista hakkeen iän alueella toimiva terminaaliyrittäjä kykeni luotettavasti arvioimaan.

Varastossa olleen auman reunan päällä oli n. 10 cm lumikerros ja tämän alla oli n. 50 cm kiinteäksi jäätyntä haketta. Vanhemman hakkeen puolella oli selkeä ja laaja alue märäksi kastunutta haketta. Vaikka ensimmäisten mittauksien aikana oli suojakeli, sillä ei oletettu olevan merkittävää vaikutusta. Suojakelin vaikutus mittaustuloksiin oli vähäistä, koska lumi ja jäätynyt hake suojasivat alapuolella olevaa haketta säävaikutuksilta.

Maaliskuussa lämpötilan nousu aiheutti jäätyneen hakkeen sulamisen. Sulanut hake nosti kosteuspitoisuutta hakkeessa, erityisesti korkeissa mittauspisteissä. Kuvassa 12 on selkeästi nähtävillä kosteuskertymä varjoisella alueella. Kosteuskertymä on ainakin koko näkyvän alueen levyinen, mutta ei näy yhtä selkeästi kuvan valoisassa kohdassa. Nuoremman hakkeen kohdalla kosteuskertymä ei ollut yhtä suuri, mutta oli havaittavissa auman ylärajassa.



Kuva 12. Kurkвуoren terminaalin hakeaman purkukohta. Kosteuskertymä näkyvissä selkeästi varjossa.

3.3 Ketju ilman varmuusvarastointia

Tutkimuksessa vertailtiin tuloksia toimitusketjuun, jossa ei ole terminaalivarastointia. Hakkeen kohdalla tämä tarkoittaa mittauksien suorittamista Venäjältä tulevasta hakkeesta suoraan kuljetuksista. Mittaukset suoritetaan samalla tavalla kuin tutkimuskohteissa 1 ja 2, mutta ilman varastointia terminaalivarastoon.

Rankapuilla tuloksia vertailtiin tienvarsivaraston mittauksiin. Tienvarsivaraston varastointi-ikä tunnettiin tarkasti. Varastolle suoritettiin mittaukset samalla tavalla kuin tutkimuskohteille 3 ja 4. Mittaukset suoritettiin varastoinnin loppuvaiheessa, jonka jälkeen rankapuut haketetatiin ja vietiin voimalaitokselle käyttöä varten.

4 MITTAUKSET

4.1 Yleistä

Mittauksia suoritettiin neljällä terminaalilla ja eri kertoina, jolloin sääolosuhteiden vaihtelun vaikutus tuli ottaa huomioon. Rankojen kohdalla vaikutus oli suurempi, koska näytteitä tarvitsi käsitellä jo mittauspaikalla. Hake ei ollut yhtä herkkä säälle, koska näytteitä ei tarvinnut esikäsitellä. Molemmissa tapauksissa mittauksien suorittaminen ja olosuhteet pyrittiin pitämään mahdollisimman yhtäläisinä. Tämä saavutetaan noudattamalla laadittua mittaamisohjetta. Jos mittaamisen yhteydessä huomattiin virheitä, ohjetta kehitettiin. Ohjeen avulla saatiin jokaisesta mittauspaikasta samat tiedot ja mittausvirheitä vähennettyä. Näytteidenotossa sovelletaan SFS-EN 14778 standardia.

4.1.1 Pikakosteusmittaukset

Kosteuspitoisuuksien mittaamiseen käytettiin GANN Hydromette M2050 -pikakosteusmittaria. Mittari ja kiinteän puun mittaamiseen tarkoitettu M18 mittapää on esitelty kuvassa 13 vasemmalla puolella. Oikealla puolella on hakkeen mittaamiseen tarkoitettu pistoelektrodi HS 500.



Kuva 13. Pikakosteusmittari Hydromette M 2050 sekä mittauspäät M18 kiinteänpuun mittaukseen (vasemmalla) ja HS 500 hakkeen mittaamiseen (oikealla). Mittalaitteet eivät ole mittakaavassa.

Hydromette M2050 -pikakosteusmittarissa on 250 eri puulajin kalibrointikäyrää ja siihen pystyy tallentamaan 3000 mittausta. Mittari pystyy mittaamaan puun kosteuspitoisuuden 4–100 % väliltä ja se kompensoi automaattisesti lämpötilan vaikutuksen. Mittariin kiinnitetty anturi vaikuttaa mittausalueeseen kalibrointikäyrän myötä. Koska käytettävissä mittapäissä ei ole lämpötilasensoria, joudutaan lämpötila syöttämään laitteeseen käsin. Mittaustulokset pystytään siirtämään suoraan tietokoneelle GANN dialog -ohjelman avulla. (GANN 2014, 36)

M18 -mittapäässä käytetään 45 mm pitkiä, suojattuja piikkejä. Suojatuilla piikeillä pinnan ja kuoren kosteus ei vaikuta mittaustuloksiin. Näillä piikeillä varustetun mittapään maksimi mittaussyvyys on 25 mm. Mittapäässä on iskuvasara, jolla pystytään upottamaan piikit mitattavaan puuhun. Mittapää pystyy mittaamaan maksimissaan 90 % kosteuspitoisuuden. (GANN 2014, 55)

Pistoelektrodi HS 500 käyttää 500 mm pitkiä piikkejä, jotka mittaavat kosteuden koko matkalta. Mittapäissä on tiivistekiekko, jolla haketta voidaan painaa mittauskohdasta kasaan. Koska mittapää mittaavat koko matkalta, pitää pinnan vaikutus mittaukseen huomioida. Tämän pystyy tekemään ottamalla 5–15 cm haketta pois mittauspisteestä ennen mittausta. Pistoelektrodilla pystyy enintään mittaamaan 58,5 % kosteuspitoisuuden, kun käytetään hakkeen yleiskalibrointikäyrää. (GANN 2014, 58)

Kiinteän puun näytteitä kerätessä käytettiin RYOBI ONE+ 18V akkukäyttöistä puukkosahaa. Tarvittaessa näytteitä pienennettiin kaarisahalla ja kirveellä. Hakkeen näytteenotossa käytettiin lapiota. Hakeaumasta poistettiin aluksi pyöräkuormaimen avulla pinta, jolloin näyte pystyttiin keräämään auman kyljestä ja pinta ei vaikuta mittaustuloksiin. Näytteiden massa mitataan näytteenotto paikalla koukkuva'alla. Kappaleen 4.4 kuvassa 16 on esitelty rankojen näytteiden keräämisen yhteydessä käytettyjä työkaluja.

4.2 Esivalmistelut

Näytteiden keräämiseen käytettävä välineistö tarkastettiin ennen keräämisen aloittamista. Tarkastus suoritettiin silmämääräisesti ja kokeilemalla, että laite toimii. Välineiden tuli olla puhtaita ja kuivia. Likaiset ja märät välineet puhdistettiin ja kuivattiin ennen näytteenoton aloittamista. Jos välineen toiminnassa ilmeni ongelmia, välinettä ei saanut käyttää. Tällöin välineelle suoritettiin korjaus mahdollisuuksien mukaan. Jos välinettä ei voitu korjata, sitä ei käytetty näytettä ottaessa.

Varastolle saavuttaessa suoritettiin silmämääräinen tarkastelu. Tarkastelussa katsottiin onko varasto peitetty, arvioitiin varaston korkeus ja leveys. Nämä tiedot kirjattiin ylös näytteiden keruulomakkeeseen. Lomakkeeseen merkittiin myös näytteiden ottoaika, ilman lämpötila, varaston koordinaatit, sijainti ja varaston numero. Jos varastolla oli mahdollisuus kastua uudelleen, esimerkiksi lumen sulamisen johdosta, merkittiin tämä ”huomioitavaa” -kohtaan.

4.3 Hakkeen mittaaminen

Hakenäytteitä kerätessä käytettiin kauhakuormainta hakkeen siirtelyyn, ja näytteet otettiin auman kyljestä, koska auman päälle kiipeäminen on kielletty turvallisuussyistä. Kauhakuormaimen avulla aumasta otettiin reunasta pois haluttu määrä haketta. Kuvassa 14 on esitelty kauhakuormaimella valmisteltu mittauspaikka. Mittauspisteestä mitattiin kolme arvoa jokaisesta mittauskorkeudesta. Näistä pisteitä poistettiin ylhäältä pudonnut irronnut hake ja lumi. Pinnasta poistettiin vielä 5–15 cm haketta ja tämän jälkeen mitattiin kosteus pikakosteusmittarilla. Merkityt tiedot olivat mittausnumero, korkeus josta hakkeen kosteuspitoisuus mitattiin ja mittauksen tulos. Tiedot kirjattiin kosteusmittauslomakkeeseen.



Kuva 14. Kauhakuormaimella valmisteltu mittauspaikka.

Mittauspaikassa jokaisesta mittauskorkeudesta otettiin kolme yksittäisnäytettä. Yksittäisnäytteet kerättiin näytepussiin kokoomanäytteeksi. Pussiin merkittiin näytteen keruupäivä, kerääjän nimi, paikka ja näytenumero. Samat tiedot ja näytteen paino sekä kosteusmittausta vastaava numero kirjattiin näytteiden keruulomakkeeseen. Kun kaikki näytteet oli kerätty, toimitettiin kokoomanäytteet LUT-Savon toimipisteeseen.

Työssä tutkitun hakkeen palakoko vaihteli reilusti. Osa hakkeesta oli murskattu pieneksi puruksi ja osa hakkeesta oli yli 10 cm pitkinä tikkuina. Suurin osa hakkeen palakoosta oli alle 3 cm, joten hakkeen näytteitä ei tarvinnut esikäsitellä uunikuivausta varten. Hakkeen kokoluokkaeroja pystyy havainnoimaan kuvasta 15. Kuvan hakkeet on käsin kerätty ja isoimmat ovat erityisesti kuvaa varten valittuja.



Kuva 15. Metsä-Sairilan hakkeen kokoluokka. Samaa kokoluokkaa oli muissakin hakevarastoissa. Neljä suurinta haketta valittiin käsin erityisesti kuvausta varten. Oikeassa alalaidassa on yleinen palakoko hakkeelle.

4.4 Rankapuiden mittaaminen

Rankapuusta näytteet kerättiin kiekkoina. Puut oli kasattu pinoihin, mikä teki näytteiden ottamisesta haastavaa. Pinosta valittiin rangat, joista haluttiin näytteitä. Nämä rangat vedettiin ulos pinosta. Koska rangat olivat keskellä pinoa, ulosveto aiheutti kuoreen kulutusta. Tämä kulutus oli vähäisiä eikä oletettavasti vaikuttanut mittauksiin. Suurempi vaikutus oli valitun rangan ominaisuuksilla. Rangan tuli edustaa mahdollisimman hyvin koko pinoa. Puun halkaisija ei saanut olla liian iso, eikä liian pieni. Valittu ranka ei myöskään saanut olla liian lähellä pinon päätä.

Kun valitut rangat oli vedetty ulos, mitattiin pikakosteusmittarilla kolmesta kohtaa kosteusarvo. Mittauskohdista on malli kuvassa 16, jossa näkyy myös mittauksissa käytetty välineistö. Punainen viiva merkitsee hyvää kohtaa suorittaa mittaus. Jos rangassa oli oksa tai jokin muu este mittauksen suorittamiseen halutusta kohtaa, mittaus suoritettiin mahdollisimman läheltä haluttua pistettä.



Kuva 16. Mittaus- ja näytteenottopiste yksittäisestä rangasta. Rangan edessä käytettävä välineistö mittauksissa ja näytteenotossa. (1.) Hydromette M2050 (2.) Koukkuvaaka (3) M18 -mittapää (4) Kaarisaha (5) Puukkosaha (6) Rullamitta (7) Näytepusseja (8) Kirves (9) Sidontaliina (10) Vasara (11) Tukkipihdit ja -koukku.

Rangasta otettiin näyte sahaamalla noin 3 cm paksuisia kiekkoja kohdista, joista pikakosteusmittaus suoritettiin. Yksi kiekko vastasi yksittäisnäytettä. Kiekot pilkottiin pienemmiksi, alle 5 cm partikkelikokoon, kirveen avulla. Yhdestä rangasta pilkottu kiekkojen pilke kerättiin näytepussiin kokoomanäytteeksi. Kokoomanäytteen tiedot kirjattiin samanlaisiin lomakkeisiin kuin hakkeella, ja kokoomanäytteet toimitettiin LUT-Savon toimipisteeseen.

4.5 Mittaamisen jälkeen

Kun kokoomanäytteet oli kerätty ja toimitettu LUT-Savon toimipisteeseen, ne joko varastoitiin tai käsiteltiin heti. Näytteet pyrittiin käsittelemään heti, jotta varastoinnin aiheuttamilta mittavirheiltä välttyttäisiin. Jos tämä ei ollut mahdollista, näytteet varastoitiin -19 °C lämpötilaan. Näytteiden esikäsittelyssä sovellettiin SFS-EN 14780 standardia.

4.5.1 Puupolttoaineen kosteuspitoisuus

Uunikuivausmenetelmä suoritettiin SFS-EN 14774 standardia soveltaen. Yleisnäytteestä otettiin yli 300 g suuruinen näyte, joka kuivattiin 105 °C:ssa lämpöisessä ilmakaapissa kuivausastiassa. Kuivumisaika oli yli 16 tuntia, mutta se ei saanut ylittää 24 tuntia. Kuivausastiat olivat folioastioita. Uunikuivausmenetelmän tuloksilla tarkistettiin pikakosteusmittarin toimivuus.

Ensimmäiseksi mitattiin kuivausastian paino vaa'alla, jonka tarkkuus on 0,1 g. Tämän jälkeen kostea näyte laitettiin kuivausastiaan. Kuivausastia näytteineen punnittiin ja laitettiin uuniin. Kun näyte oli kuivunut, punnittiin kuivausastia näytteineen kuumana. Näyte tuli punnita nopeasti, ettei ilmasta päässyt absorboitumaan kosteutta näytteeseen. Lämmön aiheuttama noste oletettiin vähäiseksi ja se jätettiin huomioimatta. Kun kuivatun näytteen massa tunnettiin, pystyttiin laskemaan kosteuspitoisuus yhtälön (1) mukaan: (Alakangas, E. 2000, 26–27)

$$M = \frac{m_w - m_d}{m_w} \times 100, \quad (1)$$

missä M kosteuspitoisuus

m_w kostean polttoaineen massa

m_d kuivan polttoaineen massa.

Kosteusanalyysi suoritettiin LUT-Savo:n toimipisteessä. Analyysissa käytettiin Termaks TS8000 -lämpökaappia. Lämpökaappi pystyy saavuttamaan 250 °C lämpötilan ja lämpötilan vaihtelu on ± 1 °C. Lämpökaapin sisätilavuus on 24 litraa ja 4 portaalisella säädöllä olevan tuulettimen ilmanvaihtuvuus on maksimissaan 11 kertaa tunnissa. Kuvassa 17 on esitetty mittauksissa käytetty lämpökaappi.



Kuva 17. Kosteuspitoisuuden määrittämiseen käytettävä Termaks TS8000 lämpökaappi.

4.5.2 Puupolttoaineen lämpöarvon määrittäminen

Lämpöarvon määrittäminen suoritettiin SFS-EN 14918 standardia soveltaen. Kuiva-aineen alempi lämpöarvo määritettiin pommikalorimetrillä. Mittaus suoritettiin ottamalla noin 1 g kuivaa näytettä, joka poltettiin nesteeseen upotetussa kalorimetripommissa happiatmosfäärissä, minkä jälkeen mitattiin vapautunut lämpö. Mittauksen jälkeen kalorimetrin ylempi lämpöarvo muutettiin kuiva-aineen alemmaksi ja saapumistilan lämpöarvoksi yhtälöiden (2) ja (3) avulla: (Alakangas, E. 2000, 27–30)

$$Q_{net,d} = Q_{gr,d} - U \times H, \quad (2)$$

missä $Q_{net,d}$ kuivan polttoaineen tehollinen eli alempi lämpöarvo

$Q_{gr,d}$ kuivan polttoaineen kalorimetrinen eli ylempi lämpöarvo

U veden höyrystymiseen kuluva lämpömäärä (+25 °C) = 0,02441 MJ/kg

H kuivan polttoaineen sisältämän vedyn palaessa muodostunut vesimäärä prosentteina

$$Q_{net,w} = Q_{net,d} \times \frac{100 - M}{100} - U \times M, \quad (3)$$

missä $Q_{net,w}$ kostean polttoaineen tehollinen eli saapumistilan lämpöarvo.

Tutkimuksessa oletettiin tutkittavien puupolttoaineiden vetypitoisuuden olevan 6 % (Alakangas, E. 2000, 36). Tällöin vedyn muodostama vesimäärä prosenteissa voidaan selvittää yhtälön (4) avulla:

$$H = 6 \% * \frac{M_{H_2O}}{M_H}, \quad (4)$$

missä M_{H_2O} veden moolimassa

M_H vedyn moolimassa.

Lämpöarvon määitykset suoritettiin MAMK:n tiloissa Parr 6200 -pommikalorimetrillä. Tutkittava näyte esikäsiteltiin IKA MF 10 -murskaimella. Tämän jälkeen murskatusta näytteestä puristettiin massaltaan noin 1 g pelletti. Kuvassa 18 on vasemmalla noin 1 g puristamatonta näytettä ja oikealla pelletiksi puristettu näyte. Pelletti asetettiin pommikalometriin ja mittaus suoritettiin. Mittauksen jälkeen tarkistettiin palamisen laatu ja pommikalorimetrin veden lämpötilan nousu. Tulos hylättiin, jos lämpötilan nousu oli liian alhainen tai näyte ei palanut täydellisesti. Yhdelle näytteelle suoritettiin 3 onnistunutta analyysia.



Kuva 18. Murskattu ja pelletiksi puristettu näyte.

Vaikka lämpöarvo määritettiin kuivatulle polttoaineelle, siihen oli voinut imeytyä kosteutta esikäsitteilyn ja varastoinnin aikana. Tämän takia osalle näytteille suoritettiin analyysikosteus SFS-EN 14774-3 standardia soveltaen. Saatua tulosta käytettiin korjaamaan ylempää lämpöarvoa yhtälön (3) avulla ja kaikissa näytteissä oletettiin tapahtuneen sama kosteudenmuutos, kuin mitatuissa näytteissä.

4.5.3 Puupolttoaineen tuhkapitoisuus

Tuhkapitoisuus määritettiin standardia SFS-EN 14775 soveltaen. Tuhkapitoisuus määritettiin rinnakkaismäärityksellä, eli näytteestä tehtiin kaksi määrittystä. Määrittys suoritettiin punnitsemalla noin 1 g kuivatua näytettä 0,1 mg tarkkuudella vaa'alla. Näyte laitettiin kylmään uuniin, jonka lämpötila nostettiin tasaisesti 550 °C. Näyte pidettiin tässä lämpötilassa 120 minuuttia. Tämän jälkeen näyte siirrettiin eksikaattoriin jäähtymään. Näytteen jäähtyttyä huoneenlämpötilaan, näyte punnittiin.

Uunissa näytteestä poistuu haihtuvat aineet ja palava kiintoaine palaa pois, jolloin jäljelle jäävät ainoastaan palamattomat aineet, eli tuhka. Tällöin tuhkapitoisuus voidaan selvittää yhtälön (5) mukaan. (Alakangas, E. 2000, 30–31)

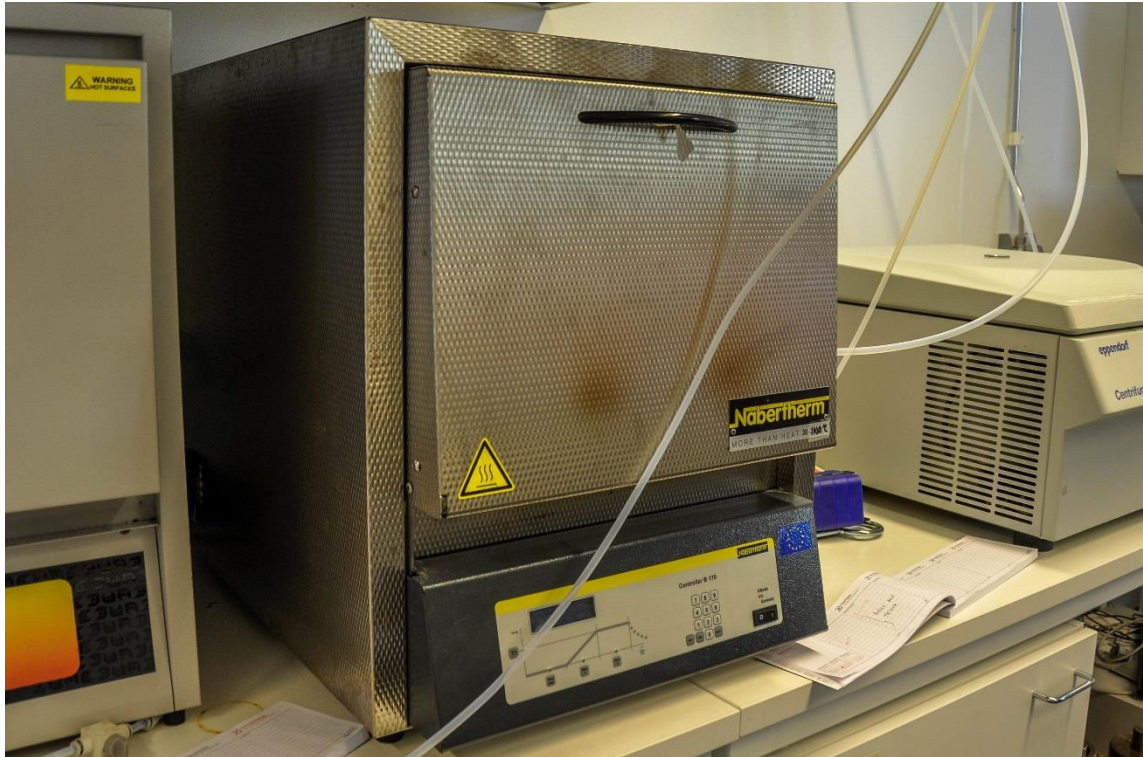
$$A_d = \frac{m_{ash}}{m_d} \times 100 \%, \quad (5)$$

missä A_d kuiva-aineen tuhkapitoisuus

m_d kuivan näytteen massa

m_{ash} polttojäännöksen massa.

Tuhkapitoisuus mittaukset suoritettiin LUT-Savo:n toimipisteessä ja mittauksissa käytettävä uuni oli Nabertherm L5/11, jolla pystytään saavuttamaan 1100 °C lämpötila 60 minuutissa. Uunin sisätilavuus on 5 litraa. Kuvassa 19 on mittauksissa käytetty uuni.



Kuva 19. Tuhkapitoisuuden määrittämiseksi käytetty Nabertherm L5/11 uuni.

4.5.4 Virhearviointi

Ennen lämpöarvoanalyysia suoritettiin pommikalorimetrin kalibrointi bentsoehapponapeilla. Saaduilla mittaustuloksilla määritettiin systemaattinen virhe yhtälön (6) mukaan, kun bentsoehapon lämpöarvo tunnetaan (Råde L. & Westergren B. 2004, 391):

$$E = \frac{|\bar{x} - \mu_c|}{\mu_c} \times 100 \%, \quad (6)$$

missä E systemaattinen virhe

\bar{x} tulosten keskiarvo

μ_c kalibrointiaineen todellinen lämpöarvo.

Mittausten suorittamisen jälkeen tuloksille tehtiin virhearviointi, jossa määritettiin mittaustulosten keskihajonta yhtälön (7) mukaan, sekä tulosten todellinen arvo 95 % luottamusvälillä t-jakauman mukaan yhtälön (8) avulla. (Råde L. & Westergren B. 2004, 435; 482).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (7)$$

missä s keskihajonta

x_i mittaustulos i

n mittauksien määrä

$$\mu = \bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

missä μ todellinen arvo

t t-jakauman luottamustasoa vastaava arvo.

5 TULOKSET

5.1 Hake

Tutkimuskohteiden 1 ja 2 tuloksissa ei ole ilmoitettu pikakosteusmittauksia, koska arvot eivät olleet vertailukelpoisia. Korkeudet ovat silmämääräisesti arvioituja puolen metrin tarkkuudella. Lämpöarvot on ilmoitettu kuivan polttoaineen tehollisena lämpöarvona. Lämpöarvon määrittämisessä käytettyjen näytteiden kosteuspitoisuus arviotiin määrittämällä analyysikosteus osasta näytteistä. Näiden näytteiden kosteuden keskiarvo oli 2,3 %, ja tämän oletettiin olevan sama kaikissa näytteissä. Kaikki analyysikosteuden tulokset on ilmoitettu liitteessä VII. Tutkimuskohteiden kaikki kosteuspitoisuuksien tulokset ja tiedot on ilmoitettu liitteissä I ja II. Lämpöarvomittauksien kaikki tulokset on ilmoitettu liitteissä VIII ja IX.

Taulukossa 4 on esitelty tutkimuskohteen 1 ja 2 tulokset.

Taulukko 4. Tutkimuskohteen 1 ja 2 tulokset.

Varasto	Ikä	Korkeus m	Näytemäärä	Kosteuspitoisuus %	Tehollinen lämpöarvo MJ/kg
1	< 1	1,5	4	38,71	18,58
1	< 1	2,5	4	51,85	18,54
1	< 1	4,0	0	-	-
8	1 – 2	1,5	4	34,58	18,70
8	1 – 2	2,5	4	44,56	18,55
8	1 – 2	4,0	4	54,16	18,79
9	> 2	1,5	4	29,68	18,71
9	> 2	2,5	4	49,56	18,78
9	> 2	4,0	4	63,06	18,31
KESKIARVO	-	-	-	45,94	18,61

Taulukossa 5 on ilmoitettu hakkeen vertailuun käytettävien arvojen kosteuspitoisuudet ja lämpöarvot. Arvot mitattiin Kurkivuoren terminaalilla junanvaunusta. JV 1 näyte mitattiin vaunun pohjalta ja JV 2, 3 ja 4 näytteet vaunun päältä. JV 5 ja 6 mitattiin vaunun viereen tehdystä hakeaumasta, joka oli 2,5 m korkea ja 3 metriä leveä. Taulukossa on myös ilmoitettu pikakosteusmittauksen tulokset, koska arvot ovat vertailukelpoisia.

Hakkeen tuhkapitoisuuksien keskiarvo oli 0,74 %. Kaikki tulokset tuhkapitoisuus-analyyseistä on ilmoitettu liitteessä VII.

Taulukko 5. Hakkeen vertailuarvot.

Näyte nro.	Pikakosteus	Kosteuspitoisuus	Tehollinen lämpöarvo
	%	%	MJ/kg
JV 1	48,8	44,61	19,21
JV 2	41,4	44,73	19,06
JV 3	44,0	46,16	19,23
JV 4	41,6	43,17	19,13
JV 5	Yli	46,1	19,11
JV 6	Yli	44,5	19,25
KESKIARVO	43,95	44,87	19,17

5.2 Ranka

Rankapuun tuloksissa kosteuspitoisuudet on ilmoitettu pikakosteusmittauksen ja uunikuivausmenetelmän tuloksina. Mittauksien kaikki kosteuspitoisuustulokset ja tiedot on ilmoitettu liitteissä III ja IV. Lämpöarvomittauksien tulokset on ilmoitettu liitteessä VIII.

Taulukossa 6 on esitelty tutkimuskohteen 3 ja taulukossa 8 tutkimuskohteen 4 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset. Taulukoissa 7 on ilmoitettu tutkimuskohteen 3 ja taulukossa 9 tutkimuskohteen 4 lämpöarvo- ja tuhka-analyysien tulokset.

Taulukko 6. Tutkimuskohteen 3 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset.

Puulaji	Ikä	Pikakosteusmittaukset			Pikakosteus Keskiarvo	Kosteus- pitoisuus
		Pääty	Keskikohta	Pääty		
Lehtipuu	< 1	34,19	34,29	36,48	34,98	33,01
Lehtipuu	1 – 2	27,03	26,07	25,64	26,25	22,12
Lehtipuu	> 2	22,83	23,61	23,74	23,40	19,88
KESKIARVO	KAIKKI	28,01	27,99	28,62	28,21	25,00

Taulukko 7. Tutkimuskohteen 3 lämpöarvoanalyysin tulokset.

Puulaji	Ikä	Ylempi lämpöarvo	Alempi lämpöarvo
		MJ/kg	MJ/kg
Lehtipuu	< 1	20,19	18,88
Lehtipuu	1 – 2	20,02	18,71
Lehtipuu	> 2	20,11	18,80
KESKIARVO	KAIKKI	20,13	18,82

Taulukko 8. Tutkimuskohteen 4 kosteuspitoisuus mittauksien tulokset.

Puulaji	Ikä	Pikakosteusmittaukset			Pikakosteus Keskiarvo	Kosteus- pitoisuus
		Pääty	Keskikohta	Pääty		
Havupuu	< 1	32,78	32,01	32,20	32,33	28,45
Havupuu	1 – 2	23,14	22,20	23,21	22,85	21,74
Havupuu	> 2	22,10	22,21	21,65	21,99	18,83
KESKIARVO	KAIKKI	26,00	25,48	25,69	25,72	23,01

Taulukko 9. Tutkimuskohteen 4 lämpöarvon tulokset.

Puulaji	Ikä	Ylempi lämpöarvo	Alempi lämpöarvo
		MJ/kg	MJ/kg
Havupuu	< 1	20,22	18,91
Havupuu	1 – 2	20,15	18,84
Havupuu	> 2	20,24	18,93
KESKIARVO	KAIKKI	20,21	18,90

Taulukossa 10 on esitelty tienvarsivarastosta suoritettujen kosteuspitoisuusmittauksien tulokset. Taulukossa 11 on ilmoitettu tienvarsivaraston lämpöarvoanalyysien tulokset.

Taulukko 10. Lehtipuiden tienvarsivaraston kosteuspitoisuus mittauksien tulokset.

Puulaji	Pikakosteusmittaukset			Pikakosteus Keskiarvo	Kosteuspitoisuus
	Pääty	Keskikohta	Pääty		
Lehtipuu	20,48	21,75	22,69	21,64	18,53
Havupuu	21,23	20,14	21,58	20,98	19,32

Taulukko 11. Tienvarsivaraston lämpöarvoanalyysien tulokset.

Puulaji	Ylempi lämpöarvo	Alempi lämpöarvo
	MJ/kg	MJ/kg
Lehtipuu	20,16	18,85
Havupuu	20,27	18,96

Rankojen tuhkapitoisuuksien keskiarvo oli 0,85 %. Kaikki tulokset tuhkapitoisuusanalyysistä on ilmoitettu liitteessä VII.

5.3 Virhearviointi

Näytteiden ja mittausten vähäinen määrä suhteessa varastojen kokoon aiheuttaa tuloksissa epävarmuutta. Tutkittavat varastot olivat suurikokoisia, ja varsinkin rankojen kohdalla näytteiden saaminen oli haastavaa. Näytteet pyrittiin keräämään eripuolelta varastoa, mutta tämä ei ollut aina mahdollista. Näytteiden vähäisen määrän takia näytteet eivät kuvaa täydellisesti koko varastoa.

Hakkeen kosteuspitoisuuksissa suurin keskihajonta oli 2,5 m korkeuden tuloksissa. Rankapuulla suurin keskihajonta oli alle vuoden tuloksissa. Liitteessä VI on esitelty kaikkien tutkimuskohteiden keskihajonnat ja t-jakauman 95 % luottamusvälit.

Mittaustulos 4/3 poistettiin virhearviosta ja tulosten tarkastelusta, koska ranka oli laho. Vain kaksi pikakosteusmittausta pystyttiin tekemään, kun ranka katkesi ulosvedon aikana. Mittaustulos 6/1 otettiin myös pois, koska arvo poikkesi merkittävästi verrattuna muihin arvoihin. Ranka oli pinossa hyvin väljästi ja ulkoni pinosta reilusti, jolloin ranka oli mahdollisesti altistunut suuremmalle uudelleenkastumiselle.

Lämpöarvoanalyysia tehdessä katsottiin, että näytteen tuloksien tarkkuus oli alle $\pm 0,5$ MJ/kg 99 % luottamusvälillä. Lämpöarvojen tarkkuuden ollessa tällä tasolla, kosteuden epävarmuudella on huomattavasti suurempi merkitys saapumistilan lämpöarvoon.

5.3.1 Mittarien aiheuttama virhe

Hakkeen mittaamiseen käytetty anturi, HS 500, osoittautui toimimattomaksi aumasta mitattaessa. Mittari ilmoitti auman kosteuden usein yli mittausrajan. Tämä oletettavasti johtui hakkeen tiiviystä, koska junanvaunusta näytteitä mitatessa arvot olivat hyviä. Junanvaunussa ollut hake ei ollut yhtä tiiviisti pakkautunut kuin aumassa ollut. Junanvaunun vierestä pienestä hakeaumasta mitatut JV 6 ja 7 pikakosteusmittauksen arvot olivat myös yli mittausrajan, vaikka hakkeen uunikuivausmenetelmän tulos oli samassa tasossa kuin muissa junanvaunun näytteissä.

Hakkeen mittaaminen pikakosteusmittarilla mahdollistaisi useiden kosteusmittauksien suorittamisen nopeasti. Näytteiden kerääminen ja uunikuivausmenetelmä vaativat pitkän ajan ja raskaita työkoneita kosteuspitoisuuden määrittämisessä. Tämän vuoksi Hydromette M2050 -pikakosteusmittarin soveltuvuutta hakkeen kosteuspitoisuuden mittaamiseen olisi hyvä tutkia. Junanvaunusta mitatut tulokset osoittavat mittarin antamien arvojen olevan luotettavia, mutta aumasta mitatut tulokset taas osoittavat mittarin toimimattomaksi.

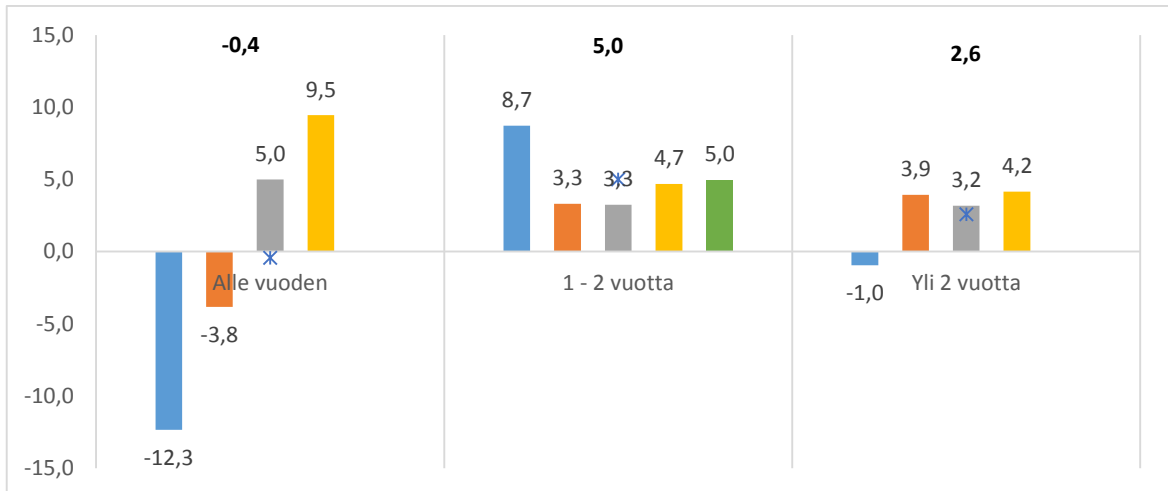
Hydromette M2050 -mittarin tarkkuus valmistajan mukaan oikein mitattuna on $\pm 0,5$ prosenttiyksikköä (GANN 2014, 92). VTT:n tutkimuksen mukaan sähkövastuseriaatteella toimivien pikakosteusmittarien tarkkuus laboratorio-olosuhteissa on 1,5–2,5 %, kun teollisuuskäytössä mittarien tarkkuus oli 2,0–5,0 % (Forsén H. & Tarviainen V. 2000, 77). Tämän lisäksi mittarin tarkkuuteen vaikuttaa mittauksen suorituksessa tapahtuneet virheet ja lämpötilan kompensointi.

Mittarin lämpötilakompensointi tehtiin ulkolämpötilalla. Rangan lämpötila voi poiketa tästä, koska mittaukset yleensä suoritettiin vähän ennen keskipäivää, jolloin ulkolämpötila on noussut yön lämpötilasta. Rangassa lämpötilan muutos tapahtuu hitaammin ja tällöin lämpötila on ulkolämpötilaa alhaisempi. Väärän lämpötilan kompensointi aiheuttaa noin 0,1–0,15 prosenttiyksikön virheen jokaiselta väärältä asteelta (Forsén H. & Tarviainen V. 2000, 29). Arvioitu lämpötilaero aiheuttaa alle prosenttiyksikön virheen tuloksissa.

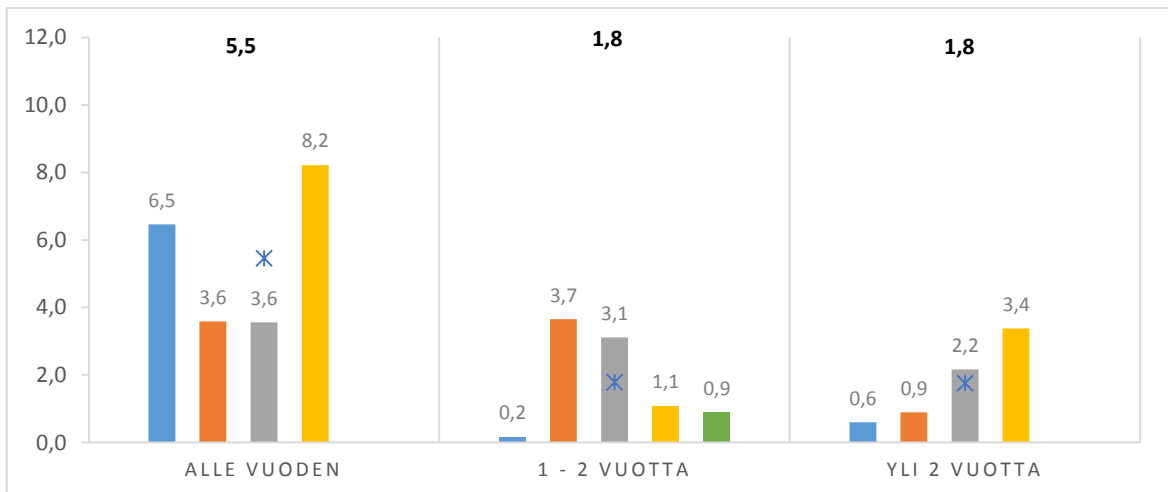
Pikakosteusmittari mittaa kosteuden ainoastaan mittauspisteen välistä. Koska mittaukset suoritettiin rangassa vain kolmesta paikasta, tulokset eivät kuvaa rangassa kosteutta täydellisesti. Koska kosteus mitataan kahdesta päädyistä ja keskeltä, päätyjen kosteus on hallitsemampi keskiarvossa. Päädyn ja keskikohdan kosteuden ero ei ole suuri, jolloin tämän virheen vaikutus on vähäinen. Syvyysuunnassa oli vain yksi mittaus, jolloin syvyysuunnassa tapahtunut kosteuden vaihtelu rangassa on tuntematon. Mitattavien rankojen paksuus oli alle 10 cm, jolloin syvyysuunnassa kosteuden vaihtelu oletettiin vähäiseksi.

Kuvissa 20 ja 21 ilmoitettu tutkimuskohteiden 3 ja 4 pikakosteusmittauksien ja uunikuivausmenetelmän tulosten ero. Kuvasta voidaan todeta mittarin olevan luotettava. Yksittäisissä mittauksissa tulosten ero vaihteli alle prosenttiyksiköstä jopa yli 10 prosenttiyksikköön. Suurimmat erot syntyivät rangoissa, jotka olivat lahoja.

Pikakosteusmittarin tulos on luotettavampi, kun mitataan alhaisempia kosteuspitoisuuksia. Havupuiden mittauksien tuloksissa on pienempi erotus kuin lehtipuiden. Tämä johtuu mittarin kalibrointikäyrien lajiasetuksista. Osa puulajeista oli hankalasti tunnistettavissa, jolloin mittariin asetettu kalibrointikäyrä saattoi olla väärä. Mittarissa on 7 eri kalibrointikäyrää koivun eri lajeille, ja kuivunut haapa on helppo sekoittaa leppään.



Kuva 20. Tutkimuskohteen 3 pikakosteusmittauksen ja uunikuivausmenetelmän tulosten erot. Sarjojen keskiarvo on merkitty tähdellä ja arvo on kirjoitettu ylös sarjan keskelle.



Kuva 21. Tutkimuskohteen 4 pikakosteusmittauksen ja uunikuivausmenetelmän tulosten erot. Sarjojen keskiarvo on merkitty tähdellä ja arvo on kirjoitettu ylös sarjan keskelle.

Kuvista voidaan todeta pikakosteusmittarin antavan systemaattisesti korkeampia tuloksia kuin uunikuivausmenetelmän. Varsinkin kuivilla lehtipuilla arvot ovat korkeampia pikakosteusmittarilla mitattuna. Mittarin luotettavuutta pystyttäisiin parantamaan tarkemmalla käytöllä ja mitattavan puun lajin tunnistamisella.

Kuvassa 21 alle vuoden vanhassa sarjassa kaksi negatiivista arvoa ovat ensimmäisiä mittauksia. Näiden yhteydessä näytteet sahattiin ilman alussuojaa, jolloin ne joutuivat kosketukseen lumen kanssa. 1–2 vuotta vanhoissa oleva 8,7 prosenttiyksikön erotus on mittaustuloksesta 4/3. Tämä on laho koivu, joka katkesi ulosvedon aikana. Ilman tätä arvoa sarjan keskiarvo olisi 4,0 prosenttiyksikköä.

Toinen suuren poikkeaman tuloksissa aiheuttanut mittaustulos 6/1 on kuvassa yli 2 vuotta -sarjassa ja pikakosteusmittauksen ja uunikuivauksen erotus on -1,0 prosenttiyksikköä. Ilman tätä arvoa sarjan keskiarvo olisi 3,8 prosenttiyksikköä.

Lämpöarvon määrittämisen yhteydessä tarkasteltiin analyysin systemaattista virhettä suorittamalla mittaus bentsoehapponapeilla, jonka lämpöarvo tunnettiin. Analyysin systemaattinen virhe laskettiin yhtälön (5) mukaan. Systemaattinen virhe lämpöarvoanalyysille oli 0,05 %.

5.3.2 Sääolosuhteet

Mittaukset aloitettiin tammikuun lopussa, jolloin ulkolämpötila oli reilusti pakkasen puolella. Lunta oli varastosta riippuen 20–50 cm varaston päällä. Ulkolämpötila nousi yli 0 °C:n helmikuun aikana aiheuttaen suojakelin. Tämän jälkeen lämpötila jatkoi nousemista ja maaliskuun alussa kaikki lumi oli sulanut varastojen päältä. Lämpötilan nousu aiheutti myös hakeaman päälle jääntyneen kerroksen sulamista, joka on havaittavissa auman kosteuden nousuna, erityisesti 4 m metrin korkeudessa. Tutkimuskohteen 1 kaikki mittaukset oli suoritettu ennen sään lämpiämistä, joten tämä ei vaikuttanut tuloksiin.

Lumen sulaminen aiheuttaa varastojen uudelleen kastumista. Uudelleenkastumisen tarkkaa laajuutta ei pystytty selvittämään. Oletuksena oli, että uudelleen kastuminen oli vähäistä. Koska tutkimuksessa keskityttiin pitkäaikaiseen varastointiin, ei lumen sulamisesta aiheutunutta uudelleenkastumista otettu huomioon tuloksissa.

Pitkällä aikavälillä sää on ollut tavanomaista lämpimämpi. Vuosi 2014 oli Ilmatieteen laitoksen mittaushistorian toiseksi lämpimin, ja sademäärät olivat tavanomaiset (Ilmatieteen laitos, 2015). Koska lämpimät jaksot ajoittuivat pääasiassa kesäkuukausille, sää oli suotuista rankojen kuivumiselle. Tämä vaikuttaa suuresti rankojen tuloksiin, koska kaikki rangat ovat olleet erinomaisessa kuivumisoloissa vuoden ennen mittauksia.

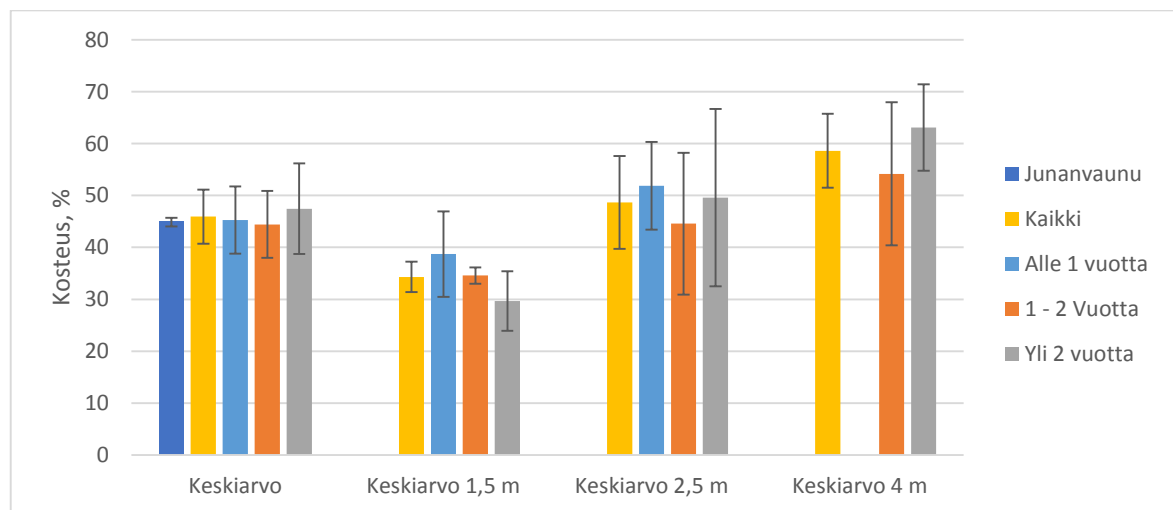
Vuonna 2013 sää oli tavanomaista sateisempi Keski-Suomessa ja hieman keskiarvoa lämpimämpi koko maassa. Vuosi 2012 oli usealla Ilmatieteen laitoksen havainto-asemalla sateisin viimeisen 50 vuoden aikana. Keskilämpötila oli tavanomainen. Tämä tarkoittaa yli 2 vuoden varastojen, erityisesti hakkeen, altistuneen uudelleenkastumiselle. (Ilmatieteen laitos, 2015)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Kosteuspitoisuus

Kuvan 22 perusteella voidaan todeta, ettei hakkeella tapahdu keskimäärin kuivumista varaston iän noustessa. Hakkeen kosteuden keskiarvo oli aumassa samaa luokkaa kuin junanvaunusta mitattu. Hake kuivuu eniten auman alaosassa. Pidemmällä varastointiajoilla hake kuivuu alaosassa itsestään lämpiämisen takia ja kosteus siirtyy alhaalta ylös, jolloin vastaavasti ylempänä oleva materiaali tulee kosteammaksi. Tämän lisäksi pinta kostuu myös sateen vaikutuksesta. Varaston korkeus ei vaikuta sään aiheuttamaan kostumisen määrään, joten korkeammassa varastossa suurempi määrä haketta on sisäosissa suojassa sään aiheuttamalta uudelleenkastumiselta. Tämä kannustaa hakkeen varastointiin korkeammassa aumoissa.

Hakkeen kosteuspitoisuuden mittaamiseen käytetty HS 500 -anturin käyttöön tulisi tutustua tarkemmin ja toimivuus tarvitsisi tarkempaa tutkimusta, jotta mittarin luotettavuus olisi riittävä tutkimukseen.

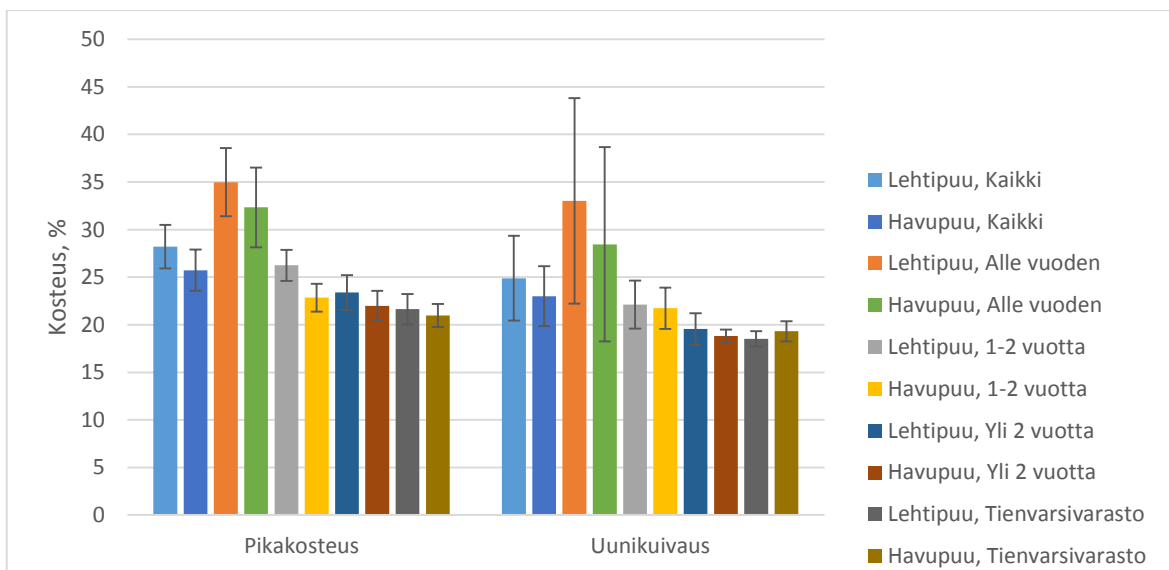


Kuva 22. Hakkeen kosteuspitoisuuksia auman eri korkeuksissa maan pinnasta mitattuna.

Kuvaan merkitty 95 % t-jakauman luottamusväli on pienempi auman alaosassa. Tämä johtuu tasaisemmista tuloksista hakeauman alaosassa. 2,5 m korkeudessa osissa mittauksissa kosteus oli alle 30 % ja osissa yli 50 %. Tämä vaihtelu johtuu kosteuskertymistä. Välillä kosteuskertymä ulottui 2,5 m korkeuteen ja välillä se ei yltänyt edes 4 m korkeuteen. Kosteuskertymä yleensä asettui auman pinnan matalimpiin paikkoihin, johon lumi ja vesi valuivat.

Jotta käyttöön saataisiin mahdollisimman kuivaa haketta, tulisi hake kerätä auman alaosasta. Auman pinnalla oleva hake tulisi kuivata tai sekoittaa huomattavasti kuivempaan hakkeeseen ennen käyttöä. Auman olisi hyvä olla mahdollisimman korkea, jotta sään vaikutus jäisi mahdollisimman pieneksi. Hakkeen varastointi kuivaamistarkoituksessa ei ole järkevää.

Rangan kosteuspitoisuusmittauksien tuloksista pystytään havaitsemaan rankojen kuivumisen jatkuvan vielä 2 vuoden terminaalivarastoinnin jälkeen. Kuvassa 23 on rankojen pikakosteusmittauksien ja uunikuivauksen keskiarvotuloksia. Tuloksista havaitaan kuivumisen hidastuvan 1–2 vuoden varastoinnin jälkeen. Rankojen kosteuspitoisuus on pudonnut jo alle vuoden ikäluokassa alle 40 %:n. On hyvä huomioida, että kaikki rangat ovat olleet kuivumassa vuoden 2014 kesän, joka oli keskimääräistä parempi kuivumisolosuhteiltaan. (Ilmatieteenlaitos, 2015). Tämän lisäksi rangat ovat olleet tunteuttoman ajan tienvarsivarastossa. Kuvaan on merkitty 95 % t-jakauman luottamusväli. Luottamusväli on suurempi uunikuivauksissa, koska tuloksia on vähemmän.



Kuva 23. Rankojen pikakosteusmittauksien ja uunikuivausanalyysien tulokset.

Pikakosteusmittarin virhearvioinnista voimme todeta lehtipuun pikakosteusmittauksen olevan epätarkempi kuin havupuiden. Yksi syy tähän on mittausten aikana huomattavat lahot rangat, jotka olivat pääsääntöisesti lehtipuita.

Nuoremmassa rankapuuvarastoissa kosteuden vaihtelu on suurempaa, koska varaston kosteus ei ole tasaantunut. Pidemmän varastoinnin aikana varaston kosteus tasaantuu koko

varastossa samaan tasoon. Tämä tekee vanhempien varastojen tuloksien hajonnasta pienemmän.

Tienvarsivaraston kosteudet ovat pienimmät, vaikka varaston ikä oli 234 päivää. Tienvarsivaraston nopeamman kuivumisen aiheuttajaa ei pystytä selvittämään, koska varastoinnin aikaisia olosuhteita ei tunneta tarpeeksi tarkasti.

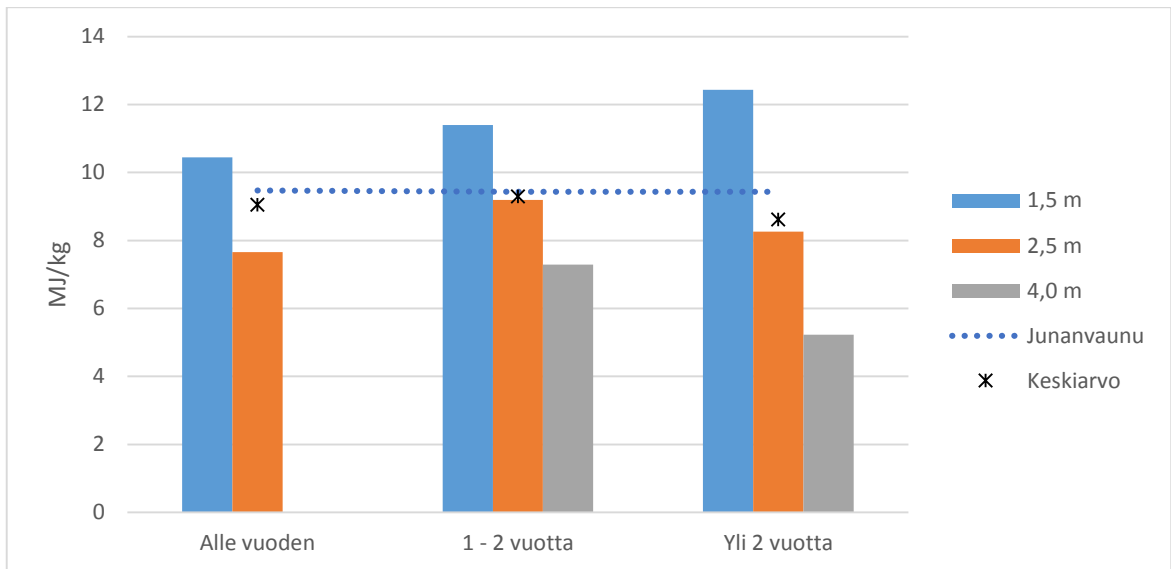
Tutkimus osoittaa rankojen kuivattamisen terminaalivarastossa mahdolliseksi. Rankojen kosteuspitoisuudet putosivat tasaisesti kaikilla puulajeilla varastoinnin aikana. Yli vuoden varastoinnin jälkeen rankojen kosteuspitoisuudet ovat pudonneet alle 30 %:n ja yli 2 vuoden varastoinnin jälkeen kosteuspitoisuudet ovat alle 25 %:n.

Tuloksista voidaan todeta pikakosteusmittarin toimivan luotettavasti, kun mittauksia on riittävä määrä. Koska pikakosteusmittari on huomattavasti helpompi ja nopeampi käyttää, kuin kerätä näytteitä laboratoriotutkimukseen, on sen käyttö järkevää silloin kun mittauksia on paljon.

6.2 Lämpöarvo

Hakkeella kuivan polttoaineen lämpöarvo ei muutu varastoinnin aikana merkittävästi. Aikaisempien tutkimusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että hakkeella tapahtuu merkittävästi kuiva-ainetappioita. Tätä ei kuitenkaan havaita lämpöarvon tuloksista, joten mikrobiologinen toiminta ei näyttäisi vaikuttavan lämpöarvoon.

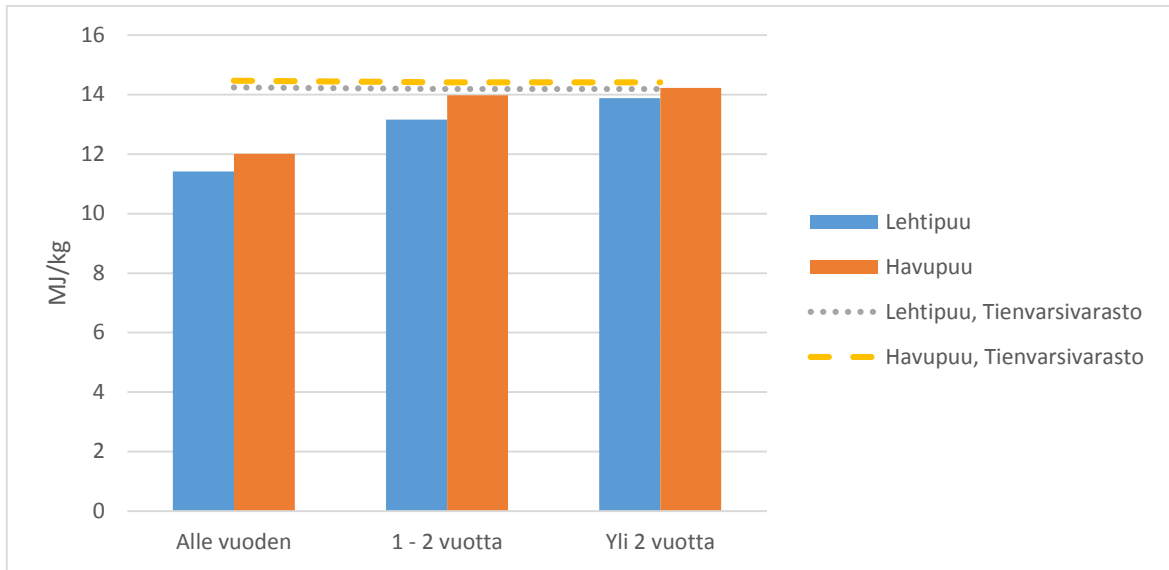
Kuvassa 24 on esitelty polttoaineen saapumistilan lämpöarvon muutos varastointiajan mukaan. Koska lämpöarvo tai kosteus ei muuttunut varastoinnin aikana, saapumistilan lämpöarvo ei muutu varastointiajan mukana. Suurin muutos tapahtuu varastointikorkeuden muuttuessa. Kuvassa ei ole huomioitu kuiva-ainetappioiden aiheuttamaa massahäviön vaikutusta eikä kosteusmittauksien virhearviointia.



Kuva 24. Hakkeen saapumistilan lämpöarvot eri auman korkeuksilta maan pinnasta mitattuna.

Rangan varastoinnin aikana ei myöskään tapahtunut lämpöarvon vaihtelua. Toisin kuin hakkeella, rangan kosteuspitoisuus putoaa, jolloin polttoaineen saapumistilan lämpöarvo kasvaa.

Kuvassa 25 on esitelty eri varastointiajan jälkeiset saapumistilan lämpöarvot rangoille. Saapumistilan lämpöarvon laskemisessa on käytetty pikakosteusmittarin tuloksia. Kuvasta voidaan todeta lämpöarvon nousevan 14 MJ/kg, kun rankoja varastoidaan yli 2 vuotta. Tämä on 2 MJ/kg korkeampi kuin alle vuoden rankojen saapumistilan lämpöarvo. Koska kuiva-ainetappiot oletetaan rangalla vähäisiksi, ei rangoilla tapahdu merkittäviä massahäviöitä varastoinnin aikana. Kuvassa ei ole huomioitu kosteuden virhearviointia.



Kuva 25. Rankojen saapumistilan lämpöarvot.

Lämpöarvojen tuloksista voidaan todeta kuivan polttoaineen lämpöarvon pysyvän vakiona varastointiajan suhteen. Tämän takia polttoaineen tarkka lämpöarvon tunteminen terminaalivarastoinnissa ei ole yhtä tärkeää, kuin polttoaineen kosteuspitoisuuksien tunteminen.

6.3 Kuiva-ainetappiot

Hakkeen lämpöarvossa ei tapahdu merkittäviä muutoksia varastoinnin aikana. Tästä voidaan päätellä, että mikrobiologinen toiminta ei vaikuta lämpöarvoon. Kuiva-ainetappiot vaikuttavat varastoitavan hakkeen massaun, jolloin energiaa häviää varastosta. Taulukossa 12 on oletetuilla kuiva-ainetappiolla tapahtuvat energiahäviöt.

Taulukko 12. Kuiva-ainetappioiden aiheuttamat energiahäviöt.

Ikä	Alempi-lämpöarvo MJ/kg	Kuiva-ainetappiot	Energia häviö (kuivasta) MJ/kg
< 1	18,56	10 %	1,86
1 - 2	18,68	12 %	2,24
> 2	18,60	13 %	2,42

Hakkeen varastointiajan kasvaessa energiaa häviää kuiva-ainetappioiden vuoksi. Tämän takia hakkeen varastointi tulisi pitää mahdollisimman lyhyenä, tappioiden minimoimiseksi.

Rankapuulla todetut kuiva-ainetappiot olivat vähäisiä ja esiintyivät pääasiassa rankojen päissä ja kuoressa. Mittauksien yhteydessä havaittiin muutama lahonnut ranka. Nämä olivat pääsääntöisesti lajiltaan koivuja. Rangan lahoamiseen eniten vaikuttaa varaston pinoamisen laatu. Hyvälaatuisessa varastossa rangat kuivuvat nopeammin, jolloin lahoaminen vähenee. Myös rangan kuoren ollessa ehjä, lahoaminen on todennäköisempää, kun kosteus ei pääse rangan sisältä haihtumaan. Havupuut vaikuttavat kestävän varastointia paremmin kuin lehtipuut.

Kuvassa 26 on yli 2 vuotta varastoidun kuusirangan poikkileikkaus. Leikatusta rangasta poistettiin 5 cm palanen päädystä. Kuvasta huomataan puun olevan terve sisältä, vaikka reunassa voi erottaa sammalkasvustoa. Useassa alle vuoden varastoidussa rangassa oli hometta kuoren pinnassa, mutta puu oli tervettä sisältä. Vanhemmissa rangoissa hometta havaittiin vähemmän. Tämä tukee oletusta, että rankojen kuiva-ainetappiot ovat vähäisiä.



Kuva 26. Yli 2 vuotta terminaalissa varastoidun kuusen poikkileikkaus.

Näytteiden tuhkapitoisuudet olivat alhaisia, alle 1,5 %. Analyysien vähyyden vuoksi, tuloksista ei pystytä päättelemään palamattomien aineiden määrän muutosta varastointiajan suhteen.

7 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin polttoaineterminaalissa varastoitavan puupolttoaineen laadun muutoksia pitkän aikavälin varastosijoituksessa. Tutkimusaineisto kerättiin ESE:n neljästä polttoaineterminaalista. Tutkimuksessa oli neljä eri tutkimuskohdetta: 4 m korkeaan aumaan varastoitu hake, 7 m korkeaan aumaan varastoitu hake, hakettamaton lehtipuurunka ja hakettamaton havupuurunka.

Tutkimuksessa keskityttiin kosteuden ja lämpöarvon muutoksiin varastoinnin aikana. Kuiva-ainetappiot arvioitiin silmämääräisesti ja aikaisempien tutkimusten perusteella. Kosteuspitoisuudet mitattiin hakettamattomasta rangasta Hydromette M2050 -pikakosteusmittarilla. Pikakosteusmittarin toimivuuden varmistamiseksi osalle näytteistä suoritettiin kosteusanalyysi uunikuivausmenetelmällä. Mittaustuloksista todettiin pikakosteusmittarin toimivan riittävällä luotettavuustasolla rankapuiden mittauksissa. Hakkeen mittauksissa huomattiin pikakosteusmittari toimimattomaksi, joten hakkeen kosteuspitoisuudet arvioitiin pelkästään uunikuivausmenetelmällä. Lämpöarvot määritettiin MAMK:n tiloissa pommikalorimetrillä.

Tutkimuksen tuloksista pystyttiin toteamaan hakkeen kosteuden pysyvän suhteellisen samana varastointiajan kasvaessa. Rangoilla kosteus putosi vielä kahden vuoden terminaalivarastoinnin jälkeen. Rankojen kosteus oli laskenut alle 40 %:iin jo alle vuoden terminaalivarastoinnin jälkeen. Yli kahden vuoden terminaalivarastoinnin jälkeen kosteuspitoisuus oli pudonnut alle 25 %:iin, niin lehti- kuin havupuissa.

Tutkimuksessa näytteiden lämpöarvot olivat samantasoisia, noin 18,8 MJ/kg. Tästä voitiin todeta, ettei varastointiaika vaikuta puun energiamäärään. Rangalla kuiva-ainetappiot oletettiin vähäisiksi, joten varastoinnin aikana energiatiheys kasvaa, kun kosteuspitoisuus tippuu. Hakkeella kuiva-ainetappiota oletettiin tapahtuvan, joten polttoainevaraston energiamäärä pieneni.

Varmuusvarastoinnissa on mahdollista varastoida suuria polttoainemääriä hakettamattomana rankana. Koska rangat tulee hakettaa ennen voimalaitoskäyttöä, haketta on varastoitava nopeaa polttoainetarvetta varten. Hakkeen varastointiaika olisi hyvä pitää mahdollisimman lyhyenä, koska hakevaraston energiamäärä pienenee varastointiajan myötä.

LÄHTEET

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Otamedia Oy. 2000. 172 s. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 2045. ISBN 951-38-5699-2, ISSN 1235-0605.

Alakangas, E. Impola, R. Eskelinen, M. Fredriksson, T. Hurskainen, J. Lehtovaara, J. Järvenpää, J. Lahti, J. Kurki-Suonio, K. Nylén, J. Pulkkinen, J. Rannila, K. Ruuska, P. Sulasalmi, J. Albrecht, N. Tenhovirta, M. Valtanen, J. Vartiamäki, T. Voutilainen, M. 2014. Puupolttoaineiden laatuohje - päivitys 2014. Bioenergia ry; Energiateollisuus ry; Metsäteollisuus ry. 66 s. VTT-M-07608-13

Aluehallintovirasto. 2014. Pursialan voimalaitoksen lupamääräysten tarkistaminen. Päätös 8/2014/1. Mikkeli. 28 s.

Erber, G. Routa, J. Kolström, M. Kanzian, C. Sikanen, L. & Stampfer, K. 2014. Comparing two different approaches in modelling small diameter energy wood drying in logwood piles. Croatian Journal of Forest Engineering 35(1): 15–22 s.

Eriksson, A. 2011. Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and power plants. Examensarbete. SLU. Uppsala. 102 s.

ESE. 2014a. Etelä-Savon Energia Oy, Esittelykalvot 2013. Mikkeli. 62 s.

ESE. 2014b. Etelä-Savon Energia Oy, Vuosikertomus 2013. Mikkeli. 60 s.

Feist, W. C. Springer, E. L. & Hajny, G. J. 1972. Determining loss of wood substance in outside chip storage: a comparison of two methods. Forest Products Laboratory, Forest Service U.S. Department of Agriculture. Research paper FPL 189. Sivut 185-195

Forsén, H. & Tarviainen, V. 2000. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. Espoo 2000. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 420. 79 s.

GANN. 2014. Tuoteluettelo 2014. Saksa, Gerlingen: gann mess- u. regeltechnik gmbh. 102 s.

Gjölshj, S. 1995. Storage of comminuted birch in piles in Norway. Teoksessa: Mattson, J.E., Mitchell C.P. & Tordmar, K. (toim.): Proceedings from joint meeting. IEA/BA Task IX. Preparation and supply of high quality wood fuels. Garpenberg, Sweden, 13-16 June 1994. Department of Operational Efficiency, Swedish University of Agricultural Sciences. Research notes 278: 76-86 s.

Halkonen, T. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Diplomityö. TKK. Espoo. 73 s.

Ilmatieteenlaitos. 2015. Vuositilastot [verkkodokumentti]. Päivitetty 2015. [Viitattu 20.3.2015]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>

Jahkonen, M. Lindblad, J. Sirkiä, S. & Laurén, A. 2012. Energiapuun kosteuden ennustaminen. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 241. 35 s.

Jirjis, R. 1995 Storage and drying of wood fuel. Biomass and Bioenergy, Volume 9, Issues 1–5, 1995, Sivut 181-190, ISSN 0961-9534.

Jirjis, R. & Lehtikangas, P. 1998, Storage of wood chips and bark in northern Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, Report no. 254. 30s. ISSN 0348-4599

Jylhä, P. 2013. Autohakkurin seula-aukon koon vaikutus kokopuun haketuksen tuottavuuteen ja polttoaineen kulutukseen. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 272. 19 s

Laitila, J. Rytönen, E. & Nuutinen, Y. 2013. Kantojen, latvusmassan ja harvennuspuun murskaus tienvarsivarastolla kuorma-autoalustaisella CBI 5800 murskaimella. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 260. 29 s. ISBN 978-951-40-2413-9.

Karppanen, J. 2015. Bioenergianinsinööri. Etelä-Savon Energia OY. Sähköpostikeskustelu 27.4.2015

Lehtimäki, J. & Nurmi, J. 2006. Energiapuun aisautuminen yksioteharvesteri-hakkuussa. Bioenergiaa metsästä- hankkeen infokortti 87. Kokkola. Kokkolan yliopistokeskus Cydenius.

Lepistö, T. Lauhanen, R. & Viirimäki, J. 2010. Laatuhaakkeen tuotanto -opas. Metsäkeskukset. Sastamala: Vammaspaino. 2. painos 48 s. ISBN 978-951-98723-5-3 (nid.) ISBN 978-951-98723-6-0

Nurmi, J. & Hillebrand, K. 2007. The characteristics of whole-tree fuel stocks from silvicultural cleanings and thinnings. Biomass and Bioenergy, Volume 31, Issue 6, June 2007, Sivut 381-392, ISSN 0961-9534.

Raitila, J. 2014. Puun kuivuminen hakkeena ja rankana. Puun kuivauksen teemapäivä, Saarijärvi 4.4.2014. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). Saatavissa: http://tapahtumat.ahjoon.fi/eTaika_Tiedostot/2/TapahtumanTiedostot/2392/Energiapuun%20kuivuminen%20rankana%20ja%20hakkeena%20Jyrki%20Raitila%20VTT.pdf

Raitila, J. 2015. Metsähakkeen varastointi. BioEnergia-lehti 2/2015. Sivut 8-10. ISSN 1459-1820.

Råde, L & Westergren, B. 2004 Mathematics Handbook for Science and Engineering. Studentlitteratur, Lund, 5 edition. 546 s.

Röser, D. Erkkilä, A. Mola-Yudego, B. Sikanen, L. Prinz, R. Heikkinen, A. Kaipainen, H. Oravainen, H. Hillebrand, K. Emer, B. Väätäinen, K. 2010. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 186. 60 s. ISBN 978-951-40-2279-1.

SFS-EN 14774-2. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 2: Kokonaiskosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. 12 s.

SFS-EN 14774-3. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Kosteuspitoisuuden määrittäminen. Uunikuivausmenetelmä. Osa 3: Yleisen analyysinäytteen kosteus. Yksinkertaistettu menetelmä. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. 12 s.

SFS-EN 14775. 2010. Kiinteät biopolttoaineet. Tuhkapitoisuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. 15 s.

SFS-EN 14778. 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Näytteenotto. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. 103 s.

SFS-EN 14780. 2011. Kiinteät biopolttoaineet. Näytteen esikäsittely. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. 41 s.

SFS-EN 14918:en. 2010. Biopolttoaineet. Lämpöarvon määrittäminen. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. 62 s.

Solunetti. 2006. Mikrobipopulaation kasvuvaiheet [verkkodokumentti]. Päivitetty 2006. [Viitattu 5.3.2015]. Saatavissa:

http://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/mikrobipopulation_kasvuvaiheet/3/

Thörnqvist, T. & Jirjis, R. 1990, Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar, Changes in fuel chips during storage in large piles, Swedish University of Agricultural Sciences, Institutionen för virkeslära, Report no. 219. 49 s. ISSN 0348-4599

Torvelainen, J. 2014. Energiapuun kauppa, tammi-maaliskuu 2014. Metsätaloustiedote (SVT Maa-, metsä- ja kalatalous) 2014(25/2014). 6 s.

Torvelainen, J., Ylitalo, E. & Nouro, P. 2014. Puun energiakäyttö 2013. Metsätaloustiedote (SVT Maa-, metsä- ja kalatalous) 2014(31/2014). 7 s.

Tuomela, M. Vikman, M. Hatakka, A. Itävaara, M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review, Bioresource Technology, Volume 72, Issue 2, April 2000, Pages 169-183, ISSN 0960-8524.

LIITE I. Tutkimuskohteen 1 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

Ikäluokka	Tutkimuskohte 1					Lehti- ja havupuu				
	Varatot		Hake			Varaston korkeus 4m				Uuni
	Näyte nro.	Näytteen paino, kg	Korkeus, m	Leveys, m	Laji	Pikakosteus				
Alle 1 vuotta	1/1	1,51	1,50	30	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	43,02
	1/2	1,44	2,50	30	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	44,58
	1/3	1,67	1,50	40	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	47,93
	1/4	1,61	2,50	40	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	62,75
	1/5	1,02	1,50	15	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	31,79
	1/6	1,09	2,50	15	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	46,34
	1/7	1,08	1,50	20	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	32,10
	1/8	1,18	2,50	20	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	53,75
	Keskiarvo	1,33	2,00	26	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	45,28
	Keskiarvo 1,5 m	1,32	1,50	26	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	38,71
	Keskiarvo 2,5m	1,33	2,50	26	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	51,85

LIITE II. Tutkimuskohteen 2 kosteusmittauksien tulokset

Ikäluokka	Tutkimuskohte 2		Hake			Lehti- ja havupuu				
	Varatot		8	9		Varaston korkeus 6 m				
	Näyte nro.	Näytteen paino, kg	Korkeus	Leveys	Laji	Pikakosteus			Uuni	
						Vasen	Keskikohta	Oikea	Keskiarvo	
1 - 2 Vuotta	8/1	1,29	1,50	60	Seka	58,50	55,90	58,50	57,63	33,52
	8/2	1,04	2,50	60	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	27,99
	8/3	1,19	4,00	60	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	34,27
	8/4	0,90	1,50	45	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	35,09
	8/5	1,28	2,50	45	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	59,47
	8/6	1,60	4,00	45	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	58,51
	8/7	0,79	1,5	50	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	33,18
	8/8	1,12	2,5	50	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	49,80
	8/9	1,28	4,00	50	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	64,52
	8/10	0,86	1,5	40	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	36,53
	8/11	1,07	2,5	40	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	40,98
	8/12	1,24	4,00	40	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	59,36
	Keskiarvo	1,22	2,67	53	Seka	58,50	58,07	58,50	58,36	44,43
	Keskiarvo 1,5 m	1,10	1,50	53	Seka	58,50	57,20	58,50	58,07	34,58
	Keskiarvo 2,5m	1,16	2,50	53	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	44,56
Keskiarvo 4 m	1,40	4,00	53	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	54,16	
Yli 2 vuotta	9/1	1,05	1,50	10	Seka	49,40	34,70	58,50	47,53	22,75
	9/2	1,10	2,50	10	Seka	53,60	58,50		56,05	28,68
	9/3	1,56	4,00	10	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	65,48
	9/4	0,81	1,50	15	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	31,04
	9/5	1,00	2,50	15	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	43,44
	9/6	1,19	4,00	15	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	51,01
	9/7	0,65	1,5	30	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	28,59
	9/8	1,13	2,50	30	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	64,45
	9/9	1,65	4,00	30	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	66,68
	9/10	0,81	1,5	20	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	36,34
	9/11	1,21	2,50	20	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	61,70
	9/12	1,34	4,00	20	Seka	58,5	58,5	58,5	58,5	69,07
	Keskiarvo	1,12	2,67	13	Seka	56,17	54,53	58,50	56,26	47,44
	Keskiarvo 1,5 m	0,93	1,50	13	Seka	53,95	46,60	58,50	53,02	29,68
	Keskiarvo 2,5m	1,05	2,50	13	Seka	56,05	58,50	58,50	57,28	49,56
Keskiarvo 4 m	1,38	4,00	13	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	63,06	
Kaikki	Keskiarvo	1,22	2,44	30	Seka	57,72	57,03	58,50	57,71	45,94
	Keskiarvo 1,5 m	1,12	1,50	30	Seka	56,98	54,10	58,50	56,53	34,32
	Keskiarvo 2,5 m	1,18	2,50	30	Seka	57,68	58,50	58,50	58,09	48,66
	Keskiarvo 4 m	1,39	4,00	33	Seka	58,50	58,50	58,50	58,50	58,61

LIITE III. Tutkimuskohteen 3 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

Ikäluokka	Tutkimuskohte 3										
	Varatot		Ranka		Lehtipuu						
	2		3		4		6 Varaston korkeus 4 m				
							Pikakosteus				Uuni
	Näyte nro.	Näytteen paino, kg	Korkeus	Leveys	Laji	Pääty	Keskikohta	Pääty	Keskiarvo		
Alle 1 vuotta	2/1	1,49	1,00	90	Koivu	30,70	32,60	34,30	32,53	44,87	
	2/2	0,77	1,00	25	Haapa	34,50	33,80	37,00	35,10		
	2/3	0,45	1,00	15	Haapa	31,30	34,10	32,10	32,50		
	2/4	0,99	1,00	10	Haapa	36,30	33,40	34,80	34,83	38,66	
	3/1	0,53	1,00	60	Haapa	26,80	26,40	27,60	26,93	21,92	
	3/2	0,53	1,00	40	Koivu	34,10	36,00	34,00	34,70		
	3/3	0,64	1,00	45	Koivu	36,30	38,10	33,70	36,03	26,57	
	3/4	0,61	1,00	50	Koivu	43,50	39,90	58,30	47,23		
	Keskiarvo	0,75	1,00	42	Lehtipuu	34,19	34,29	36,48	34,98	33,01	
1 - 2 Vuotta	4/3	0,73	1,00	35	Koivu	33,10	39,10	0,00	36,10	27,36	
	4/4	0,81	1,00	40	Koivu	33,60	26,50	26,70	28,93		
	4/6	0,56	1,00	40	Koivu	22,80	21,60	22,00	22,13	18,82	
	4/8	0,51	1,00	60	Koivu	26,80	27,50	28,60	27,63	24,37	
	4/13	0,41	1,00	30	Haapa	26,20	27,30	25,70	26,40	21,70	
	4/14	0,31	1,00	35	Haapa	25,70	25,10	24,20	25,00		
	4/15	0,51	1,00	40	Haapa	28,60	28,20	28,80	28,53	23,57	
	4/16	0,33	1,00	40	Haapa	25,50	26,30	23,50	25,10		
	Keskiarvo	0,52	1,00	40	Lehtipuu	27,79	27,70	22,44	27,48	23,17	
Yli 2 Vuotta	6/1	0,59	1,00	30	Koivu	31,00	28,40	27,10	28,83	29,79	
	6/2	0,56	1,00	40	Koivu	23,10	22,20	24,60	23,30	19,37	
	6/8	0,34	1,00	50	Haapa	20,60	21,50	22,80	21,63	18,46	
	6/9	0,34	1,00	55	Haapa	26,70	24,90	23,40	25,00	20,84	
	6/13	0,88	1,00	10	Koivu	22,80	25,30	28,60	25,57		
	6/14	0,68	1,00	15	Koivu	26,00	28,40	26,80	27,07		
	6/15	0,37	1,00	10	Haapa	18,40	19,10	20,00	19,17		
	6/16	0,44	1,00	15	Haapa	22,20	23,90	20,00	22,03		
	Keskiarvo	0,53	1,00	28	Lehtipuu	23,85	24,21	24,16	24,08	22,11	
Kaikki	Keskiarvo	0,60	1,00	37	Lehtipuu	28,61	28,73	27,69	28,85	26,10	

LIITE IV. Tutkimuskohteen 4 kosteuspitoisuusmittauksien tulokset

Ikäluokka	Tutkimuskohte 4				Ranka		Havupuu			
	Varatot		2	3	4	6 Varaston korkeus		4 m		Uuni
	Näyte nro.	Näytteen paino, kg	Korkeus	Leveys	Laji	Pääty	Keskikohta	Pääty	Keskiarvo	
Alle 1 vuotta	3/5	0,46	1,00	45	Kuusi	32,00	30,30	29,20	30,50	24,04
	3/6	0,59	1,00	55	Kuusi	44,80	45,30	50,80	46,97	43,38
	3/7	0,64	1,00	40	Kuusi	32,60	33,10	34,30	33,33	
	3/8	0,40	1,00	50	Kuusi	29,40	27,80	25,80	27,67	
	3/9	0,42	1,00	20	Mänty	30,90	26,50	26,70	28,03	24,48
	3/10	0,46	1,00	15	Mänty	27,00	26,80	25,20	26,33	
	3/11	0,40	1,00	40	Mänty	28,50	30,00	31,80	30,10	21,88
	3/12	0,46	1,00	45	Mänty	37,00	36,30	33,80	35,70	
	Keskiarvo	0,48	1,00	39	Havupuu	32,78	32,01	32,20	32,33	28,45
1 - 2 Vuotta	4/1	0,42	1,00	30	Mänty	26,70	24,90	25,60	25,73	25,56
	4/2	0,64	1,00	30	Mänty	23,50	22,80	24,40	23,57	
	4/5	0,36	1,00	40	Mänty	24,20	22,50	25,00	23,90	20,25
	4/7	0,40	1,00	60	Mänty	26,80	25,70	26,30	26,27	23,16
	4/9	0,41	1,00	40	Kuusi	21,20	20,50	21,50	21,07	19,98
	4/10	0,40	1,00	40	Kuusi	20,60	20,70	20,70	20,67	19,77
	4/11	0,48	1,00	30	Kuusi	20,90	20,30	21,10	20,77	
	4/12	0,64	1,00	40	Kuusi	21,20	20,20	21,10	20,83	
	Keskiarvo	0,47	1,00	39	Havupuu	23,14	22,20	23,21	22,85	21,74
Yli 2 Vuotta	6/3	0,41	1,00	20	Kuusi	20,40	19,00	18,50	19,30	18,70
	6/4	0,44	1,00	25	Kuusi	20,50	19,40	21,90	20,60	19,70
	6/5	0,32	1,00	35	Kuusi	20,30	20,00	20,60	20,30	
	6/6	0,50	1,00	45	Mänty	21,50	21,00	20,40	20,97	18,80
	6/7	0,49	1,00	50	Mänty	21,90	21,20	21,40	21,50	18,12
	6/10	0,53	1,00	60	Kuusi	23,80	24,10	23,60	23,83	
	6/11	0,61	1,00	10	Mänty	23,40	22,70	20,20	22,10	
	6/12	0,47	1,00	15	Mänty	25,00	30,30	26,60	27,30	
	Keskiarvo	0,47	1,00	33	Havupuu	22,10	22,21	21,65	21,99	18,83
Kaikki	Keskiarvo	0,47	1,00	37	Havupuu	26,00	25,48	25,69	25,72	23,01

LIITE V. Tienvarsivaraston tulokset

Tienvarsivarastot			Ranka		Havupuu				
Varatot	TVV				Varaston korkeus		4 m		
					Pikakosteus				Uuni
Näyte nro.	Näyteen paino, kg	Korkeus	Leveys	Laji	Pääty	Keskikohta	Pääty	Keskiarvo	
TVV 1	0,69	1,5	2	Mänty	26,40	23,70	24,20	24,77	21,92
TVV 2	0,45	1,5	3	Mänty	21,50	21,60	25,30	22,80	19,26
TVV 5	0,35	1,5	4	Mänty	29,90	20,50	20,50	23,63	19,64
TVV 6	0,43	1,5	5	Mänty	19,10	19,60	21,00	19,90	17,93
TVV 9	0,34	2	2	Kuusi	16,40	17,90	22,00	18,77	19,13
TVV 10	0,42	2	3	Kuusi	21,70	20,60	20,60	20,97	19,93
TVV 13	0,32	2	4	Kuusi	17,60	17,00	17,80	17,47	17,81
TVV 14	0,34	3	5	Kuusi	17,20	20,20	21,20	19,53	18,91
Keskiarvo	0,42	1,88	3,50	Havupuu	21,23	20,14	21,58	20,98	19,32

Virhearviointi	Vapausaste	Keskihajonta	±
Pikakosteus	7,0	2,38	1,592059
Uunikuivaus	7,0	1,21	0,80822

Tienvarsivarastot			Ranka		Lehtipuu				
Varatot	TVV				Varaston korkeus		4 m		
					Pikakosteus				Uuni
Näyte nro.	Näyteen paino, kg	Korkeus	Leveys	Laji	Pääty	Keskikohta	Pääty	Keskiarvo	
TVV 3	0,50	1,5	2	Koivu	21,20	23,50	20,30	21,67	18,96
TVV 4	0,41	1,5	3	Koivu	20,10	20,00	20,80	20,30	18,08
TVV 7	0,40	1,5	4	Koivu	19,30	24,50	26,20	23,33	19,53
TVV 8	0,54	1,5	5	Koivu	20,40	20,60	25,70	22,23	20,20
TVV 11	0,41	2	2	Haapa	20,50	25,80	23,70	23,33	18,00
TVV 12	0,52	2	3	Haapa	26,10	21,50	24,20	23,93	20,90
TVV 15	0,37	2	4	Haapa	17,80	19,80	19,10	18,90	16,44
TVV 16	0,48	3	5	Haapa	18,40	18,30	21,50	19,40	16,14
Keskiarvo	0,45	1,88	3,50	Lehtipuu	20,48	21,75	22,69	21,64	18,53

Virhearviointi	Vapausaste	Keskihajonta	±
Pikakosteus	7,0	1,79	1,199819
Uunikuivaus	7,0	1,59	1,063011

LIITE VI. Virhearvioinnin tulokset

Tutkimuskohteitten 1 ja 2 kosteuden tulosten keskihajonta ja t-jakauman 95 % luottamusväli.

Ikä	Korkeus m	Keskihajonta	95 % luottamusväli
			± % -yks.
Alle vuoden Tutkimuskohde 1	Kaikki	9,7	6,5
	1,5	7,0	8,2
	2,5	7,2	8,4
	4,0	-	-
1 - 2 vuotta Tutkimuskohde 2	Kaikki	12,5	6,5
	1,5	1,3	1,6
	2,5	11,6	13,6
	4,0	11,7	13,8
Yli 2 vuotta Tutkimuskohde 2	Kaikki	16,8	8,7
	1,5	4,9	5,7
	2,5	14,5	17,1
	4,0	7,1	8,3
Kaikki	Kaikki	14,9	5,2
	1,5	4,3	2,9
	2,5	13,4	9,0
	4,0	10,7	7,1

Tutkimuskohteen 3 kosteuden tulosten keskihajonta ja t-jakauman 95 % luottamusväli.

Ikä	Keskihajonta		95 % luottamusväli	
	Pikakosteus	Uunikuivaus	Pikakosteus	Uunikuivaus
Alle vuoden	5,3	9,2	3,6	10,8
1 - 2 vuotta	2,2	2,1	1,6	2,5
Yli 2 vuotta	2,5	1,0	1,8	1,7
Kaikki	6,3	8,2	2,3	4,5

Tutkimuskohteen 4 kosteuden tulosten keskihajonta ja t-jakauman 95 % luottamusväli.

Ikä	Keskihajonta		95 % luottamusväli	
	Pikakosteus	Uunikuivaus	Pikakosteus	Uunikuivaus
Alle vuoden	6,2	8,7	4,2	10,2
1 - 2 vuotta	2,2	2,3	1,5	2,2
Yli 2 vuotta	2,4	0,6	1,6	0,7
Kaikki	6,2	6,4	2,2	3,1

LIITE VII. Analyysikosteuden ja tuhkapitoisuuksien tulokset

Näyte	Analyysikosteus	Tuhkapitoisuus
JV 1	2,7	0,43
1/1	2,2	0,98
8/1	3,4	0,61
9/1	3,2	0,94
Keskiarvo	2,9	0,74
<1 Ha	1,6	1,35
<1 Ko	1,8	0,69
<1 Ku	2,0	0,80
<1 Mä	2,0	0,54
Keskiarvo	1,8	0,85
KESKIARVO	2,3	0,79

LIITE VIII. Tutkimuskohteiden 1, 3 ja 4 Lämpöarvoanalyysin tulokset

Näyte		Ylempi lämpöarvo MJ/kg	Alempi lämpöarvo MJ/kg	99 % luottamusväli ± %-yks.
Alle 1 vuotta	Kouvu	20,20	18,89	0,43
	Haapa	20,18	18,87	0,05
	Keskiarvo	20,19	18,88	0,24
	Mänty	20,16	18,85	0,31
	Kuusi	20,29	18,98	0,32
	Keskiarvo	20,22	18,91	0,31
1 - 2 vuotta	Kouvu	20,30	18,99	0,41
	Haapa	19,74	18,43	0,23
	Keskiarvo	20,02	18,71	0,32
	Mänty	20,24	18,93	0,34
	Kuusi	20,06	18,75	0,14
	Keskiarvo	20,15	18,84	0,24
Yli 2 vuotta	Kouvu	20,05	18,74	0,26
	Haapa	20,31	19,00	0,31
	Keskiarvo	20,18	18,87	0,29
	Mänty	20,29	18,98	0,15
	Kuusi	20,19	18,88	0,30
	Keskiarvo	20,24	18,93	0,23
Lehtipuu	Keskiarvo	20,13	18,82	0,28
Havupuu	Keskiarvo	20,21	18,90	0,26
Kaikki	Keskiarvo	20,17	18,86	0,27

Näytteen nro.	korkeus m	Ylempi lämpöarvo MJ/kg	Alempi lämpöarvo MJ/kg	99 % luottamusväli ± %-yks.
1/1	1,5	19,91	18,60	0,44
1/2	2,5	19,81	18,50	0,27
1/3	1,5	19,94	18,63	0,12
1/4	2,5	20,10	18,79	0,35
1/5	1,5	20,08	18,77	0,13
1/6	2,5	19,92	18,61	0,14
1/7	1,5	19,60	18,30	0,14
1/8	2,5	19,58	18,27	0,21
Keskiarvo	1,5	19,89	18,58	0,21
Keskiarvo	2,5	19,85	18,54	0,24
Keskiarvo	Kaikki	19,87	18,56	0,23

LIITE IX. Tutkimuskohteen 2 Lämpöarvoanalyysin tulokset

Näytteen nro.	korkeus m	Ylempi lämpöarvo MJ/kg	Alempi lämpöarvo MJ/kg	99 % luottamusväli ± %-yks.
8/1	1,5	20,18	18,87	0,44
8/2	2,5	20,13	18,82	0,18
8/3	4,0	20,21	18,90	0,32
8/4	1,5	20,10	18,79	0,06
8/5	2,5	20,00	18,69	0,49
8/6	4,0	19,78	18,47	0,47
8/7	1,5	20,01	18,70	0,17
8/8	2,5	19,90	18,59	0,10
8/9	4,0	20,36	19,05	0,32
8/10	1,5	19,76	18,45	0,17
8/11	2,5	19,42	18,11	0,45
8/12	4,0	20,05	18,74	0,11
Keskiarvo	1,5	20,01	18,70	0,21
Keskiarvo	2,5	19,86	18,55	0,30
Keskiarvo	4,0	20,10	18,79	0,31
Keskiarvo	Kaikki	19,99	18,68	0,27

Näytteen nro.	korkeus m	Ylempi lämpöarvo MJ/kg	Alempi lämpöarvo MJ/kg	99 % luottamusväli ± %-yks.
9/1	1,5	19,93	18,62	0,04
9/2	2,5	20,35	19,04	0,18
9/3	4,0	19,54	18,23	0,28
9/4	1,5	19,85	18,54	0,39
9/5	2,5	19,94	18,63	0,28
9/6	4,0	19,82	18,51	0,25
9/7	1,5	20,28	18,97	0,22
9/8	2,5	19,77	18,46	0,06
9/9	4,0	19,01	17,70	0,43
9/10	1,5	20,04	18,73	0,13
9/11	2,5	20,30	18,99	0,28
9/12	4,0	20,11	18,80	0,41
Keskiarvo	1,5	20,02	18,71	0,20
Keskiarvo	2,5	20,09	18,78	0,20
Keskiarvo	4,0	19,62	18,31	0,34
Keskiarvo	Kaikki	19,91	18,60	0,25

LIITE X. Otanta Studentin t-taulukosta

n-1	75,0 %	90,0 %	95,0 %	97,5 %	99,0 %	99,5 %
1	1,0000	3,0777	6,3138	12,7062	31,8205	63,6567
2	0,8165	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248
3	0,7649	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409
4	0,7407	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041
5	0,7267	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321
6	0,7176	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074
7	0,7111	1,4149	1,8946	2,3646	2,9980	3,4995
8	0,7064	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554
9	0,7027	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498
10	0,6998	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693
11	0,6974	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058
12	0,6955	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545
13	0,6938	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123
14	0,6924	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768
15	0,6912	1,3406	1,7531	2,1314	2,6025	2,9467
16	0,6901	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208
17	0,6892	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982
18	0,6884	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784
19	0,6876	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609
20	0,6870	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453
21	0,6864	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314
22	0,6858	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188
23	0,6853	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073
24	0,6848	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7969
25	0,6844	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874