

SITKAKUUSEN
LÄMMINILMAKUIVAUSKOE JA
SIMULOINTI

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Puutekniikka
Markkinointi ja tuotekehitys
Opinnäytetyö
Kevät 2008
Marjo Ravantti

Lahden ammattikorkeakoulu
Puutekniikan insinööri

RAVANTTI, MARJO: Sitkakuusen lämminilmakuivauskoe ja simulointi

Puutekniikan opinnäytetyö, 71 sivua, 9 liitesivua

Kevät 2008

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia kuinka hyvin pohjoismaisen kuusen simulointimalli toimii sitkakuusen lämminilmakuivauksessa. Tavoitteena oli myös kuivata tutkimuksessa käytetty dimensio 50 x 100 mm 17 % loppukosteuteen. Työ tehtiin toimeksiantona YTI-tutkimuskeskukselle, joka on erikoistunut Mikkelin ammattikorkeakoulun yksikkö. Tämä tutkimus on osa kansainvälistä Bitwon hanketta.

Tutkimuksessa käytetty sitkakuusi (*Picea Sitchensis*) on meri-ilmaston puulaji. Sitkakuusi kasvaa luonnonvaraisena Amerikan länsirannikolla kapealla, runsassateisella rannikkokaistaleella Alaskasta Kaliforniaan, jonka eteläosissa sitä tavataan vain vuoristossa.

Tässä tutkimuksessa tehtiin neljä lämminilmakuivausta. Kuivauskaavat tehtiin VTT:n kehittämällä Laatukamariohjelmalla. Kuivauslämpötilat vaihtelivat 50–75 °C ja kuivausajat 68–140 h. Kuivaamona käytettiin Lahden ammattikorkeakoulun tutkimuskamarikuivaamo.

Kunkin kuivauksen aikana kuormasta otettiin useamman kerran näyte-eriä. Näistä koekappaleista tutkittiin sen hetkinen kosteus poikkileikkausnäytteestä sekä gradientista. Ensimmäisessä ja toisessa kuivauksessa tavoitteena oli ottaa näyte 40 %:n, 30 %:n, 20 %:n kosteuksissa. Kuivauksien lopullinen tavoitekosteus oli 10 %. Kolmannessa ja neljännessä kuivauksessa näytteitä otettiin vain muutama ja tavoitekosteus oli 17 %. Kummankin kuivauksen loputtua tehtiin 20 kappaleelle EDG:n mukainen laaduntarkastus.

Tuloksista selviää, että neljäs kuorma jäi keskikosteuden osalta liian kosteaksi tavoitteesta. Sekä kolmannessa että neljännessä kuivauksessa myös gradienttien väliset kosteuserot olivat suuria. Ongelmaksi muodostuivat siis liian suuret kappaleiden sisäiset kosteuserot (gradientti) sekä liian suuri keskikosteus.

Avainsanat: sitkakuusi, kuivaaminen, Laatukamari, simulointi

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology

RAVANTTI, MARJO: Warm air drying examination and simulation of Sitka-
spruce

Bachelor's thesis in wood technology, 71 pages, 9 appendices

Spring 2008

ABSTRACT

The goal of this Bachelor's thesis was to examine how well the Nordic spruce simulation model works with Sitka Spruce. The work was done as an assignment of the YTI Research Centre, which is a unit of the Mikkeli University of Applied Sciences. The study was part of the international Bitwon project.

The investigation consisted of four warm air drying sessions. The drying formulas were made with software called laatukamari, which has been developed by VTT Technical Research Centre of Finland. The drying temperatures changed between 50-75 degrees and the drying times between 68-149 hours. Drying was done in the research chamber drying plant of Lahti University of Applied Sciences.

Several samples were taken from the load during the drying session. These samples were examined for their prevailing moisture in cross-section sample and in gradient sample. At the end of the drying sessions, quality inspection using the EDG standards.

The result was that the moisture content of all samples remained too high, compared to the goal.

Key words: Sitkapruce, drying, Laatukamari, simulation

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 TUTKIMUKSEN TAVOITE	2
3 YLEISTÄ KUIVAUSTULOKSIEN ARVIOINNISTA	2
3.1 Kuivausviat	2
3.1.1 Muodonmuutosviat	2
3.1.2 Halkeamat	2
3.1.3 Pintakovuus	3
3.1.4 Väriviit ja pihka	3
3.1.5 Epätasainen loppukosteus	4
3.2 EDG	4
3.2.1 Keskikosteuden u1/3 - sallitut vaihtelurajat eri laatuluokissa	6
4 POHJOISMAISEN SAHATAVARAN LAJITTELUOHJEET	6
4.1 Laatuluokat	7
4.2 Sahatavaran laatuun vaikuttavien ominaisuuksien määritelmät ja mittaustavat	7
4.2.1 Oksat	7
4.2.2 Halkeamat	9
4.2.3 Vajaasärmä	10
4.2.4 Pihkakolo, kaarnaroso ja koro	10
4.2.5 Vinosyisyys	11
4.2.6 Latvamurtuma	11
4.2.7 Lyly	11
4.2.8 Pihkaisuus, vesisilo ja sienivauriot	11
4.2.9 Muotoviit	12
5 SITKAKUUSEN KUIVAAMINEN	13
5.1 Yleistä sitkakuusesta	13
5.2 Sitkakuusen kuivattavuus	14
5.2.1 Sahatavaran suoruus kuivauksissa	14
5.3 Sitkakuusen kuumakuivaus	15
5.3.1 Muodonmuutosten arviointi	16
5.4 Värimuutokset koekuivauksissa	17
6 KUIVAUSSIMULOINTIMALLI	17
7 KOEKUIVAUKSET	20
7.1 Koelaitteisto	20
7.2 Koejärjestelyt ja koemateriaali	21

7.3 Kuivaus 1	22
7.4 Kuivaus 2	24
7.5 Kuivaus 3	25
7.6 Kuivaus 4	28
8 KOSTEUSNÄYTTEIDEN OTTO	30
9 TULOKSET	33
9.1 Kuivaus 1	33
9.1.1 Kosteudet 40 %:n tavoite kosteudessa	33
9.1.2 Kosteudet 30 %:n tavoitekosteudessa	34
9.1.3 Kosteudet 20 % tavoitekosteudessa	36
9.1.4 Kosteudet 10 % tavoite kosteudessa	37
9.2 Kuivaus 2	39
9.2.1 Kosteudet 40 %:n tavoitekosteudessa	39
9.2.2 Kosteudet 30 % tavoite kosteudessa	41
9.2.3 Kosteudet 20 % tavoite kosteudessa	42
9.2.4 Kosteudet 10 %:n tavoitekosteudessa	43
9.2.5 Laadun tarkastus kuivauksissa 1 ja 2	45
9.3 Kuivaus 3	46
9.3.1 Näyte-erä 1	46
9.3.2 Näyte-erä 2	47
9.3.3 Näyte-erä 3	49
9.3.4 Laaduntarkastus EDG:n mukaisesti kolmannesta kuivauskuormasta	50
9.4 Kuivaus 4	51
9.4.1 Näyte-erä 1	52
9.4.3 Laaduntarkastus EDG:n mukaisesti neljännestä kuivauskuormasta	54
9.5 Kuivauslaadun parantaminen	56
10 KOEKUIVAUSTEN JA SIMULOINTIMALLIN VERTAILU	57
10.1 Kuivauskuorma 1	57
10.1.2 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili	58
10.2 Kuivauskuorma 2	60
10.2.1 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili	61
10.3 Kuivauskuorma 3	62
10.3.1 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili	62
10.4 Kuivauskuorma 4	64
10.4.1 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili	65
10.5 Johtopäätös simuloinnin ja koekuivausten vertailussa	66
11 YHTEENVETO	68
LÄHTEET	70
LIITTEET	71

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty sitkakuusen kuivaamisesta. Opinnäytetyö perustuu tekemääni tutkimukseen YTI-tutkimuskeskukselle, joka on soveltavaan tutkimukseen ja kehitystyöhön erikoistunut Mikkelin ammattikorkeakoulun yksikkö. YTI tilasi tutkimuksen sitkakuusen lämmينilmakuivauksesta Lahden ammattikorkeakoululta. Tehtävänäni oli hoitaa tutkimuksen käytännön puoli sekä raportointi. Tämä tutkimus on osa kansainvälistä, osittain EU rahoitteista Bitwon hanketta.

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia kuinka hyvin sitkakuusi noudattaa pohjoismaisen kuusen arvoilla tehtyä kuivaus simulointimallia. Tutkimuksessa käytettiin 50 mm x 100 mm sitkakuusi sahatavaraa, joka saapui Skotlannista Suomeen koekuivauksia varten.

Sitkakuusi on meri-ilmaston puulaji, joka kasvaa luonnonvaraisena Amerikan länsirannikolla kapealla rannikkokaistaleella Alaskasta Kaliforniaan. Sitkakuusta käytetään, kuten muitakin Amerikkalaisia kuusilajeja, rakennuspuuna, varsinkin sisärakenteisiin, huonekalu-, tynnyri-, vaunu-, ja laatikkoteollisuudessa, soittimissa, vaneroitujen tuotteiden sisäpuuna (sokkopuu), vanerien sisäviiluna, lennätin ja johdinpylväissä sekä paperi- ja kaivospuuna (tunnelien tukirakenteisiin).

Tässä tutkimuksessa tehtiin neljä lämmينilmakuivausta. Kuivauksien aikana otettiin useita kertoja näytekappaleita, joista tutkittiin kosteusprosentti. Kuivauskaavojen tekemiseen käytettiin VTT:n kehittämää Laatukamari ohjelmaa. Koekuivaukset tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun kamarikuivaamossa.

Kuivauskuormista mitattiin sahatavaran kosteus kuivauksen aikana ja sen loputtua. Kosteudet määriteltiin punnitus- kuivaus- menetelmällä kosteusgradientista sekä poikkileikkauskappaleista. Kolmannelle ja neljännelle kuivauserälle tehtiin EDG:n mukainen laaduntarkastus kuivauksen loputtua.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITE

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka hyvin pohjoismaisen kuusen simulointimalli toimii sitkakuusen lämminilmakuivauksessa. Tavoitteena oli myös kuivata tutkimuksessa käytetty dimensio 50 mm x 100 mm 17 % loppukosteuteen kolmessa vuorokaudessa. Lämminilmakuivauksia tehtiin neljä kappaletta ja kuivauskaavojen teossa käytettiin VTT:n kehittämää simulointiohjelmaa LaatuKamaria. Simuloinnissa käytettiin pohjoismaisen kuusen arvoja.

3 YLEISTÄ KUIVAUSTULOKSIEN ARVIOINNISTA

3.1 Kuivausviat

3.1.1 Muodonmuutosviat

Vinosyisyys ja lyly ovat puun rakenneominaisuuksia, jotka aiheuttavat kuivatessa kappaleen kieroontumista ja vääntymistä. Mitä alhaisempaan loppukosteuteen sahatavara kuivataan, sitä enemmän muodonmuutosvikoja syntyy. Muodonmuutosvikoja voidaan ehkäistä huolellisella kuivauskuorman teolla. (Sipi 2002,132)

3.1.2 Halkeamat

Halkeamat ovat pahin ja yleisin kuivausvirhe. Ne aiheuttavat suurimmat sahatavaran arvon ja laadun alenemiset.

Pintahalkeamat syntyvät kuivauksen alkuvaiheessa, kun puun pinta kuivuu liian nopeasti ja se pyrkii kutistumaan. Märkä sisäosa vastustaa sitä ja puun pintaan syntyy vetojännitys ja kappaleen sisälle puristusjännitys. Tämä aiheuttaa puun pinnan lujuuden ylittymisen ja pinnan repeämisen. Pintahalkeamia esiintyy myös kappaleiden päissä missä ilman virtaus on hyvä. (Sipi 2002,131)

Sisähalkeamat syntyvät, kun sahatavaran sisäosa alkaa kuivua aiheuttaen pintaan puristusjännityksen ja sisäosaan vetojännitystä. Tällöin sisäosa halkeaa ja sahatavaran pintaa jää ehjäksi. (Sipi 2002, 131)

Sahatavaran halkeilua voi kuivauksessa kuvata niin sanotulla halkeiluprosentilla, joka määritellään seuraavasti:

$$\text{Halkeiluprosentti} = \frac{\text{halkeilun pituus}}{\text{kappaleen pituus}} \times 100$$

3.1.3 Pintakovuus

Yleisesti on todettu, että pintakovuus syntyy kuivauksen alkuvaiheessa. Silloin puun pinta kuivuu liian nopeasti ja pyrkii kutistumaan märän sisäosan vastustaessa sitä. Tämä aiheuttaa puun pintaan vetojännitystä ja kappaleen sisälle puristusjännitystä. Siitä seuraa puun pinnan venyminen ja kimmoisuusrajan ylittyminen, mikä aiheuttaa pintaan palautumattomia muodonmuutoksia.

Liian suuri ilman nopeus ja liian alhainen ilman suhteellinen kosteus vaikuttavat pintakovuuden syntymiseen. Pintakovuutta esiintyy etenkin sahatavaralla, joka on päässyt jo kuivumaan pinnalta ennen varsinaista kuivausta. (Sipi 2002, 131)

3.1.4 Väriviat ja pihka

Väriviat syntyvät myös yleensä kuivauksen alkuvaiheessa, ne johtuvat veden nopeasta haihtumisesta. Värivikojen syntymistä lisäävät puun korkea alkukosteus ja korkea kuivauslämpötila. Uuteaineiden rikastumista sahatavaran pintaan pidetään yhtenä värivikojen aiheuttajana. Kuusella ja männyllä on kuivauslämpötilan todettu aiheuttavan eniten värivirheitä. Värimuutokset ovat voimakkaimpia pintalaudoissa ja ne tulevat esille alhaisemmissa lämpötiloissa kuin sydäntavarassa. (Sipi 2002, 133)

Märän tavaran seisoessa kuivaamon märässä päässä, missä on noin 30 °C, alkaa syntyä sinistymistä ja homehtumista. Sinistymistä ja homehtumista voidaan estää kuivaamalla sahatavara heti sahauksen jälkeen, tehostamalla ilmankiertoa, nostamalla kuivaamon lämpötilaa, alentamalla kiertoilman kosteutta tai suoja kastelemalla sahatavara. (Sipi 2002, 133)

3.1.5 Epätasainen loppukosteus

Epätasainen loppukosteus todetaan kosteuserona kappaleen sisäosan ja pinnan välillä. Sitä voi ilmetä myös kappaleen pituussuunnassa tai kuivauserän eri kappaleiden välillä. Sahatavaran sisäisen kosteusjakauman tunnusluku on pinta- ja keskiosan kosteusero eli kosteusgradientti. (Sipi 2002, 134)

3.2 EDG

EDG on lyhenne sanoista European Drying Group. Se on eurooppalaisten tutkimuslaitosten kuivaustutkijoiden vuonna 1988 perustama yhteistyöfoorumi, johon kuuluu 16 maata. EDG:n kuivauslaatusuositukset ovat syntyneet tiiviin ryhmätyön tuloksena. Ryhmään kuuluu tutkijoita Saksasta, Norjasta, Suomesta, Ruotsista, Tanskasta, Italiasta ja Ranskasta. Dr. Johannes Welling on toiminut ryhmän koordinaattorina sekä sihteerinä. Welling on laatinut yhdessä Saksan puutavarakaupan edustajien ja sahateollisuuden kanssa perusversion kuivaussuosituksista. Pohjoismaiden tutkimuslaitokset ovat vaikuttaneet myös suositusten sisältöön, kun niitä on muokattu työryhmän kokouksissa. (European Drying Group 2008, 2)

Tätä suositusta käytetään uunikuivatun sahatavaran kuivauslaadun arvioimiseen. Kuivauslaatustandardi tulee olemaan tärkeässä roolissa korkean kuivauslaadun säilyttämisessä uunikuivatussa sahatavarassa Euroopan sisäisillä markkinoilla. Tämä suositus kohdistuu kaikkiin yksityisiin ja yrityksiin Euroopassa jotka kuivaavat, kuljettavat, vievät, tuovat, myyvät ja työskentelevät uunikuivatun sahatavaran kanssa ja auttaa saavuttamaan seuraavat tavoitteet:

- määrittää tarkan kuivauslaadun

- tuottaa selkeät kuvaukset käytännönläheisistä metodeista kuivauslaadun arviointiin, mikä auttaa Euroopan laajuisen järjestelmän tekemistä laadun kontrolloinnin ja laadun takaamista varten

Suurin osa kuivatusta, tällä hetkellä markkinoilla liikkuvasta puutavarasta, on teknisesti kuivattua eli keinokuivattua sahatavaraa. Sahatavaran tulee olla kosteudeltaan sopivaa jo kuivaamosta tullessaan, koska kuivauksen ja jatkojalostuksen välinen aika on lyhentynyt huomattavasti ja se ei ehdi tasaantua ennen seuraavaa käsittelyä tarpeeksi. Epätasainen kosteus ja väärä kosteusprosentti aiheuttavat loppukäytössä ja jatkojalostuksessa muodonmuutoksia ja mittojen muuttumisia. Tästä johtuen esimerkiksi puusepänteollisuuteen menevä sahatavara tulee kuivata erityistä huolellisuutta noudattaen. Sahatavara tulisikin arvioida niin sahatavaran laadun kuin kuivauslaadun mukaisesti. (European Drying Group 2008, 2)

Tämä kuivauslaatu suositus on kehitetty helpottamaan juuri keinokuivatun sahatavaran kuivauslaadun arviointia sekä kuivauslaadun määrittelyä erilaisissa sopimuksissa. EDG:n kuivauslaatusuositukset koskevat havu- ja lehtipuusahatavaraa aina 80 mm:n paksuuteen asti ja siinä määritellään, että suurin tavoitekosteus, johon näitä suosituksia voi käyttää on 20 % kosteus. Tästä suuremmat tavoitekosteudet luokitellaan esikuivatuksi sahatavaraksi. (European Drying Group 2008, 2)

Esimerkiksi yritysten välisessä kaupankäynnissä suosituksessa olevat laatuvaatimukset ja laadunvalvontamenetelmät velvoittavat sopimusosapuolia vain, jos sopimuksessa viitataan suositukseen, ja jos halutun tavoitekosteuden lisäksi kuivauslaatu on määritelty ilmaisuin standard S, quality dried Q tai exclusive E. Kuivauslaadun määrittämisestä sopimuksissa on kuitenkin hyötyä niin myyjälle kuin ostajallekin. Tällöin on helppoa tarkistaa toimitettavan sahatavara erän kriteerit helposti ja näin vähentää kuivauslaatua koskevat reklamaatiot. (European Drying Group 2008, 2)

Kaikille kuivauslaadun pääkriteereille on tässä suosituksessa esitetty käytännölliset mittausmenetelmät, jotta varmistettaisiin kaikille tuottajille,

loppukäyttäjille ja jatkojalostajille helppo tapa valvoa kuivatun sahatavaran laatua samoja sääntöjä käyttäen. (European Drying Group 2008, 2)

3.2.1 Keskikosteuden $u_{1/3}$ - sallitut vaihtelurajat eri laatuluokissa

Mitattuja kosteusarvoja verrataan myyjän ja ostajan välisen sopimuksen tavoitekosteuteen u_{tav} . Kuivauslaatuluokissa S, Q ja E sallitaan erisuuruiset $u_{1/3}$ -mittausarvojen poikkeamat tavoitekosteudesta. Luokassa S sallitaan suurin $u_{1/3}$ vaihtelu, luokka Q on yleisluokka moneen loppukäyttöön, jossa kosteuden tulee olla edellistä ahtaammissa rajoissa, ja luokkaa E käytetään tiukkojen laaturajoitustensa takia määritettäessä kuivatun sahatavaran ominaisuudet loppukäyttökohteisiin, joissa on erikoisen korkeat vaatimukset kuivauksen laadulle. Liitteenä 1 on taulukko, jossa on esitetty rajat, joiden sisällä 90 % kosteuden $u_{1/3}$ mittausarvoista tulee olla. (European Drying Group 2008, 2)

4 POHJOISMAISEN SAHATAVARAN LAJITTELUOHJEET

Pohjoismaisen sahatavaran lajitteluohje eli ns. ”sininen kirja” määrittelee laadut, joita metsätalous pystyy tuottamaan kestävästi, ja joita sahalaitokset voivat toimittaa jatkuvasti markkinoille. Lajitteluohjeita sovelletaan sekä vienti- että kotimarkkinoilla. Ne määrittelevät sahatavaran vähimmäislaadun kussakin laatuluokassa. Sahatavaraerä on normaalisti yleislaadultaan parempaa kuin laatuluokkien alarajoja kuvaavat arvot edellyttävät. Lajitteluohjeet muodostavat pohjan sahatavaran nelisivuiselle ulkonäköön perustuvalla kaupallisella lajittelulle. Ne toimivat myös lajittelijoiden ja muiden puutavara-alalla työskentelevien oppikirjana. (Sipi 2002,144)

Pohjoismaisen sahatavaran lajitteluohjeissa sahatavara jaotellaan laatuominaisuuksien mukaan päälaatuihin A, B, C ja D. Näiden lisäksi sahalaitokset voivat luoda myös asiakas- tai tuotekohtaisesti yksilöityjä lajitelmia päälaatujen ominaisuuksia yhdistelemällä.

Pohjoismainen sahatavara -kirjassa esitetty laatuluokitus on ohjeellinen. Siinä esitetyt määritelmät ja mittausmenetelmät sekä terminologia ovat olleet esikuvina laadittaessa EU:n sahatavaranormiston kanssa.

Pohjoismaisen sahatavaran lajitteluohje on arvokas väline laadunvarmennuksessa, laatukoulutuksessa ja laatujen kehittämisessä. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 7)

4.1 Laatuluokat

Sahatavarat jaetaan laatuominaisuuksien perusteella 4 päälaatuluokkaan, jotka ovat A, B, C ja D. A on korkein laatuluokka, joka sisältää tuotannosta lankeavan osuuden laatuja A1-A4. B- ja C- luokkia ei ole jaettu alalaatuihin. D on alin laatuluokka, jonka alaraja on määritelty sanallisesti ilman yksityiskohtaisia taulukkoarvoja. D-laadussa sallitaan kaikkia puussa esiintyviä ominaisuuksia ilman rajoituksia. Sahatavarakappaleen tulee kuitenkin pysyä koossa ja terän tulee olla koskettanut kaikkia sivuja. D-laatusissa sivulaudoissa sallitaan 1/3 kappaleen pituudesta pintaa, jota sahanterä ei ole koskettanut. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994,16)

4.2 Sahatavaran laatuun vaikuttavien ominaisuuksien määritelmät ja mittaustavat

4.2.1 Oksat

Oksaisuus on yleisin sahatavarakappaleen laatuluokan määräävä ominaisuus. Oksien vaikutus laatuun sekä niiden koon määrittystapa perustuu oksien muotoon, niiden sijaintiin kappaleessa sekä toisiinsa nähden ja oksien laatuun.

Pyöreä ja soikea oksa on sahatavarakappaleen lappeessa tai syrjässä sijaitseva poikkisahattu oksa. Sarvioksa on lappeessa oleva halkaistu oksa, joka ulottuu syrjään saakka. Kasvavissa puissa tapahtuneiden latvamurtumien yhteydessä voi syntyä pystyoksa tai poikaoksa. Tämä luokitellaan kuten sarvioksa. Lehtioksa on lappeessa sijaitseva halkaistu oksa, joka ei ulotu syrjään saakka.

Sijainnin perusteella oksat jaetaan lapeoksiin, syrjäoksiin ja särmäoksiin. Särmäoksa on syrjän ja lappeen leikkauskohdassa oleva oksa. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 50,51,)

Ryhmäoksiksi lasketaan vähintään 4 yli 12 mm:n oksaa, jotka sijaitsevat kappaleessa samalla 150 mm:n osuudella pintalappeella ja syrjillä. Mikäli oksia ei erota toisistaan selvä puun syymuodostelma, luetaan ne yhdeksi oksaksi ja mitataan sen mukaisesti. Hajaoksat ovat hajallaan olevia oksia, jotka eivät muodosta oksaryhmiä. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 50,51)

Tuoreen oksan piiristä on vähintään $\frac{3}{4}$ kasvanut kiinni ympäröivään puuaineeseen, eikä ole lahon vioittama. Kuivan oksan elintoiminta on lakannut kasvavassa puussa. Kuiva oksa voi olla kokonaan tai osittain kiinnittynyt ympäröivään puuainekseen tai irti siitä. Musta oksa on tummanvärinen kuivaoksa ja helmioksa on hyvin pieni, terve tai kuivaoksa, jonka läpimitta on korkeintaan 7 mm. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 50,51)

Pyöreän ja soikean lapeoksan koko määritellään oksan suurimman ja pienimmän läpimitan keskiarvona. Sarvioksan lappeella olevan oksan koko lasketaan oksan keskeltä mitatun pituuden ja samoin keskeltä mitatun leveyden summana, joka jaetaan 3:lla. Syrjässä oleva oksan osa mitataan kuten syrjäoksa. Lehtioksan koko lasketaan sen keskeltä mitatun pituuden ja keskeltä mitatun leveyden summana, joka jaetaan 6:lla. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 50,51)

Syrjäoksan koko mitataan vain kohtisuorassa suunnassa kappaleen pituussuuntaan nähden. Lappeella oleva oksan osa mitataan ja luokitellaan kuten vastaava lapeoksa. särmäoksan syrjällä oleva osa mitataan ja arvostellaan syrjäoksana.

Laaduissa A4-C ei oteta huomioon 10 mm ja sitä pienempiä terveitä ja kuivia oksia eli helmioksia. Laaduissa A ja B tulee oksien olla kiinteitä ja A-laadun pintalappeessa eikä syrjissä sallita laho-oksia.

Oksien kompensointisääntö sanoo, että mikäli oksakoko on pienempi kuin kyseisen laadun taulukkoarvo, sallitaan suurempi lukumäärä oksia. Taulukon

oksakokojen yhteissummaa mm:ssä (= oksien lukumäärä x läpimitta) ei minkään oksatyypin osalta saa kuitenkaan ylittää. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 50,51)

Sahatavarakappaleet, joissa on 15 mm tai pienempiä irto-oksia tai oksanreikiä, luokitellaan laaduksi C. Suurempia irto-oksia tai reikiä sisältävät kappaleet luokitellaan laatuun D. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 26)

4.2.2 Halkeamat

Kuivumishalkeama on kuivumisen aiheuttamista jännityksistä kappaleeseen syntynyt halkeama. Se voi olla kappaleen pituussuuntaan nähden suora tai vino riippuen puuaineen syyrakenteesta. Kuivumishalkeaman syvyys ja leveys ovat useimmiten suoraan verrannollisia sen pituuteen. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 53)

Sydänhalkeama on puun keskustasta lähtevä, säteensuuntainen halkeama, joka syntyy sydänpuuhun sisäisten jännitysten aiheuttamana. Sydänhalkeama mitataan ja luokitellaan kuten kuivumishalkeama.

Rengashalkeama on vuosilustojen kanssa samankeskinen halkeama. Sen voi joskus havaita vastakaadetun puun poikkileikkauspinnassa. rengashalkeama mitataan ja luokitellaan kuten kuivumishalkeama. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 53)

Halkeaman pituus, P, ilmaistaan prosentteina sahatavaran pituudesta $(A+B)/$ pituus $\times 100 = P \%$, jossa A + B on haljenneen osan pituus. Laatuluokan määrittelyssä mitataan halkeaman tai peräkkäisten halkeamien yhteispituus, ja ilmaistaan sen määrä prosentteina kappaleen kokonaispituudesta. Alle 100 mm:n pituisia halkeamia ei oteta huomioon. Luokiteltaessa vierekkäisiä yhdensuuntaisia kuivumishalkeamia, ratkaisee laadunmäärittämisessä haljenneen osan pituus tai haljenneiden osien yhteispituus. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 28)

Särmän ylittäviä halkeamia ei laadussa A sallita. Lämpimeneviä halkeamia ei sallita laaduissa A ja B. Laadussa C saa esiintyä alle 100 mm pituisia läpimeneviä halkeamia. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 28)

4.2.3 Vajaasärmä

Vajaasärmäksi nimitetään sitä osaa sahatavaran pinnasta, jota sahanterä ei ole koskettanut. Se mitataan kappaleen nimellimitan ja sahanterän koskettaman pinnan mitan erotuksena pinalappeelta ja syrjiltä. Vajaasärmän määrä ilmaistaan prosentteina kappaleen pituudesta sekä paksuudesta ja millimetreinä pinalapteen puolelta. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 54)

Taulukkoarvojen lisäksi sallitaan 3 mm:n vajaasärmä. Vajaasärmää, joka ulottuu paksuuden puoliväliin ja on pituudeltaan korkeintaan kappaleen levyinen, saa esiintyä korkeintaan 3 %:ssa kappaleluvusta laaduissa B ja C. Särmävauriot, jotka ylittävät sallitut mittapoikkeamat, luokitellaan kuten vajaasärmä. Pinnassa olevaa kuorta sallitaan vain laadussa D. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 54)

4.2.4 Pihkakolo, kaarnaroso ja koro

Pihkakolo on kahden vuosiluston välissä oleva tavallisesti pihkan täyttämä pitkänomainen ontelo. Sen koko määritellään pituutena millimetreissä kappaleen pituussuunnassa.

Puuaineen sisälle jäänyt kuori muodostaa kaarnarosan. Se syntyy esimerkiksi juuripoimun umpeen kasvamisesta tai puulle aiheutuneen vahingon kylestymisestä. Kaarnaroso mitataan kuten pihkakolo. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 55)

Koro on puun rungossa oleva, jossain määrin kylestynyt syvennys, joka on aiheuttanut kasvavan puun vioittumisesta. Kylestymän puusyyt ovat usein epäsäännöllisiä ja sen yhteydessä voi esiintyä useimmiten runsaspihkaisuutta. Koro mitataan kuten pihkakolo. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 55)

Laaduissa B ja C ei oteta huomioon alle 20 mm:n pituisia pihkakoloja. Mikäli pihkakolot, kaarnarosot ja korot ovat lyhyempiä kuin kullekin laadulle taulukossa ilmoitettu suurin pituus, sallitaan niitä suurempi lukumäärä. Taulukoissa esitettyjä yhteispituuksia ei kuitenkaan saa ylittää. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 28)

4.2.5 Vinosyisyys

Vinosyisyydeksi kutsutaan puun syiden poikkeamaa sahatavaran pituussuunnasta. Poikkeama johtuu kasvukierteisyydestä, mutkasta tai puun suuresta kapenemisesta. Vinosyisyyden tarkkaan mittaukseen on syytä käyttää mekaanista apuvälinettä. Syypoikkeaman suuruus ilmaistaan suhteena kappaleen pituussuunnan suuruuteen. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 55)

4.2.6 Latvamurtuma

Latvamurtuma syntyy, kun kasvavan puun latva murtuu, mutta pituuskasvu jatkuu uudesta latvakasvaimesta. Tästä aiheutuu murtokohdan ympäristöön syyhäiriöitä ja vian suuruus on suhteessa murtuman läpimittaan. Mikäli viasta aiheutuu pysty- tai poikaoksa, mitataan ja luokitellaan latvamurtumana. Poikkeama mitataan näkyvään tai oletettuun ytimeen nähden. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 56)

4.2.7 Lyly

Lyly on puuhun muodostunut muusta puuaineesta poikkeava syykokoomus, jonka tarkoituksena on korvata runkoon kohdistunut epätavallinen rasitus. Sahatavaraa laadutettaessa arvioidaan lylyn osuus prosentteina koko kappaleen tilavuudesta. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 56)

4.2.8 Pihkaisuus, vesisilo ja sienivauriot

Pihkaisuudella tarkoitetaan epätavallisen runsaasti pihkaa sisältävää puuta, joka on tummempaa kuin normaali puuaine. Pihkaisuuden määrä arvioidaan prosentteina koko kappaleen tilavuudesta. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 57)

Vesisilolle on ominaista puun koossapysymisen heikkeneminen. Sitä esiintyy useimmiten juovina tai täplinä pääasiassa yli-ikäisissä puissa. Vesisilon määrä arvioidaan prosentteina kappaleen koko tilavuudesta.

Erilaiset home-, sinistäjä- ja lahottajasienet voivat vahingoittaa puuta ja aiheuttaa eriasteisia värivikoja. Tuoreessa sahatavarassa tai kuivauksen yhteydessä esiintyvä pinnallinen homesieni häviää kappaleesta aiheuttamatta syvemmälle ulottuvia värinmuutoksia. Tukkinisistymän aiheuttaa sinistäjäsieni, josta voi johtua puuaineeseen värinmuutoksia tukkien korjuu- ja varastointivaiheessa. Sahatavaran laadutuksessa sinistymän laajuus arvioidaan prosentteina kappaleen tilavuudesta. Laho voi olla sienten tai bakteerien aiheuttamaa, ja se jaotellaan kovaan ja pehmeään lahoon. Myös lahon määrä arvioidaan prosentteina kappaleen koko tilavuudesta. Pehmeää lahoa ei sallita luokissa A, B ja C. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 57)

4.2.9 Muotoviat

Lapevääryys on lappeen pituussuuntainen taipuma. Taipuman suuruus mitataan kaarevimman kahden metrin matkalta ja ilmaistaan suurin poikkeama vaakatasosta millimetreinä. Syrjävääryys on syrjän pituussuuntainen taipuma. Se mitataan samalla lailla kuin lapevääryys. Kuperuus on kappaleen poikkisuuntaista poikkeamista tasosta. Mittaus tehdään kappaleen poikkisuunnassa ja kuperuus ilmaistaan prosentteina kappaleen leveydestä. Kierous on kappaleen kierremäinen poikkeama tasosta. Mittaus tehdään huonoimman kahden metrin matkalta pintalapetta kohti, ja suurin poikkeama ilmaistaan prosentteina kappaleen leveydestä. (Pohjoismainen Sahatavara, 1994, 58)

Tasaisesti kappaleen koko pituudella esiintyvää lapevääryyttä ja kieroutta ei oteta huomioon 25 mm ja ohuemmissa tavaroissa, elleivät ne johdu lylystä.

5 SITKAKUUSEN KUIVAAMINEN

5.1 Yleistä sitkakuusesta

Sitkakuusi (*Picea Sitchensis*) on meri-ilmaston puulaji. Sitkakuusi kasvaa luonnonvaraisena Amerikan länsirannikolla kapealla, runsassateisella rannikkokaistaleella Alaskasta Kaliforniaan, jonka eteläosissa sitä tavataan vain vuoristossa. Sitkakuusi esiintyy tuoreissa, runsasravinteisissä metsissä, rantadyyneillä, hiekkaisilla jokirannoilla, kallioiden valuvesijuonteissa ja rämeillä. (Sitkakuusi, 2002)

Sitkakuusen puuaines on kevyttä ja melko lujaa, mekaaniset ominaisuudet ovat painoon nähden sangen korkeat. Sen tähden se on hyvin suosittu puulaji lentokone teollisuudessa. Sitkakuusen työstö ja pintakäsittely ovat helppoa ja vaivatonta. Käsiteltävyydessään se muistuttaa valkokuusta. Myös sen viilutus on sangen helppoa. (Sitkakuusi, 2002)

Sitkakuusella on vaikea erottaa sydänpuuta ja pintapuuta. Pintapuu on paksu ja hieman vaaleampi kuin sydänpuu, joka on vaalean punertavan ruskeaa. Vuosilustot ovat selvät, koska kevätpuu on vaaleampaa kuin kesäpuu. Ulkonäöltään puuaines on keskihienoa ja yhtäläistä. (Sitkakuusi, 2002)

Sitkakuusen puuaineksen täydellinen kuivuminen on nopeaa, mutta tällöin esiintyy voimakasta taipumusta halkeiluun ja kieroutumiseen. Tämä aiheuttaa sen, että lautoja ja pienimittaista sahatavaraa valmistettaessa puutavara tulisi kuivata varovasti. Puuaines kutistuu kuivuessaan melko voimakkaasti. Sitkakuusi ei ole säänkestävää ja sen kyllästys on vaikeaa. Hyönteiset pystyvät helposti vahingoittamaan sitä. (Sitkakuusi, 2002)

5.2 Sitkakuusen kuivattavuus

5.2.1 Sahatavaran suoruus kuivauksissa

Puun syiden kierteisyys, jota sahatavaralla nimitetään vinosyisyydeksi, on keskeinen syy sahatavaran kieroutumiseen kuivauksessa. Myös jotkin muutkin kasvavan puun kannalta hyvät ilmiöt, kuten reaktiopuu ja epäsymmetrinen oksisto, johtavat sahatavarassa haitallisiin muodonmuutoksiin, kuten syrjä- ja lapevääryyteen, kierouden lisäksi. (High Temperature Drying, 2005)

EU:n järjestämässä Straight-projektissa tutkittiin menetelmiä, joilla sahatavaran suoruutta voidaan parantaa. Hanke keskittyi pääosin kuivauksessa tehtäviin toimiin. Projektin päätavoite oli löytää keinoja kuusi- ja sitkakuusisahatavaran suoruuden parantamiseksi. Straight-projektissa tutkittiin vain kuusen ja sitkakuusen dimensiota 50 x 100 mm. (High Temperature Drying, 2005)

Suoristaminen kuivauksen keinoin perustuu siihen, että sahatavaran suoraksi painamisesta tai kiertämisestä syntyvät jännitykset venyttävät puuta ja tasaavat siten puun luonnollisia pituuskuistumaeroja sekä lisäävät suoruutta. Se, kuinka hyvin ja kuinka kauan sahatavara pysyy suorana, riippuu siitä, miten pysyvää viruminen on. (High Temperature Drying, 2005)

Yleisesti osa virumasta on palautuvaa etenkin puun kosteuden vaihdellessa. Näin ollen on odotettavissa, että puun pitäminen suorana kuivauksen aikana ei takaa sahatavaran suoruutta käytössä. Viruman osittainen palautuminen johtaa muotovikoihin. Kierrettäessä puuta kuivauksen aikana kieroutumistaipumukseen nähden vastakkaiseen suuntaan palautuu tavara optimitilanteessa suoraan viruman jälkeen. (High Temperature Drying, 2005)

Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että sahatavaran yläpuolinen kuormitus kuivauksen aikana parantaa sahatavaran suoruutta. Sahatavara voidaan pitää suorana kuivauksessa erilaisin rimapaketin päälle laitettavin painoin. Käytettyjä ratkaisuja ovat mm. erilaiset betonipainot. Ne voivat olla betonipalkkeja tai levyjä tai erityisesti tarkoitukseen valettuja laattoja, joissa on syvennykset trukin sorkille.

Myös rautatiekiskoista valmistettuja painoja on käytössä. Sahat ovat investoineet yhä enemmän pneumaattisiin tai hydraulisiin kuormanpainimiin. (High Temperature Drying, 2005)

Vaikka sahatavara saadaankin pysymään suorana kuivauksen ajan, tulee tavaraan haitallisia muodonmuutoksia kuivauksen jälkeen yläpuolisen kuormituksen poistuessa. Tähän palautumisilmiöön vaikuttavat käytetty kuivauskaava ja tasaannutusolosuhteet. Avaintekijöitä ovat viruminen ja virumista edistävät olosuhteet. Yläpuolinen kuormitus vaikuttaa eniten ylimmissä rimakuorman kerroksissa, kun taas syvemmillä kuormassa kuorman oma paino pitää tavaran suorana. Tarvittava kuormitus riippuu etenkin dimensiosta, puulajista ja kuivauskaavasta. Kunkin puulajin mekaaniset ominaisuudet (kimmomoduli ja viruminen) kuivauslämpötilassa vaikuttavat jäykkyyteen ja sahatavaran tasomaisena ja suorana pitämiseen tarvittavaan voimaan. (High Temperature Drying, 2005)

Päätuloksena tässä esitettyssä tutkimuksessa on, että yläpuolisella kuormituksella voidaan vähentää muodonmuutoksia, etenkin kieroutta, mutta myös lape- ja syrjävääräyttä. Pidettäessä tavara suorana kuivauksen ajan se jää virumisen ansiosta suuremmaksi kuin ilman kuormitusta. Optimaalinen ja riittävä kuormitus riippuu paitsi puulajista, dimensiosta ja loppukosteudesta myös kuorman korkeudesta, rimojen määrästä, kuormitus-mekanismista ja kuivaamon rakenteesta. (High Temperature Drying, 2005)

Opinnäytetyöhöni liittyvissä koekuivauksissa ei käytetty missään kuivauskuormassa yläpuolisia painoja. Sahatavaran kieroutumista esiintyi silti hyvin vähän. Todennäköisesti suurin syy tähän on se, että koekappaleet olivat niin lyhyitä (1,8 m).

5.3 Sitkakuusen kuumakuivaus

Forestry comission ja Scottish enterprise teettivät tutkimuksen sitkakuusen kuumakuivaamisesta. Aikaisemmat tutkimukset sitkakuusesta osoitti, että se voidaan kuivata 18 % kosteuteen noin 63 tunnissa. Tällöin kuivauslaatu on yhtä

hyvää, ellei jopa parempaa kuin perinteisillä kuivaustavoilla. Nämä tulokset perustuvat Ranskan, Suomen ja Alankomaiden tutkimusryhmien kokeisiin. (High Temperature Drying, 2005)

Neljä kuumakuivauskoetta tehtiin HB Koeltechnikin tiloissa Almelossa Hollannissa. Kuivausajat näissä kuivauksissa olivat 76 tunnista 56 tuntiin. Materiaalin eri kohdista otetuista koepaloista selvisi, että lujuuksissa ja jäykkyyksissä on paljon vaihtelua kappaleiden kesken. Useat näytepalat, jotka kuivattiin korkeassa lämpötilassa, näyttivät heikentyneitä lujuutta ja jäykkyyttä. Osa näytepaloista pysyi hyvin samankaltaisina verrattaessa kuivattuun sahatavaraan yleensä. Nämä tulokset osoittivat, että ajastus tyypillä ja myös mahdollisesti pituudella oli vaikutusta sahatavaran rakenteellisiin ominaisuuksiin kuivattaessa. (High Temperature Drying, 2005)

Muuttuvat lujuus- ja jäykkyytulokset kirjattiin materiaalista, joka oli kuivattu Alankomaassa. Tutkimuksen tekijät päättivät, että lisää lujuus- ja jäykkyyttestejä tehdään materiaalista, jossa käytetään korkeita lämpötiloja. Tämä varmistaa, oliko heikentyminen rakenteellisissa ominaisuuksissa vai korkean lämpötilan aiheuttamia. (High Temperature Drying, 2005)

5.3.1 Muodonmuutosten arviointi

Kaikissa neljässä näytteessä keskiverto jakautuma-arvo korkeassa lämpötilassa ja kuivatussa materiaalissa oli joko hyvin samanlainen, tai hieman matalampi kuin tavallisesti kuivatussa materiaalissa. Vertailussa kaarevuus- ja taipuvuusarvot näyttivät olevan hieman muuttuvia, joskin kaikki olivat hyväksyttävissä rajoissa. (High Temperature Drying, 2005)

Neljä koetta päättyi osoittamaan, että sitkakuusi voidaan kuivata tehokkaasti käyttäen korkeita lämpötiloja alle 60 tunnissa. Muodonmuutokset olivat samanlaisia tai pienempiä kuin perinteisessä kuivauksessa. Michel Reipen TNO instituutista kertoo, että nämä kuivausajat voivat olla rajoitetumpia ja näin ollen saadaan mahdollisesti muuttuvia kosteusarvoja. Uusissa kokeissa todettiin kuitenkin kappaleiden olevan kosteusarvoltaan hyvin samanlaisia perinteisesti

kuivattujen kanssa. On huomioitava, että lopullinen kosteusarvo on vähentynyt välivaiheen ja viimeisen koepalan välillä. (High Temperature Drying, 2005)

5.4 Värimuutokset koekuivauksissa

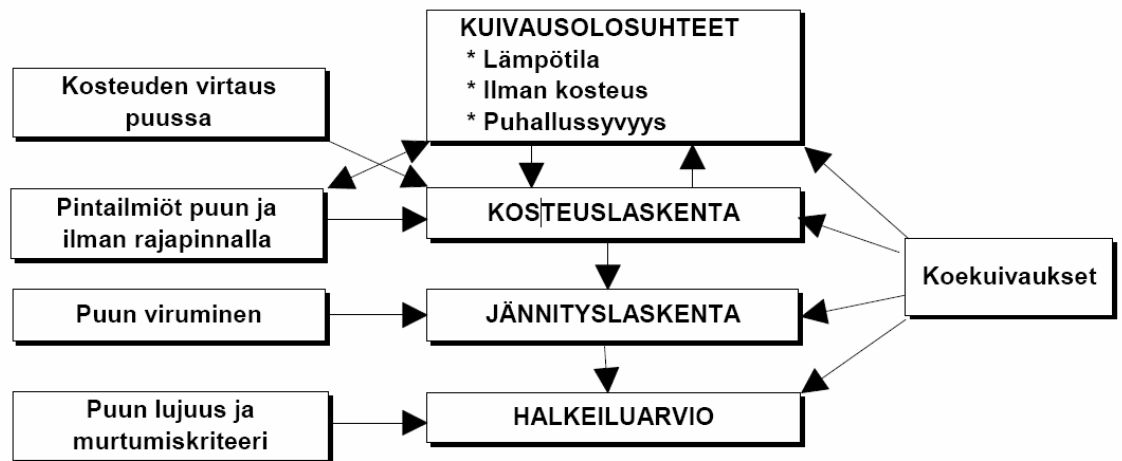
Opinnäytetyöhön liittyvät sitkakuusikuormat kuivattiin lämpötiloissa 50 - 75 °C. Nämä lämminilmakuivaukset eivät aiheuttaneet värimuutoksia sahatavaraan. On kuitenkin todettu, että kuumakuivauksissa puu värjäytyy huomattavasti tummemmaksi.

6 KUIVAUSSIMULOINTIMALLI

VTT:n kehittämä sahatavaran kamarikuivauksen simulointiohjelma Laatukamari on tehty suomalaisen havusahatavaran kuivauskaavojen kehittämiseksi. Sillä voidaan laskea käyttäjän antaman kuivauskaavan tuottama kuivauslaadullinen tulos ja näin löytää kuhunkin tarkoitukseen paras mahdollinen kuivauskaava. (Tiedotteet VTT, 2005)

Ohjelma laskee kosteus- ja jännitys jakauman sahatavaran paksuussuunnassa. Simuloinnin lähtötietoina huomioidaan sekä puun ominaisuudet (puulaji, dimensio, tiheys, alkukosteus) että kuivaamoon liittyvät suureet, joiden perusteella lasketaan kuivausolosuhteiden (ilman lämpötila ja kosteus), puhallussyvyys, puhallussuunnan vaihtoväli, rimaväli sekä ilman nopeus rimavälissä. (Tiedotteet VTT, 2005)

Laatukamarin taustalla on matemaattinen malli, joka perustuu puun kosteuden ja kuivumiskutistumisesta sahatavaran pinnalle syntyvien kuivumisjännitysten numeeriseen laskentaan. Simuloiduista kuivumisjännityksistä voidaan laajaan kokeelliseen aineistoon perustuen ennakoita sahatavaran pintalapteen halkeilu. (Tiedotteet VTT, 2005)



KUVIO 1. LaatuKamari-ohjelman taustalla olevan matemaattisen mallin rakenne



KUVIO 2. LaatuKamari-ohjelman päävalikko

Kuviossa 2 on esitetty LaatuKamari-ohjelman päävalikko, jonka kautta ohjelman käyttö tapahtuu. Tietojen syöttö jakaantuu kolmeen vaiheeseen: sahatavaran määrittelyyn, kuivaamon määrittelyyn ja kuivauskaavan syöttöön. Syötetyt sahatavaran ja kuivaamon tiedot säilyvät ohjelman muistissa automaattisesti, joten

näissä kohdissa on aina sisällä jotkin arvot. Eri kohdat voidaan käydä läpi täysin mielivaltaisessa järjestyksessä ja niihin voidaan palata milloin tahansa uudelleen.

The screenshot shows a software window titled 'Laatukamari - D:\WINKAM\MÄ63US.KAM'. The window has a menu bar with 'Valmis', 'Peruuta', 'Kuivaamo', and 'Kuivauskaava'. The main area contains a list of parameters for wood drying, each with a text input field or a dropdown menu. To the right of the parameters is a circular diagram showing a cross-section of a log with a yellow semi-circle representing the drying front. Below the diagram are two checked checkboxes: 'Ulompi poikkileikkaus' and 'Sisempi poikkileikkaus'. At the bottom right are two buttons: 'Valmis' and 'Peruuta'.

Parameter	Value
Puulaji- ja laatu	MÄNTY TYVI
Nimellispaksuus	63 mm
Nimellisleveys	150 mm
Tukin latvaläpimitta	230 mm
Sahausasete	2-exlog
Sydänpuun säde	70 mm
Tilavuuspaino	450 kg/m ³
Sydänpuun alkukosteus	35 %
Pintapuun alkukosteus	120 %
Sydänpuuosuus	75 %
Alkukosteus	57 %

KUVIO 3. Kuivattavan sahatavaran tiedot

Sahatavara-ikkunassa nähdään simuloinnin tarvitsemat perustiedot simuloinnin kohteena olevasta sahatavarasta. Sahatavaran tiedot, erityisesti alkukosteus, koskevat vastasahattua tavaraa. Sahausten jälkeen tapahtuvan esikuivumisen vaikutus otetaan huomioon määriteltäessä kuivauskaavaa.

Kokonaan tarkastelun ulkopuolelle Laatukamarissa jäävät kuivauksen aiheuttamat välittömät muodonmuutokset. Näitä ovat lape- ja syrjävääryydet sekä kieroudet. Myös näiden simulointi on mahdollista, mutta tehtyjen tutkimusten mukaan asiaan voidaan vaikuttaa kuivauskaavan avulla vain hyvin rajoitetusti. Tarkastelun ulkopuolelle jäävät myös sahatavaran pinnan kuivauksenaikaiset värimuutokset, koska ne ovat matemaattisesti hyvin vaikeasti mallinnettavissa. (Tiedotteet VTT, 2005)

Simulointituloksien vertailu aitoihin koekuivauksiin osoittaa, että tulokset pitävät melko hyvin paikkansa. Erityisesti loppukosteudet ja kosteusprofiilit kuivauksen

aikana ovat vastanneet hyvin toisiaan. Jännityksissä eroja on enemmän, mutta malli antaa silti hyvän kuvan todellisesta tilanteesta. (Tiedotteet VTT, 2005)

7 KOEKUIVAUKSET

7.1 Koelaitteisto

Kuivauksessa käytettiin Tekma Woodin valmistamaa tutkimuskuivaamaa.

Kuivaamoon mahtuvan kuorman mitat ovat 2m x 1m x 1m ja tilavuus noin 2 m³.

Laite	Tekniset tiedot
Patteri	Teho 50 kw
Puhallin	Teho 7,5 kW, kierrosluku max. 1500 1/min, kuivauksessa rajoitettu 1200 1/min
Taajuusmuuttaja Vacon 5,5CXS4G21	Puhallinkäyttö 7,5 kW
Potkuri Woods	halkaisija 900 mm, 6 siipeä, kahteen suuntaan symmetrisesti puhaltava
Sumutus jäähdytyksessä 4 kpl LN4 suuttimia	Veden paine 3 bar
Höyrynehtin Sintrol PP20	Teho 20 kW
Ilmanvaihtopeltien säätö Bernard AS50	Vääntö 500 Nm
Anturit Kuivaamon olosuhteet	2 kpl PT100 lämpötilanmittaukseen, 1 kpl kosteuden mittaukseen, 2 kpl painemittausyksiköitä
Anturit Puun olosuhteet	4 kpl lämpötilanmittauksen antureita, 8 kpl kosteuden mittausken antureita
Logiikka Siemens S7	Käyttöliittymä normaaliin PC:hen
Ohjelmisto Wintek2000	Tekma Woodin kuivaamo- ja lämpökäsittelykäyttöön suunnittelema ohjelma

KUVIO 4. Kuivaamon toimilaitteet

7.2 Koejärjestelyt ja koemateriaali

Sahatavara oli kooltaan 50 mm x100 mm ja sen pituus noin 1,8 metriä. Kappaleet rimoitettiin limittäinen niin, että koko kuivaamon pituus tuli hyödynnettyä. Jokaiseen riviin tuli kahdeksan kappaletta ja ne asetettiin kuivaukseen numero järjestyksessä siten, että yhdessä rivissä oli numerot 1 – 8, 9 – 16, 17 – 24 jne. Simuloinnissa käytettiin hyväksi suomalaisen kuusen arvoja.



KUVIO 5. Koekuivaamo

TAULUKKO 1. Sahatavaran lähtötiedot

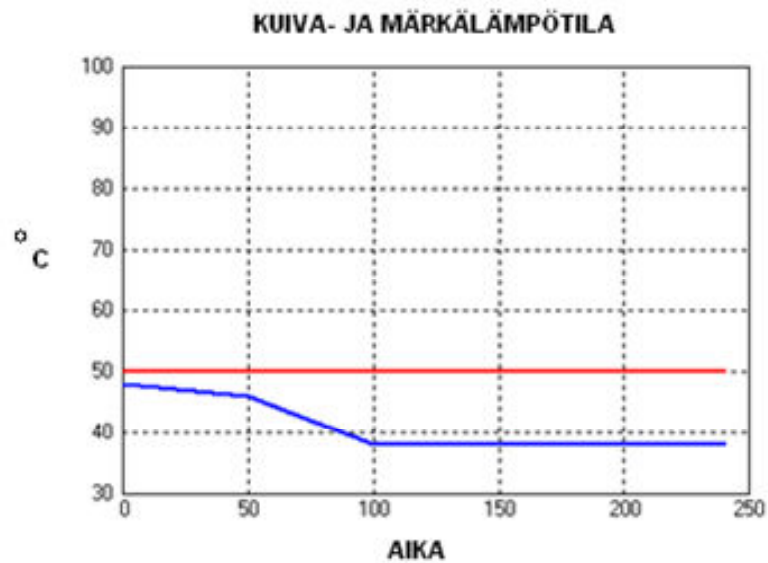
	Kuormat 1 ja 2	Kuormat 3 ja 4
Kosteuden keskiarvo %	69,66	74,76
Hajonta %	25,92	30,3
Minimi %	33,06	35
Maksimi %	148,13	167,68

7.3 Kuivaus 1.

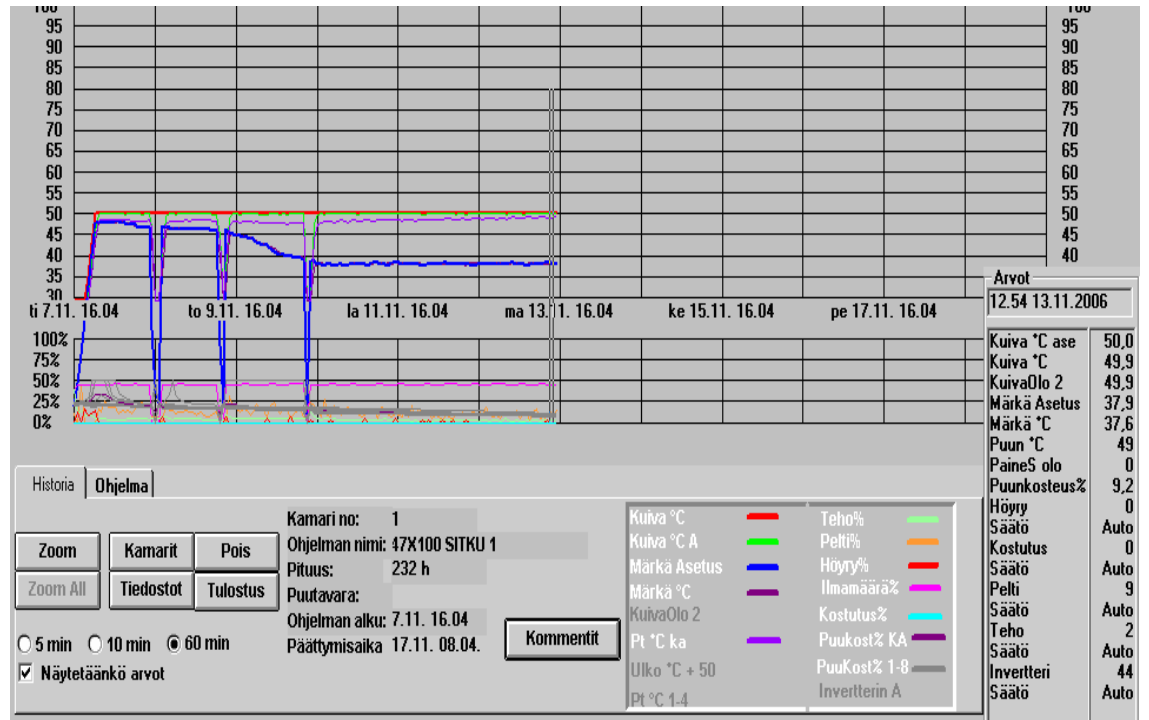
- Kuivaus lämpötila 50 °C
- Tavoitekosteus 10 % loppukosteus
- Näytteenotto 4 kertaa kuivauksen aikana
- Lopullinen kuivausaika 140 h
- Ei tasaannutusta

TAULUKKO 2. Ensimmäisen kuivauksen kaava

Aika (h)	Kuiva (°C)	Märkä (°C)	RH (%)	Tasapainokosteus (%)
0	10	7,8	74,8	15
5	50	47,8	88,4	18
17	50	47,5	87,1	17,4
42	50	46,3	81	14,8
51	50	44,3	71,9	12
54	50	42,8	65,5	10,5
61	50	40,3	55,6	8,6
69	50	38,8	50,1	7,7
71	50	38	47,4	7,3
232	50	38	47,4	7,3



KUVIO 6. Kuivaus 1:n kuivauskaava



KUVIO 7. Kuivaus 1:n kuivauksen kulku

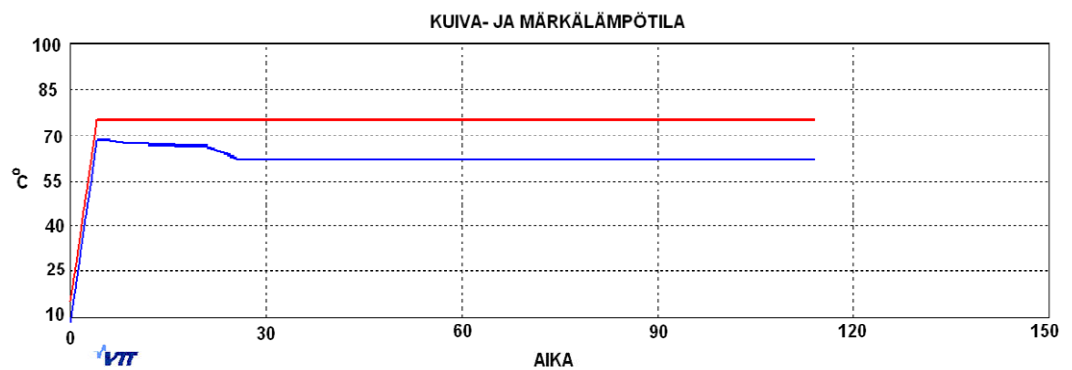
Kuivaus sujui kaavan mukaisesti ja se lopetettiin 138 tunnin kuluttua. Punainen viiva on kuiva lämpötila, joka tähän kuivaukseen asetettiin 50 °C lämpötilaan. Märkä asetusta kuvaa sininen viiva. Kuvassa näkyvät märän asetuksen rajut laskut ja nousut johtuvat siitä, että kuivaamo jouduttiin aukaisemaan ja kuorma ottamaan ulos sieltä näytteiden oton ajaksi. Kuivaamo oli auki kerrallaan noin tunnin verran.

7.4 Kuivaus 2

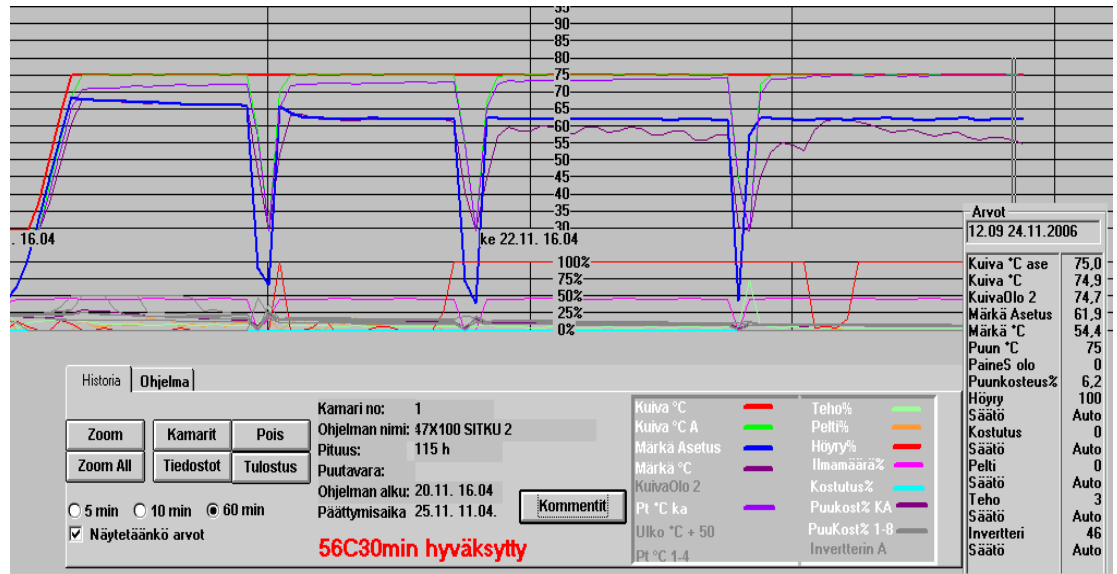
- Kuivaus lämpötila 75 °C
- Tavoitekosteus 10 % loppukosteus
- Näytteenotto 3 kertaa kuivauksen aikana
- Lopullinen kuivausaika 96 h
- Ei tasaannutusta

TAULUKKO 3. Kuivaus 2:n kaava

Aika (h)	Kuiva (°C)	Märkä (°C)	RH (°C)	Tasapainokosteus (%)
0	10	3,3	28,8	6,2
5	75	68,3	74,1	10,8
6	75	68,3	74,1	10,8
7	75	68,3	74,1	10,8
8	75	68,3	74,1	10,8
9	75	67,3	70,7	10
13	75	67,1	69,9	9,8
17	75	66,8	69,1	9,6
21	75	66,3	67,5	9,3
23	75	65,8	65,9	8,9
24	75	65,3	64,3	8,6
25	75	64,3	61,3	8,1
26	75	63,3	58,3	7,6
27	75	62,3	55,5	7,2
28	75	62	54,6	7
29	75	62	54,6	7
30	75	62	54,6	7
31	75	62	54,6	7
115	75	62	54,6	7



KUVIO 8. Kuivaus 2: kaava



KUVIO 9. Kuivaus 2. kuivauksen kulku

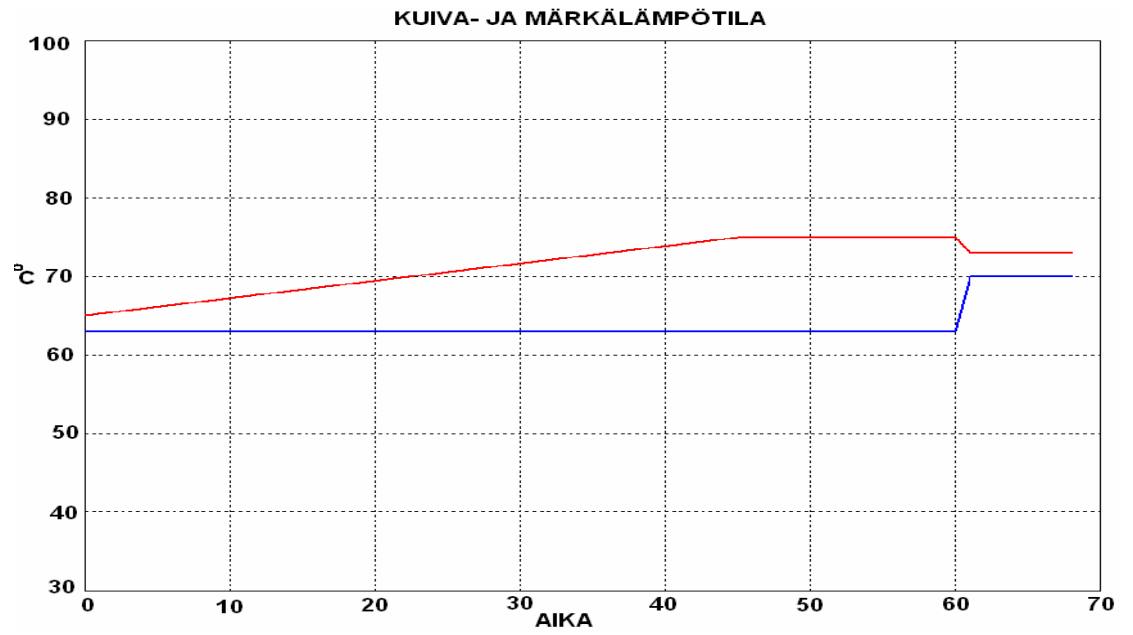
Kuivaus sujui kaavan mukaisesti ja se lopetettiin 96 tunnin kuluttua. Punainen viiva on kuiva lämpötila, joka tähän kuivaukseen asetettiin 75 °C lämpötilaan. Märkä asetusta kuvaa sininen viiva.

7.5 Kuivaus 3

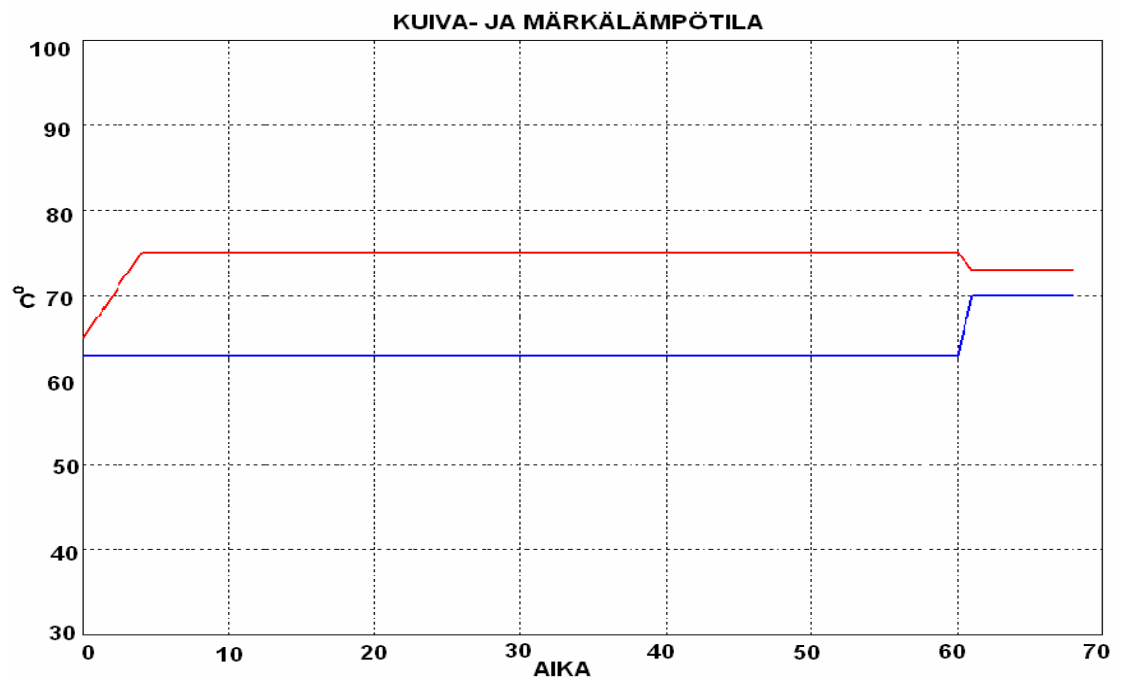
- Kuivaus lämpötila 65–73 °C
- Tavoitekosteus 16–18 % loppukosteus
- Näytteenotto 2 kertaa kuivauksen aikana
- Lopullinen kuivausaika 68 h
- Kuivauksen loputtua tehtiin 20 kappaleelle EDG:n mukainen laaduntarkastus

TAULUKKO 4. Kuivauskaava 3. kuivaus

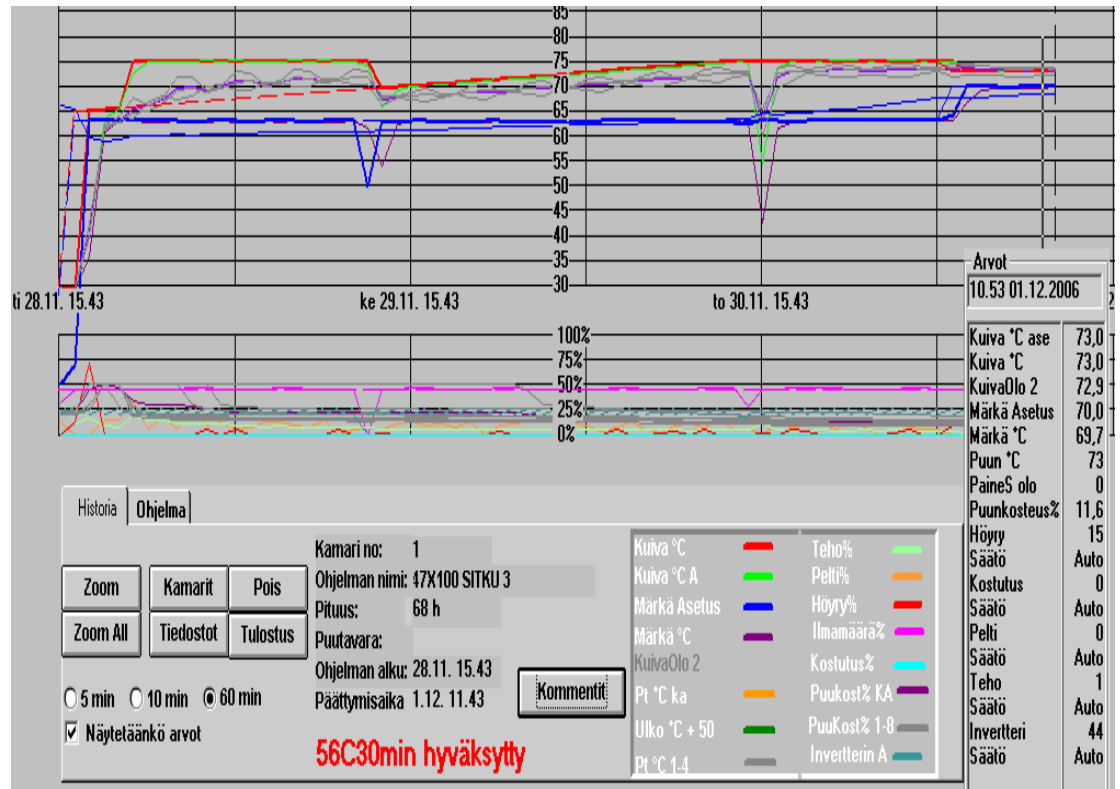
Aika (h)	Kuiva (°C)	Märkä (°C)	RH (%)	Tasapainokosteus (%)
0	65	63	90,9	17,9
45	75	63	57,5	7,5
60	75	63	57,5	7,5
61	73	70	87,5	15,4
68	73	70	87,5	15,4



KUVIO 10. Kuivauskaava 3. kuivaus



KUVIO 11. Kuivauskaava ensimmäiset 14 h. 3. kuivaus



KUVIO 12. Kuivaus 3. kuivauksen kulku

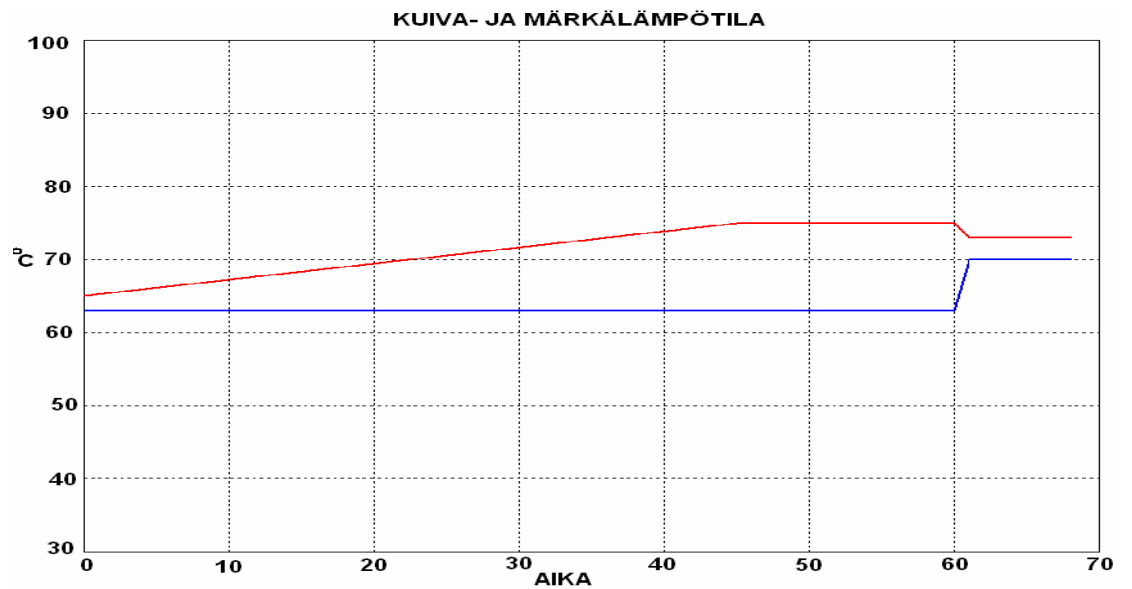
Kolmannessa kuivauksessa tapahtui kaavavirhe, jonka tuloksena kuivauksen alku poikkesi alkuperäisestä kaavasta. Kaava muutos korjattiin 14 tunnin kuluttua kuivauksen aloittamisesta. Tämän seurauksena lämpötila nousi nopeammin ja jyrkemmin kuin alun perin oli tarkoitus. Kuvasta voi seurata kuinka kuiva asetus (punainen viiva) nousee alussa nopeasti ja palaa sitten takaisin alkuperäisen kaavan kuivalämpötilaan. Tässä kuivauksessa näytekappaleiden otto tapahtui niin, ettei kuivaamo tarvinnut pysäyttää kuin 15 minuutiksi. Kuormaa ei myöskään tarvinnut ottaa kuivaamosta ulos, vaan koekappaleet otettiin kuorman päällimmäisistä kerroksista. Näytteitä otettiin kaksi kertaa kuivauksen aikana ja ne näkyvät kuvassa sinisen viivan hetkellisenä piikkinä alaspäin.

7.6 Kuivaus 4

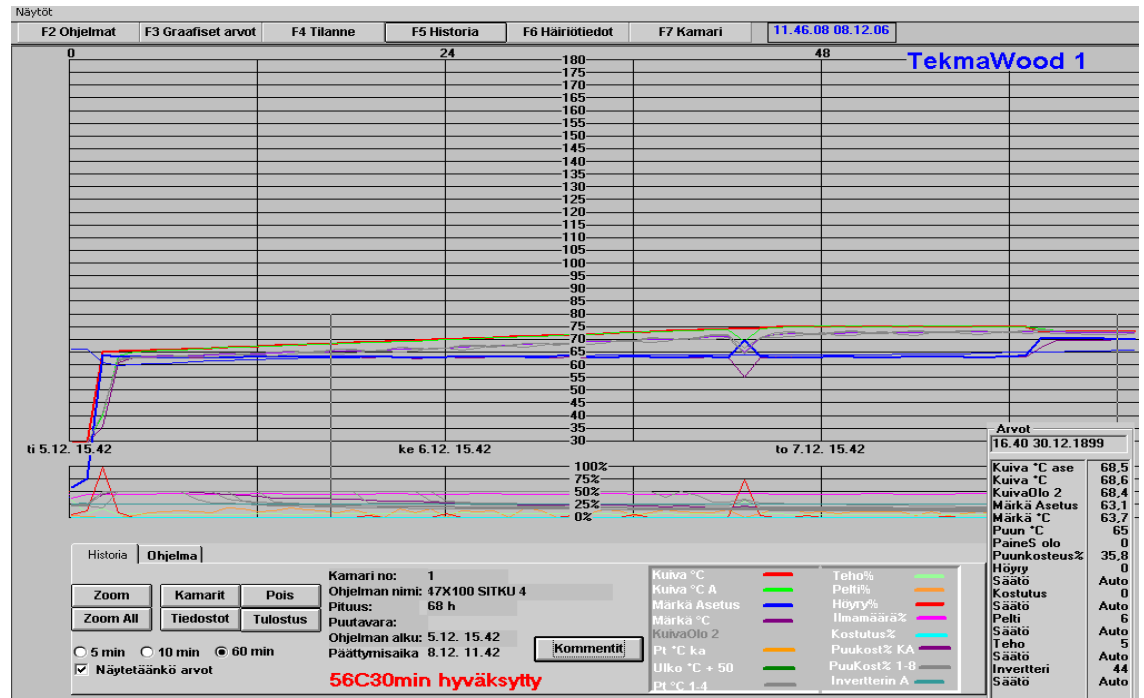
- Kuivaus lämpötila 65–73 °C
- Tavoitekosteus 16–18 % loppukosteus
- Näytteenotto 2 kertaa kuivauksen aikana
- Lopullinen kuivausaika 68 h
- Kuivauksen loputtua tehtiin 20 kappaleelle EDG:n mukainen laaduntarkastus

TAULUKKO 5. Kuivaus 4. kaava

Aika (h)	Kuiva (°C)	Märkä (°C)	RH (%)	Tasapainokosteus (%)
0	65	63	90,9	17,9
45	75	63	57,5	7,5
60	75	63	57,5	7,5
61	73	70	87,5	15,4
68	73	70	87,5	15,4



KUVIO 13. Kuivaus 4. kaava

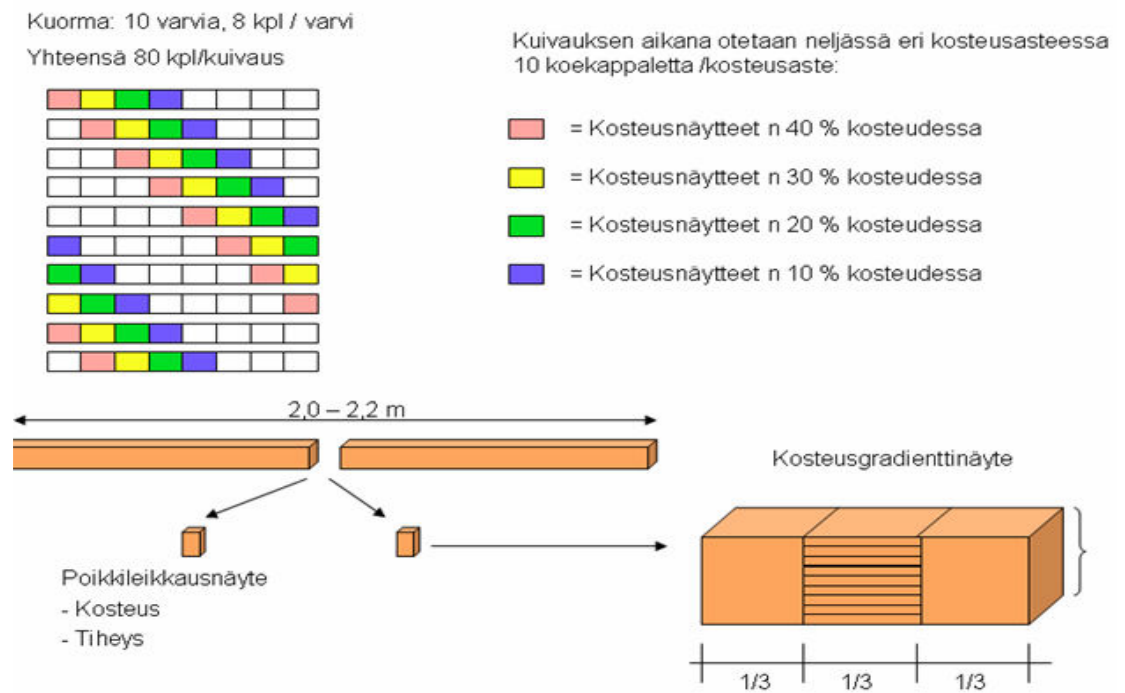


KUVIO 14. Kuivaus 4. kuivauksen kulku

Neljäs kuivaus tehtiin samalla kaavalla kuin kolmannen kuivauksen alkuperäinen kaava. Näytteitä otettiin vain kerran kuivauksen aikana ja se tehtiin samalla tavalla kuin kolmannessa eli kuivaamo pysäytettiin vain hetkellisesti.

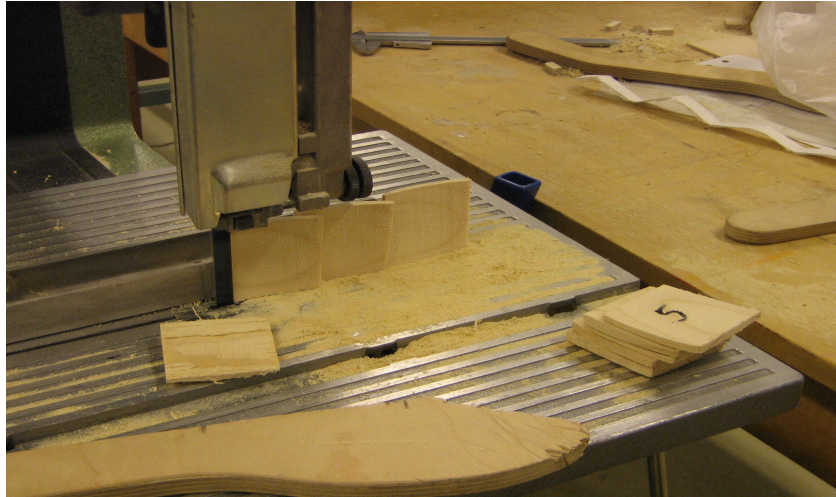
8 KOSTEUSNÄYTTEIDEN OTTO

Ensimmäisessä ja toisessa kuivauksessa koekappaleiden näytteenotto tapahtui samalla tavalla. Jokaisella näytteenottokerralla otettiin kymmenen koekappaletta. Näistä koekappaleista määriteltiin kosteusprosentti poikkileikkausnäytteestä sekä kosteusgradienttinäytteestä. Kuivauskuormat ladottiin alla olevan kuvan mukaisesti. Kuvassa näkyy myös kappaleiden kuormasta otto järjestys.



KUVIO 15. Kuorman ladonta- ja näytteenotto ohje

Näytteenotto tapahtui siten, että koekappaleesta sahattiin kaksi noin 5 cm levyistä palaa. Toinen paloista sahattiin vielä kuvan osoittamalla tavalla kolmeen osaan ja sen keskimmäisestä kappaleesta sahattiin vielä yhdeksän ohutta viipaletta. Viipaleista määriteltiin kosteusprofiili ja toisesta ehjästä palasta poikkileikkausnäyte.



KUVIO 16. Kosteusgradientti viipaleiden sahaus

Sahauksen jälkeen kaikki kappaleet punnittiin ja sen jälkeen laitettiin uuniin noin vuorokaudeksi. Tämän jälkeen kappaleista punnittiin kuivapaino. Näiden tietojen perusteella pystyttiin määrittelemään kappaleiden kosteusprosentti.



KUVIO 17. Kappaleiden punnitus

Kolmannessa ja neljännessä kuivauksessa näytteenotto tehtiin hieman eri tavalla. Kuormat ladottiin samalla tavalla kuin aikaisemmin, mutta koekappaleita otettiin 5 kuorman päällimmäisistä kerroksista. Tämä siksi, että koekappaleiden otto kuormasta olisi nopeampaa, jottei kuivaus keskeytyisi turhaan pitkäksi ajaksi. Kuivauksen loputtua, sekä kolmannessa että neljännessä kuivauksessa, otettiin 20 koekappaletta ja tehtiin niille EDG:n mukainen laaduntarkastus.



KUVIO 18. Koekappaleet uunissa



KUVIO 19. Pintakovuuden määrittäminen

9 TULOKSET

9.1 Kuivaus 1

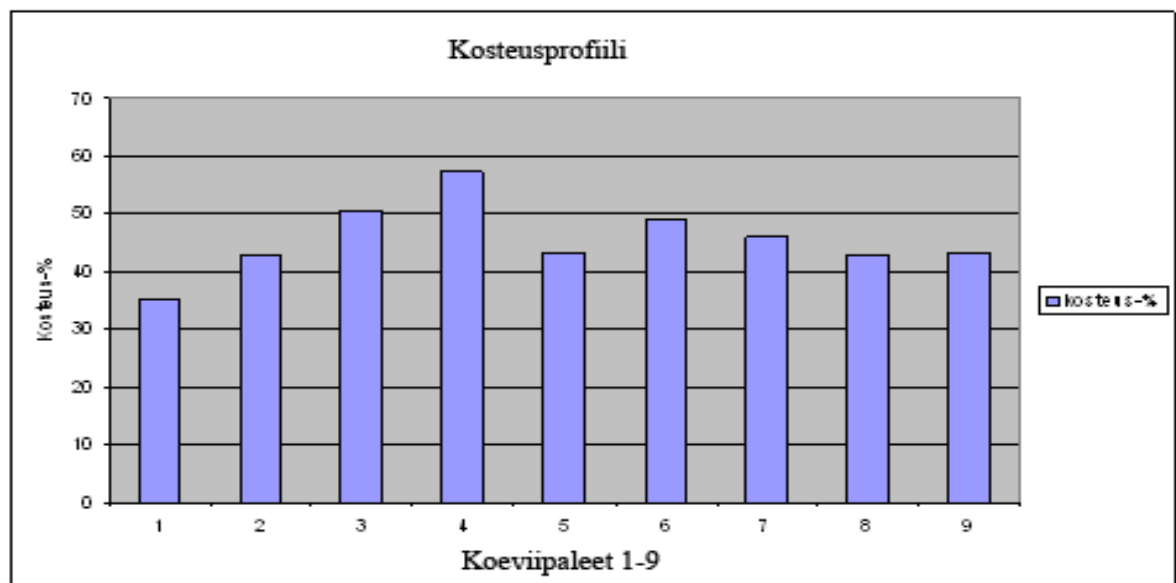
Kuorma kuivattiin 140 h 50 C° lämpötilassa. Tavoitteena oli 10 % kosteus. Kuivauksessa ei käytetty tasaannutusta. Näytteitä otettiin kolme kertaa kuivauksen aikana, sekä heti kuivauksen päätyttyä.



KUVIO 20. Kuivattu kuorma 1

9.1.1 Kosteudet 40 %:n tavoite kosteudessa

Ensimmäinen näyte-erä otettiin, kun kuivausta kulunut 22 h. Tavoite oli tehdä ensimmäinen mittaus n. 40 %:n kosteudessa. Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 45,56 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty koeviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



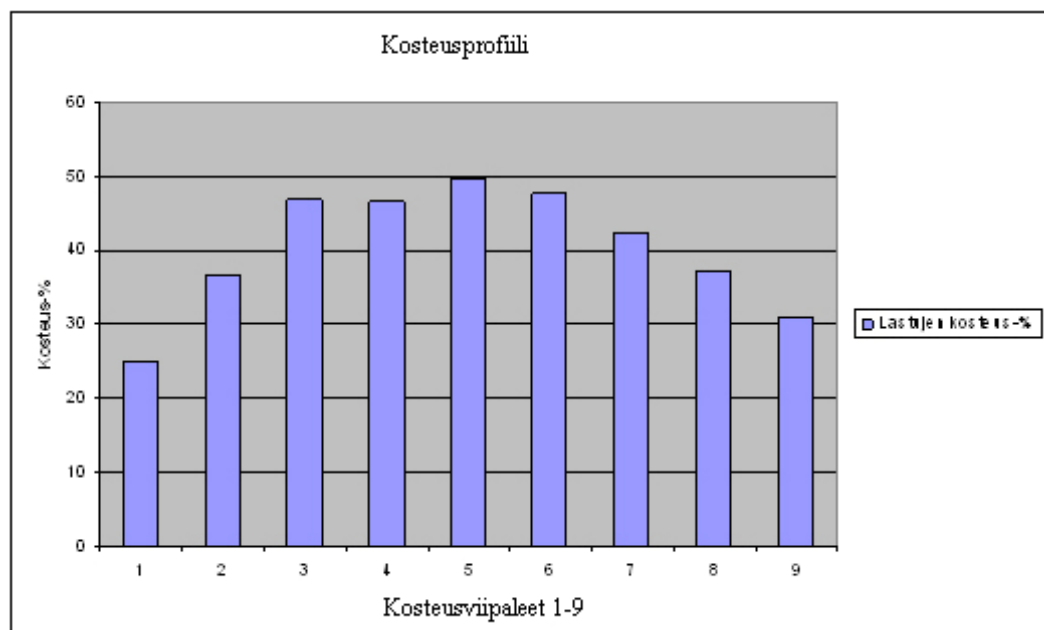
KUVIO 21. Keskiarvo kuivauksen edettyä n. 40 % kosteuteen

TAULUKKO 6. Tulokset poikkileikkausnäytteistä näyte-erässä 1

Koekpl.	Kosteus-%	mu	mo
		g	g
C1	42,1	97,5	68,6
C10	49,9	119	79,4
C19	39,7	123,5	88,4
C28	70,3	132,5	77,8
C37	52,3	111,3	73,1
C46	49,3	125,6	84,1
C55	61,8	124,4	76,9
C65	44	127,6	87,6
C64	51,1	132,4	88,6
C74	31,4	109,7	83,5
Keskiarvo	49,19		
Hajonta	11,067		
Minimi	31,4		
Maksimi	70,3		

9.1.2 Kosteudet 30 %:n tavoitekosteudessa

Toinen näyte-erä otettiin, kun kuivausta oli kulunut 40h. Tavoitekosteus näytteille oli 30 %. Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 40,36 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



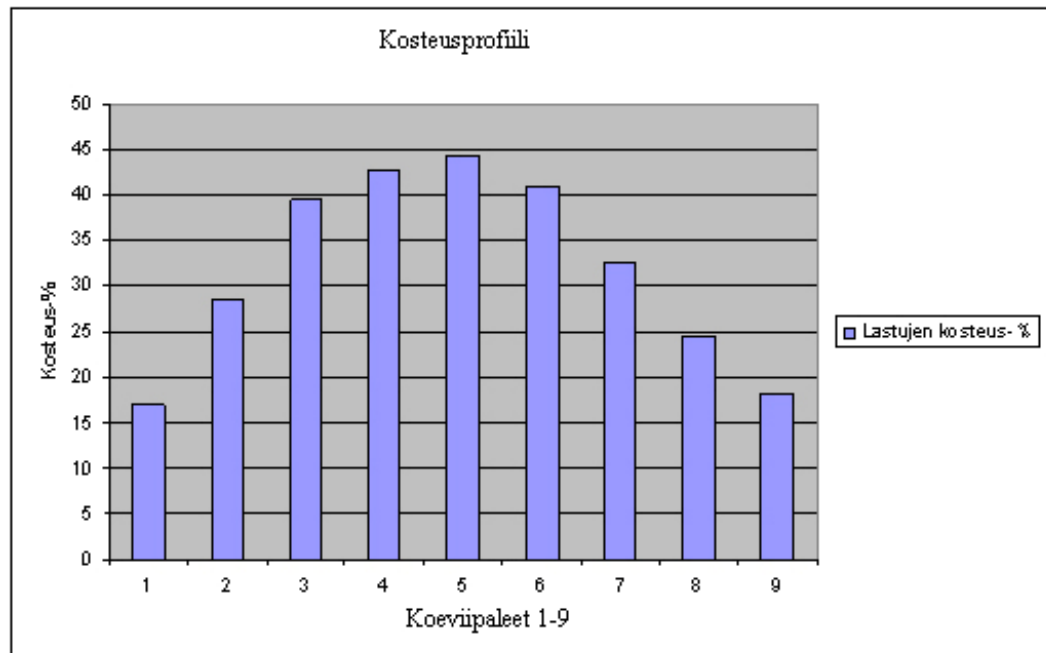
KUVIO 22. Keskiarvo kuivauksen edettyä n. 30 % kosteuteen

TAULUKKO 7. Tulokset poikkileikkausnäytteistä näyte-erässä 2

Koekpl.	Kosteus-%	m _u	m _o	Tilavuus
		g	g	mm ³
C2	33,2	87,5	65,7	205,63
C11	43	117,8	82,4	219,65
C20	45,1	111	77,1	249,7
C29	57,7	125,7	79,7	244,8
C38	35,7	111,3	82	224,64
C47	36,4	133,9	98,2	244,61
C56	47	101,8	69,3	236,9
C57	38,7	101,7	73,3	249,7
C66	43,1	143,7	100,4	239,2
C75	40,2	137,7	98,2	254,8
Keskiarvo	42,01			
Hajonta	7,04			
Minimi	33,2			
Maksimi	57,7			

9.1.3 Kosteudet 20 % tavoitekosteudessa

Kolmas näyte-erä otettiin, kun kuivausta oli kulunut 64 h. Tavoitekosteus näytteille oli 20 %. Kosteusgradientinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 32,01 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



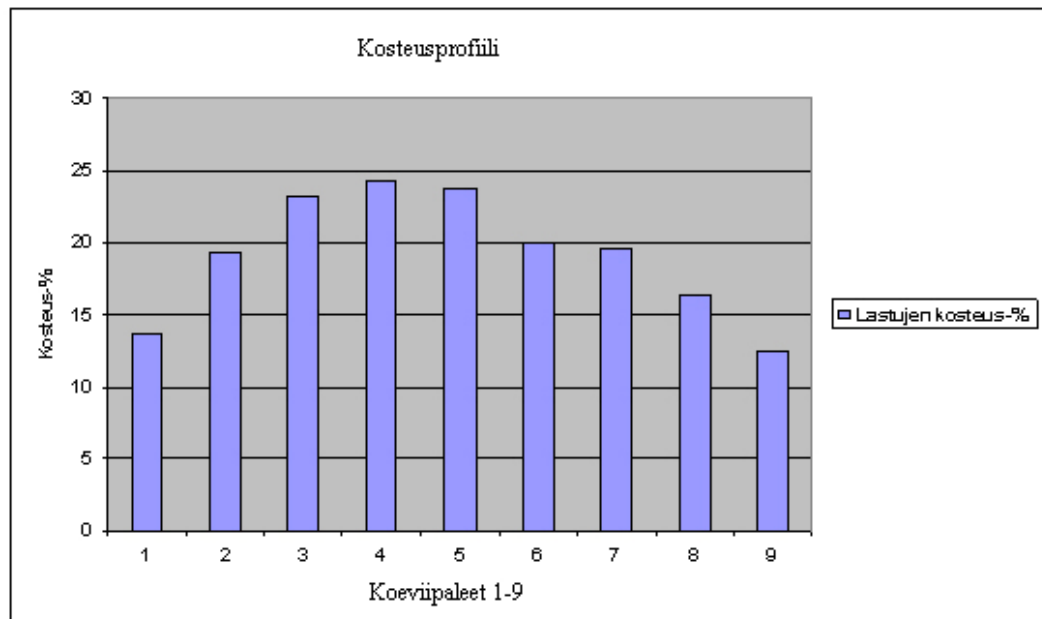
KUVIO 23. Keskiarvo kuivauksen edettyä n. 20 % kosteuteen

TAULUKKO 8. Tulokset poikkileikkausnäytteistä näyte-erästä 3

Koepl.	Kosteus-%	m_u	m_o	Tilavuus
		g	g	mm ³
C3	35,1	129,7	96	234,42
C12	19,5	91,9	76,9	225,32
C21	25,5	116,1	92,5	227,53
C30	39,8	111	79,4	252,14
C39	40,7	118,6	84,3	257,5
C48	31,7	100,9	76,6	239,9
C49	29,5	106,1	73,7	259,49
C58	33,1	98,1	81,9	239,7
C67	25,2	151,5	121	239,7
C76	40,2	125,9	89,8	234,62
Keskiarvo	32,03			
Hajonta	7,19			
Minimi	19,5			
Maksimi	40,7			

9.1.4 Kosteudet 10 % tavoite kosteudessa

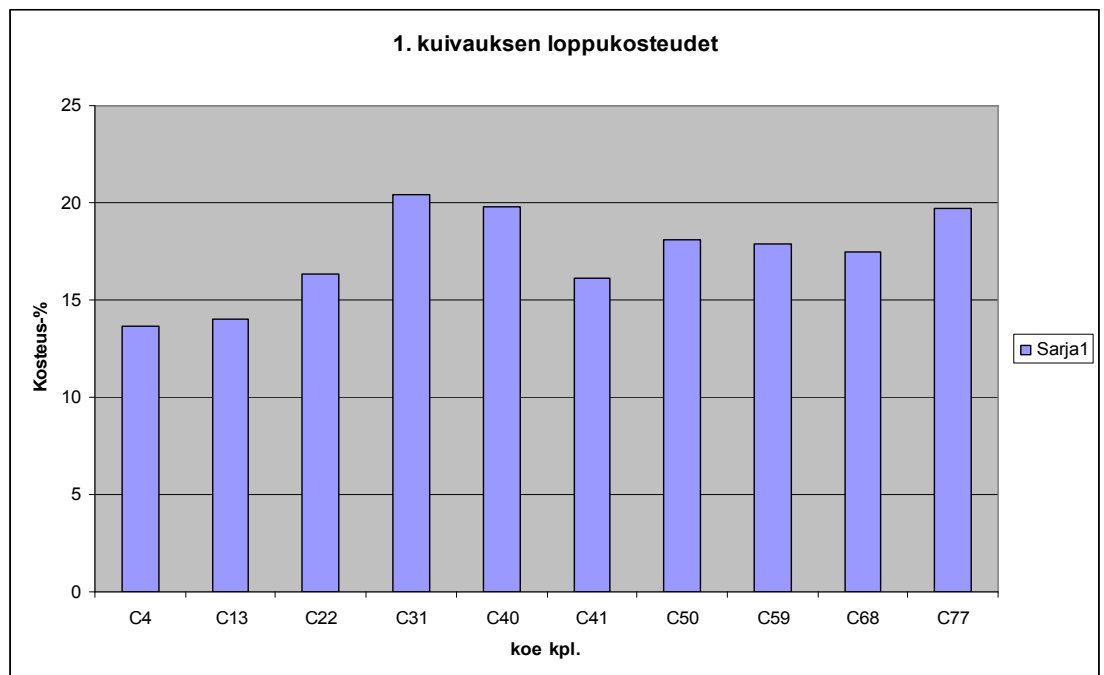
Neljäs näyte-erä otettiin kuivauksen loputtua. Kuivaus kesti kokonaisuudessaan 138 h ja tavoitekosteus oli n. 10 %. Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 19,08 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



KUVIO 24. Keskiarvo kosteus kuivauksen edettyä n. 10 %:n kosteuteen

TAULUKKO 9. Tulokset poikkileikkausnäytteistä tavoitekosteudessa 10 %

Koekpl.	Kosteus-%	m_u g	m_o g	Tilavuus mm ³
C4	13,67	108,1	95,1	242,4
C13	14	93,4	80,9	227,86
C22	16,32	134	115,2	249,6
C31	20,4	97,4	81,9	239,9
C40	19,8	93,6	78,1	239,9
C41	16,15	138,1	118,9	257,1
C50	18,13	83,4	70,6	235
C59	17,9	121,1	102,7	225,32
C68	17,5	112,6	95,8	254,9
C77	19,7	137,9	115,2	259,9
Keskiarvo	17,357			
Hajonta	2,33			
Minimi	13,67			
Maksimi	20,4			



KUVIO 25. Ensimmäisen kuivauksen loppukosteudet poikkileikkausnäytteistä koekappaleittain

9.2 Kuivaus 2

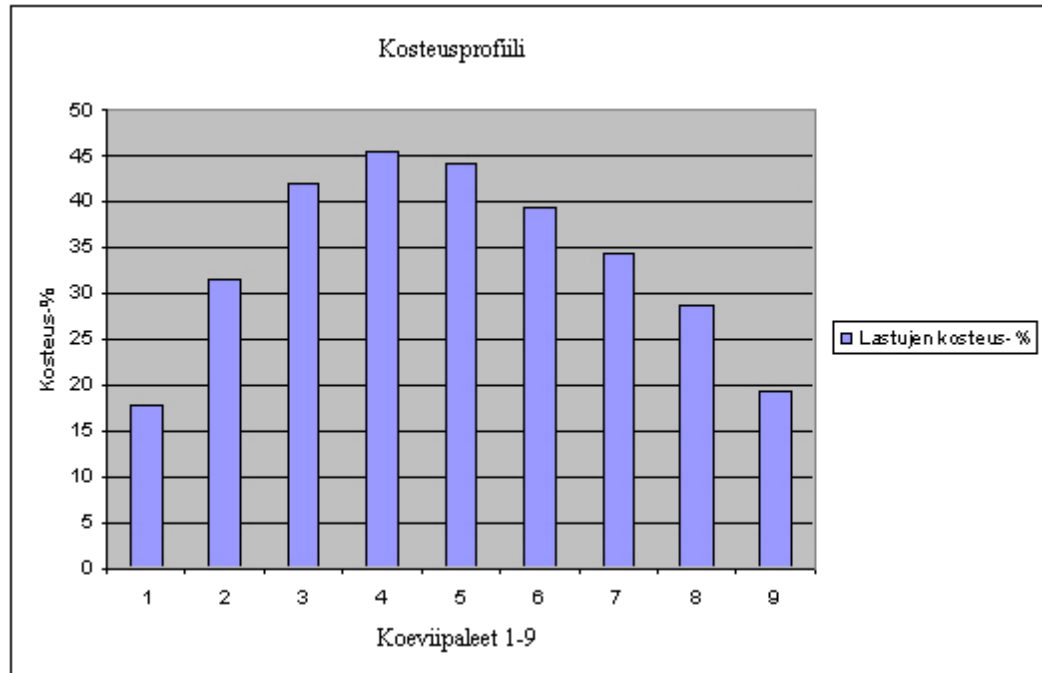
Kuorma kuivattiin 96 h 75 C° lämpötilassa. Tavoitteena oli 10 % kosteus. Kuivauksessa ei käytetty tasaannutusta. Näytteitä otettiin kolme kertaa kuivauksen aikana, sekä heti kuivauksen päätyttyä.



KUVIO 26. Kuivattu kuorma 2

9.2.1 Kosteudet 40 %:n tavoitekosteudessa

Kun kuivausta oli kulunut 22 h, otettiin ensimmäinen näyte-erä. Tavoite oli tehdä ensimmäinen mittaus n. 40 %:n kosteudessa. Kosteusgradientinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 33,6 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



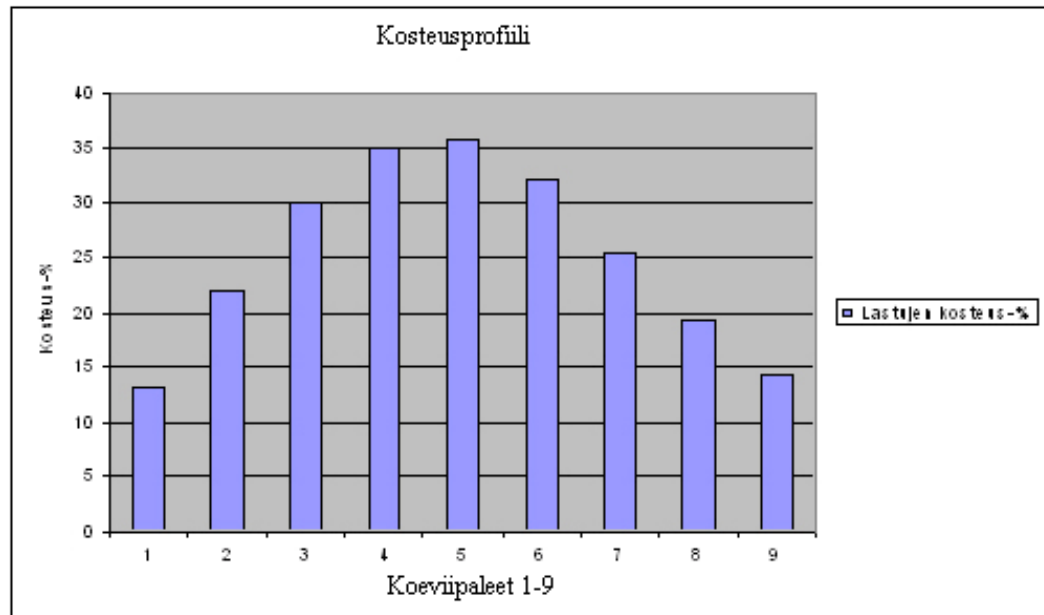
KUVIO 27. Keskikosteus kuivauksen edettyä n. 40 %:n kosteuteen

TAULUKKO 10. Poikkileikkausnäyte tulokset näyte-erä 1

Koekpl.	Kosteus-%	mu	m0	Tilavuus mm ³
		g	g	
D1	21,16	98,5	81,3	227,53
D10	35,06	135,2	100,1	223,11
D19	33,19	120,4	90,4	232,7
D28	44,88	104,6	72,2	235
D37	39,56	89,6	64,2	225,32
D46	31,83	102,3	77,6	227,86
D55	34,53	97,8	72,7	232,7
D64	33,17	139,3	104,6	244,5
D65	31,59	148,3	112,7	234,91
D74	22,71	100,5	81,9	234,6
Keskiarvo	32,768			
Hajonta	6,989722			
Minimi	21,16			
Maksimi	44,88			

9.2.2 Kosteudet 30 % tavoite kosteudessa

Toinen näyte-erä otettiin, kun kuivausta oli kulunut 38 h. Tavoitekosteus näytteille oli 30 %. Kosteusgradientinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 25,19 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



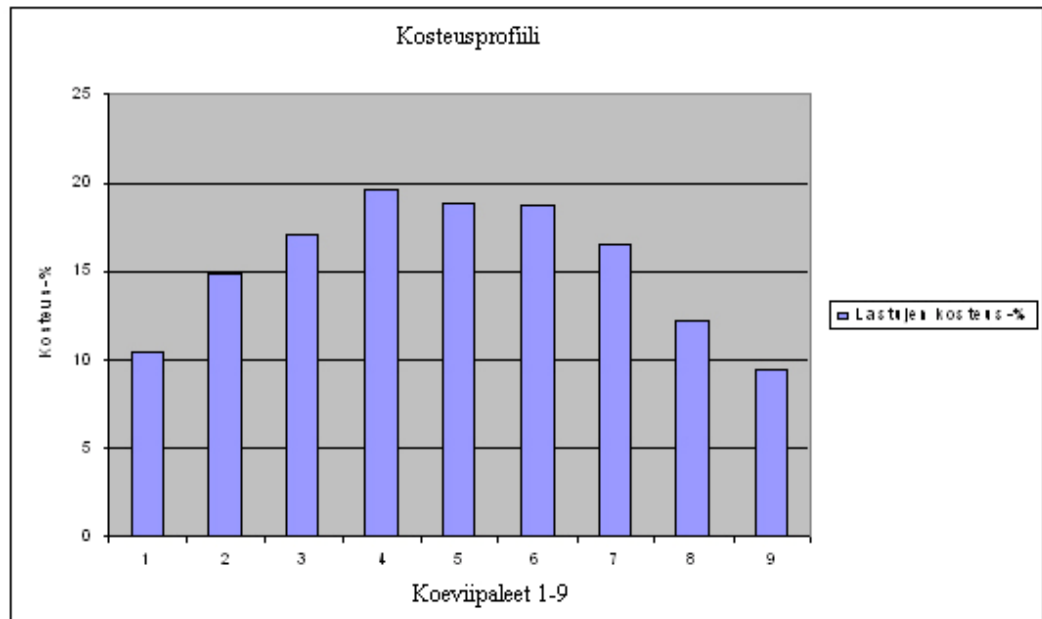
KUVIO 28. Keskiarvo kosteuden edettyä n. 30 % kosteuteen

TAULUKKO 11. Poikkileikkausnäyte tulokset näyte-erä 2

Koeopl.	Kosteus-%	mu	m0	Tilavuus
		g	g	mm3
D2	40	115,8	95,6	230
D11	24,78	111,3	89,2	218,59
D20	25,13	121,5	97,1	220,8
D29	26,7	104,4	82,4	230
D38	19,5	105,3	88,1	222,71
D47	7,22	102,5	82,7	218,36
D56	20,89	89,7	74,2	220,8
D57	20,32	106	88,1	230
D66	25,5	111,8	89,1	216,2
D75	18,16	113,2	95,8	239,2
Keskiarvo	22,82			
Hajonta	8,250521			
Minimi	7,22			
Maksimi	40			

9.2.3 Kosteudet 20 % tavoite kosteudessa

Kolmas näyte-erä otettiin, kun kuivausta oli kulunut 63 h. Tavoitekosteus näytteille oli 20 %. Kosteusgradientinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 15,3 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



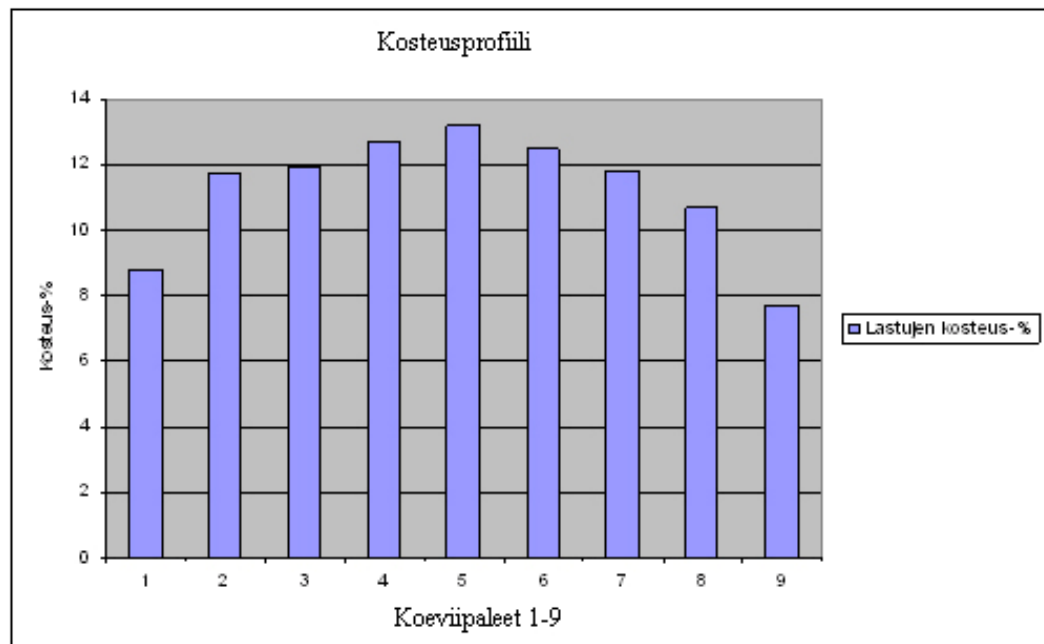
KUVIO 29. Keskiarvo kuivauksen edettyä n. 20 % kosteuteen

TAULUKKO 12. Poikkileikkausnäyte tulokset näyte-erä 3

Koepl.	Kosteus-%	mu	
		g	m0
D3	13,82	103,8	91,2
D12	12,02	96,9	86,5
D21	12,64	110,5	98,1
D30	17,19	100,2	85,5
D39	15,2	93,2	80,9
D48	14,13	96,9	84,9
D49	13,84	94,6	83,1
D58	12,6	86,7	77
D67	15,85	111,1	95,9
D76	16,41	112,8	96,9
Keskiarvo	14,37		
Hajonta	1,741092		
Minimi	12,02		
Maksimi	17,19		

9.2.4 Kosteudet 10 %:n tavoitekosteudessa

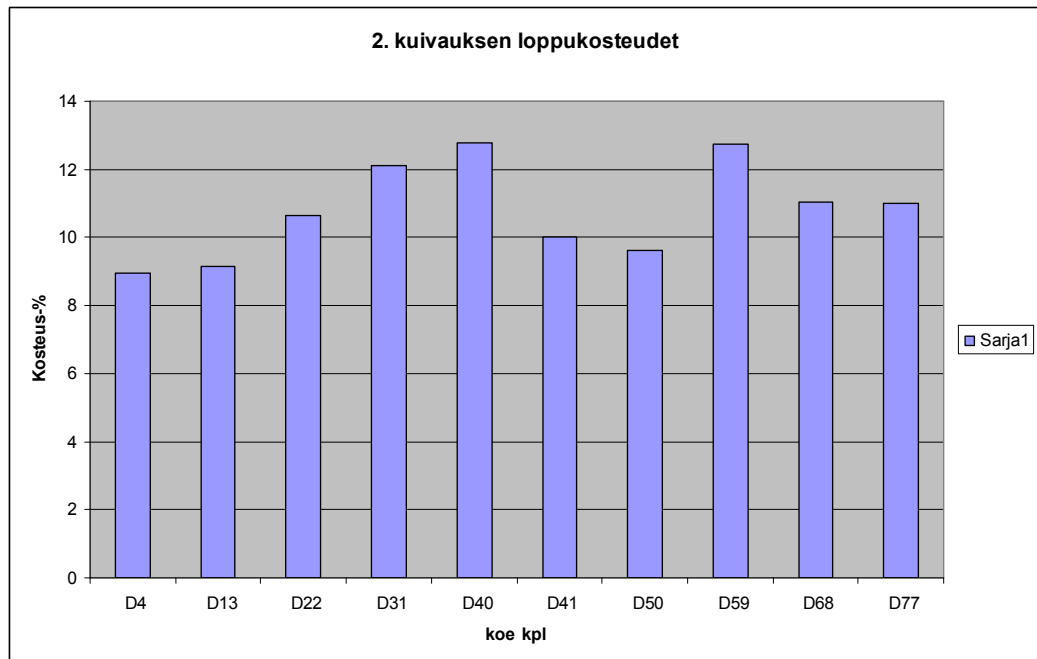
Neljäs näyte-erä otettiin kuivauksen loputtua. Kuivaus kesti kokonaisuudessaan 96 h ja tavoitekosteus oli n. 10 %. Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 11,22 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot. Kuvaajan reunoilla ovat pintaviipaleet (1 ja 9) ja keskellä keskiviipaleet.



KUVIO 30. Keskiarvo kuivauksen edettyä n. 10 % kosteuteen

TAULUKKO 13. Poikkileikkausnäyte tulokset kuivauksen loputtua

Koekpl.	Kosteus-%	mu	m0
		g	g
D4	8,94	96,3	88,4
D13	9,16	95,3	87,3
D22	10,66	108	97,6
D31	12,12	92,5	82,5
D40	12,78	94,4	83,7
D41	10	92,2	83,8
D50	9,62	94,6	86,3
D59	12,72	101	89,6
D68	11,06	96,4	86,8
D77	11,02	95,7	86,2
Keskiarvo	10,808		
Hajonta	1,401022		
Minimi	8,94		
Maksimi	12,78		



KUVIO 31. Toisen kuivauksen loppukosteudet poikkileikkausnäytteistä koekappaleittain

TAULUKKO 14. Kosteusgradientin mukaan määritelty pinta- ja keskikosteus yhteenveto kuivauksesta 2

Tavoitekosteus näyteerässä	Viipaleiden keskikosteus pinta (1/9)	Viipaleiden keskikosteus keski (1/2)
40 %	18,5 %	44,8 %
30 %	13,8 %	35,2 %
20 %	9,9 %	19,3 %
10 %	8,26 %	12,7 %

9.2.5 Laadun tarkastus kuivauksissa 1 ja 2

Kuivauslaatu oli hyvää ensimmäisessä ja toisessa kuormassa. Pinta- ja sisähalkeilua ei esiintynyt, ainoastaan pientä päätyhalkeilua (pituus alle 10mm). Kuivauskuormissa ei ollut värivirheitä. Muodonmuutoksia esiintyi hyvin vähän.

9.3 Kuivaus 3

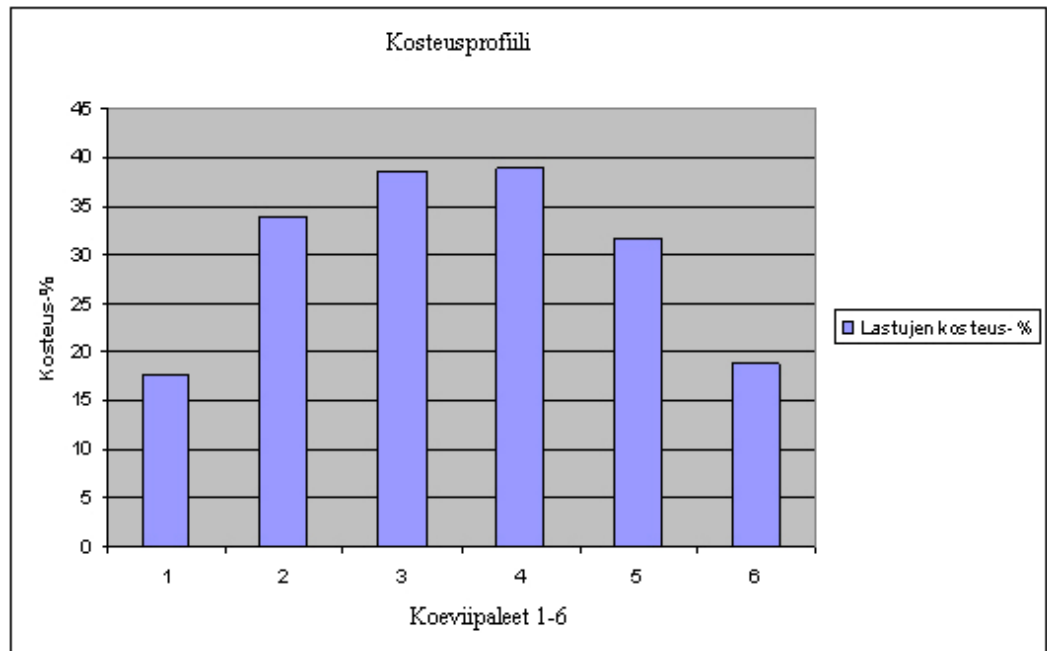
Kuorman kuivauslämpötila vaihteli 65–73 °C välillä. Kuivausaika oli 68 h. Tavoiteltu loppukosteus oli 16–18 %. Kuivauksen aikana otettiin kuormasta näytteitä kaksi kertaa. Kuivauksen loputtua 20 koekappaleelle tehtiin EDG:n mukainen laaduntarkastus.



KUVIO 32. Kuivattu kuorma 3.

9.3.1 Näyte-erä 1.

Ensimmäinen näyte-erä otettiin, kun kuivausta oli kulunut 21 h. Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 29,9 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot.



KUVIO 33. Koelastujen keskiarvot kun kuivausta kulunut 21h.

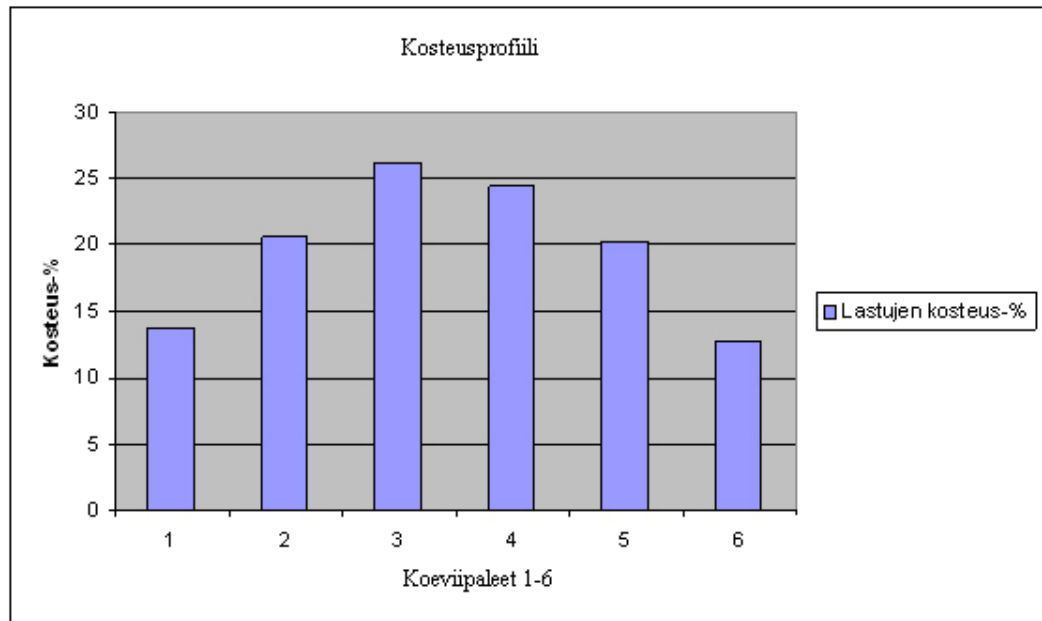
TAULUKKO 15. Poikkileikkausnäytteiden tulokset näyte-erä 1

Koekpl.	Kosteus-%
E79	33,5
E75	20,73
E76	28,44
E74	29,13
E78	34,6
Keskiarvo	29,28
Hajonta	5,475888
Minimi	20,73
Maksimi	34,6

9.3.2 Näyte-erä 2.

Kun kuivausta oli kulunut 47 h, otettiin toinen näyte-erä.

Kosteusgradientinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 19,6 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot.



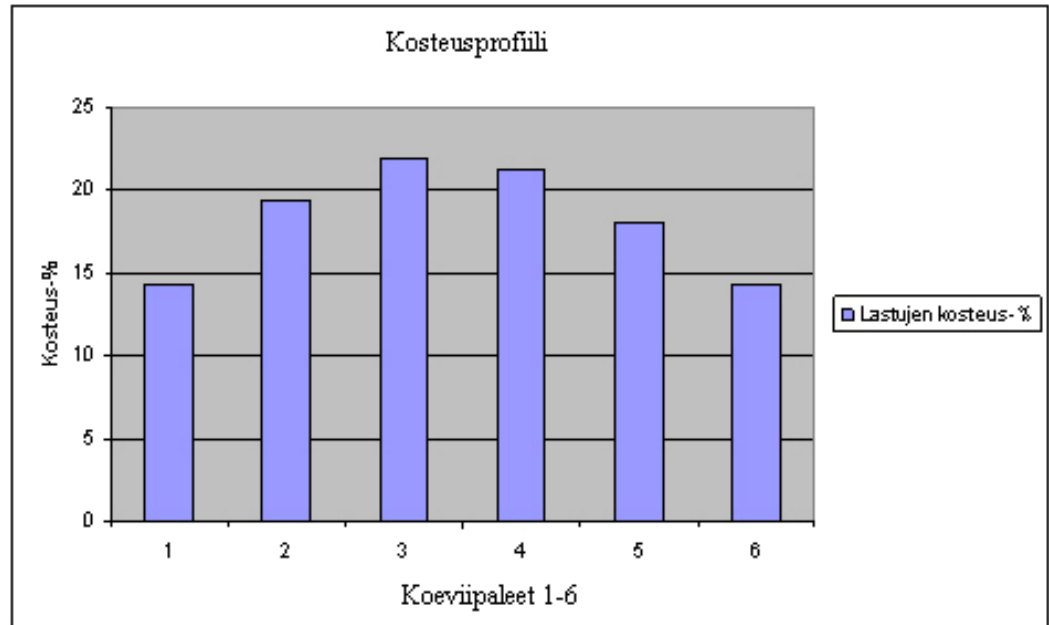
KUVIO 34. Koelastujen keskiarvot kun kuivausta kulunut 47 h.

TAULUKKO 16. Poikkileikkausnäytteiden tulokset näyte-erässä 2

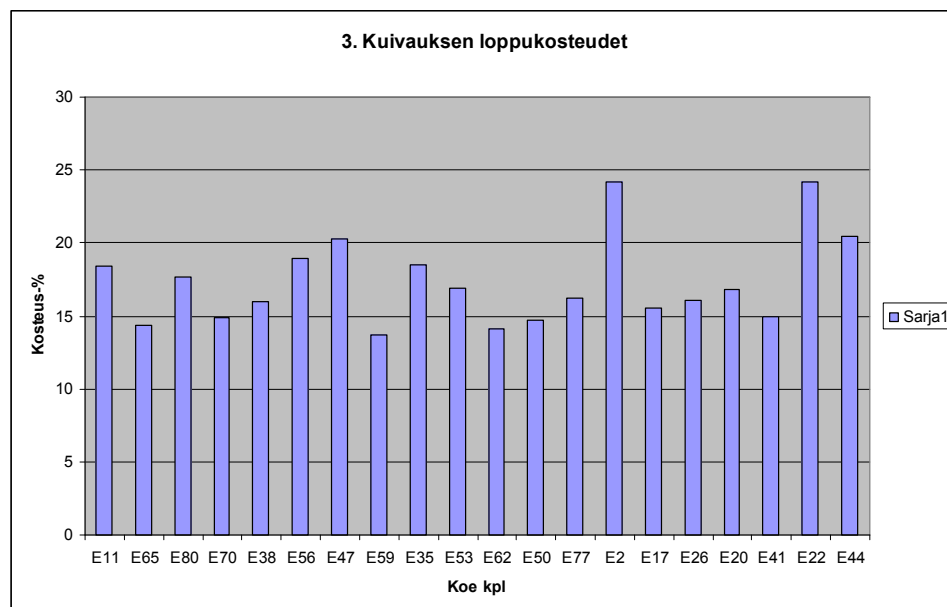
Koekpl.	Kosteus-%
E68	21,48
E67	21,76
E71	18,36
E72	16,07
E69	13,58
Keskiarvo	18,25
Hajonta	3,511638
Minimi	13,58
Maksimi	21,76

9.3.3 Näyte-erä 3.

Kolmas näyte-erä otettiin kuivauksen loputtua. Kuivaus kesti kokonaisuudessaan 68 h ja tavoitekosteus oli n. 17 %. Kosteusgradienttinäytteissä viipaleiden keskiarvo oli 18,2 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot.



KUVIO 35. Koelastujen keskiarvot kuivauksen loputtua



KUVIO 36. Kuivauksen loppukosteudet poikkileikkausnäytteistä koekappaleittain

Kuviossa 36. on esitetty poikkileikkausnäytteistä määritetyt kosteudet koekappaleittain neljännen kuivauksen loputtua. Poikkileikkausnäytteiden kosteuden keskiarvo kuivauksen loputtua oli 17,3 %.

9.3.4 Laaduntarkastus EDG:n mukaisesti kolmannesta kuivauskuormasta

TAULUKKO 17. Laaduntarkastus kuormasta 3.

Koekpl.	Keskikosteus	Gradientti (Kosteusero u1/2-u1/6)	Pintakovuus (mm)	Päätyhalkeilu	Laatu keskikosteus	Laatu gradientti	Laatu pintakov.
E11	18,45	7,93	2,2	x	E	S	S
E65	14,35	1,76	1,3		Q	E	Q
E80	17,68	7,3	1,7		E	S	Q
E70	14,9	5,04	1,2		Q	E	Q
E38	16,0	3,76	1,6		E	Q	Q
E56	18,97	8	2,3		Q	Yli rajojen	Q
E47	20,28	10,97	2,9		Q	Yli rajojen	S
E59	13,65	1,34	1,4	x	Q	E	Q
E35	18,49	3,17	2,7		E	E	S
E53	16,94	3,17	1,7		E	E	Q
E62	14,11	3,36	0,5		Q	E	E
E50	14,67	4,36	1,2	x	Q	Q	Q
E77	16,22	5,82	1,4		E	S	Q
E2	24,14	21,46	2,9		Yli rajojen	Yli rajojen	S
E17	15,52	4,05	1,6		E	Q	Q
E26	16,03	7,53	2		E	Yli rajojen	Q
E20	16,82	6,49	2		E	S	Q
E41	14,94	4,22	1,2	x	E	Q	Q
E22	24,19	11,5	1,9		Yli rajojen	Yli rajojen	Q
E44	20,45	10,25	3		S	Yli rajojen	S
Laatuluokka				vähäinen	S	70 % S	S

EDG:n kuivauslaatusuosituksen mukaan kuormasta otetaan tietyn kokoinen näyte-erä. 90 % näyte-erän puista tulee täyttää kuivauslaatuluokan vaatimukset, jotta kuorma tai toimituserä voitaisiin lukea ko. laatuluokkaan kuuluvaksi. Tässä tutkimuksessa tehtiin laaduntarkastus 20 koekappaleelle. Tämä tarkoittaa sitä, että 18 mittaus tuloksen tulee täyttää ko. vaatimukset.

Tavoite tässä kuivauksessa oli 17 % kosteus. EDG:n mukaan sallitut mittausarvojen u1/3 (keskikosteus) poikkeamat tavoitekosteudesta (17 %):

S (standard) = 11,9-22,1

Q (quality dried) = 13,6-20,4

E (exlusive) = 15,3-18,7

Kosteuserojen (gradienttien) sallitut vaihtelut tavoitekosteudessa 17 %:

S = 6,8 Q = 5,1 E = 3,4

Sallittu pintakovuuden määrä tasaannutuksen jälkeen eri kuivauslaatuluokissa:

S = 3 mm Q = 2 mm E = 1 mm

Tuloksista selviää, että kuorma luokitellaan keskikosteuden osalta laatuluokkaan S. Kuitenkin gradienttien kosteusero on liian suuri, joten vain 70 % koekappaleista menee vähintään luokkaan S. Pintakovuuden osalta kuorma kuuluu laatuluokkaan S. Kuormassa ei esiintynyt pintahalkeilua eikä sisähalkeilua. Vain pientä päätyhalkeilua (kaikki alle 50 mm) oli havaittavissa, jolloin EDG:n mukaan päätyhalkeilun aste on vähäinen.

Kuorman poikkileikkausnäytteistä määritetyt kosteudet ovat lähellä tavoitekosteutta. Koekappaleiden keskiarvo oli 17,3 % ja tavoite 17 %. Ongelmaksi muodostui siis liian suuret kappaleiden sisäiset kosteuserot (gradientti).

9.4 Kuivaus 4

Kuorman kuivauslämpötila vaihteli 65–73 °C välillä. Kuivausaika oli 68 h. Tavoiteltu loppukosteus oli 16–18 %. Kuivauksen aikana otettiin kuormasta näytteitä kaksi kertaa. Kuivauksen loputtua 20 koekappaleelle tehtiin EDG:n mukainen laaduntarkastus.

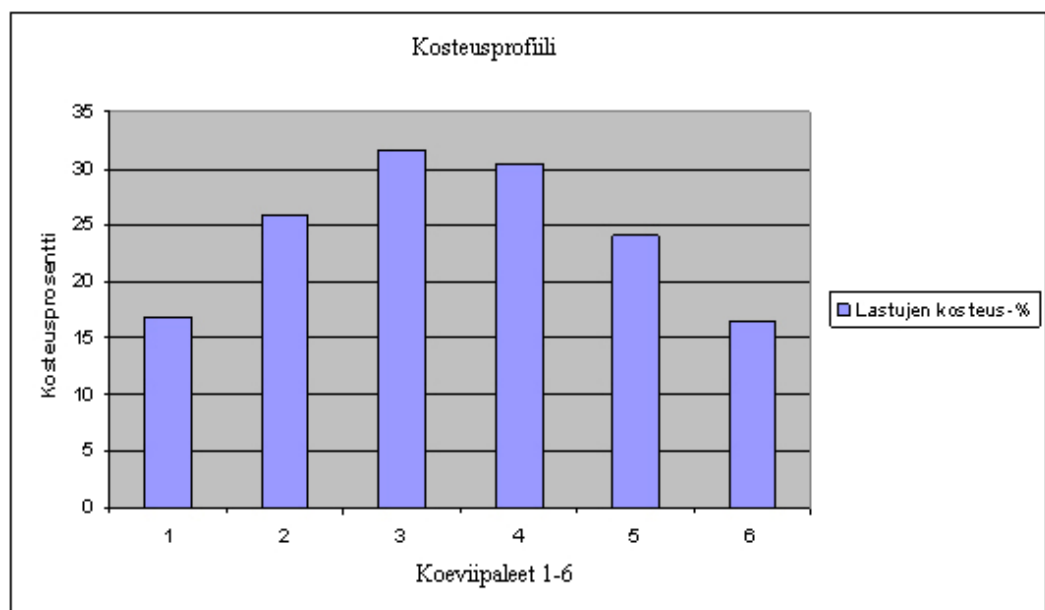


KUVIO 37. Kuivattu kuorma 4.

9.4.1 Näyte-erä 1.

Kun kuivausta oli kulunut 42 h, otettiin ensimmäinen näyte-erä.

Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 24,2 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot.



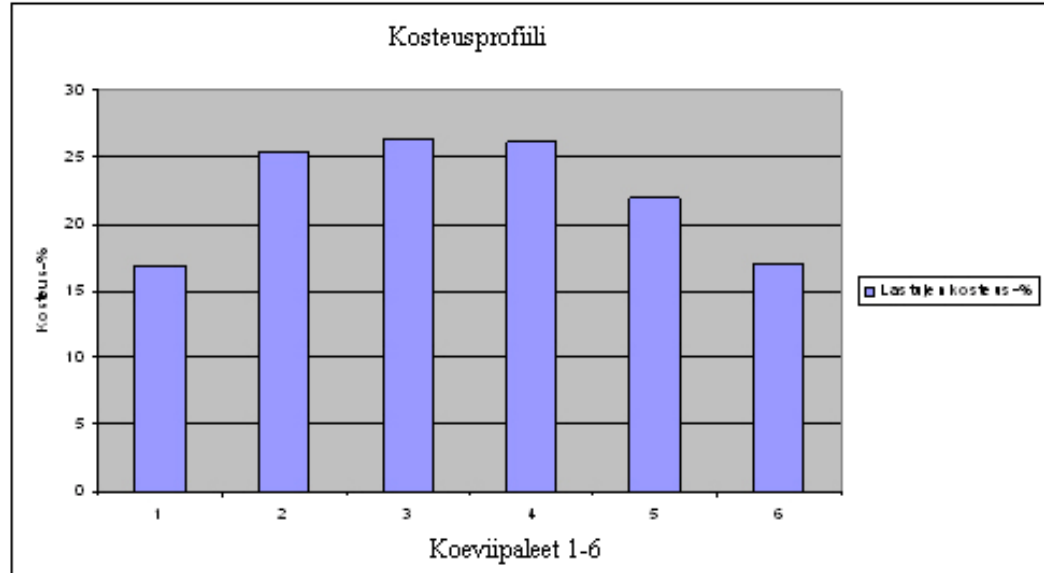
KUVIO 38. Koelastujen keskiarvot kun kuivausta kulunut 42 h.

TAULUKKO 18. Poikkileikkausnäytteiden tulokset näyte-erässä 1

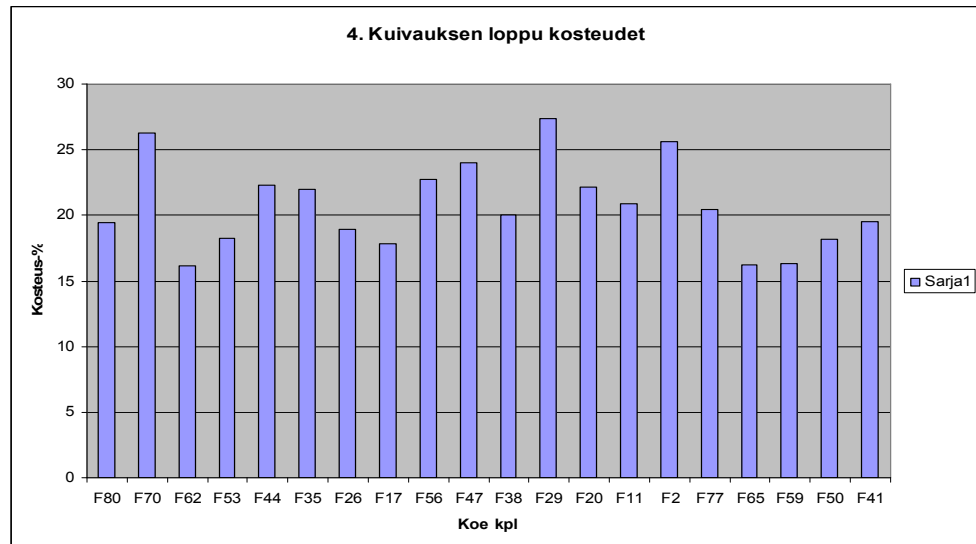
Koekpl.	Kosteus-%
F79	22
F75	15,54
F76	26
F74	22,22
F78	20,43
Keskiarvo	21,238
Minimi	15,54
Maksimi	26
Hajonta	3,786214

9.4.2 Näyte-erä 2.

Toinen näyte-erä otettiin kuivauksen loputtua. Kuivaus kesti kokonaisuudessaan 68 h ja tavoitekosteus oli n. 17 %. Kosteusgradienttinäytteessä kaikkien viipaleiden keskiarvo oli 22,3 %. Alla olevassa kuvaajassa on esitetty näyteviipaleiden keskiarvot.



KUVIO 39. Koelastujen keskiarvot kuivauksen loputtua



KUVIO 40. Neljännen kuivauksen loppukosteudet

Kuvassa 36. on esitetty poikkileikkausnäytteistä määritetyt kosteudet koekappaleittain neljännen kuivauksen loputtua. Poikkileikkausnäytteiden kosteuden keskiarvo kuivauksen loputtua oli 20,7 %

9.4.3 Laaduntarkastus EDG:n mukaisesti neljännestä kuivauskuormasta

TAULUKKO 19. Laaduntarkastus kuormasta 3.

Koekpl.	Keskikosteus	Gradientti (Kosteusero u1/2-u1/6)	Pintakovuus (mm)	Päätyhalkeilu	Laatu keskikost.	Laatu gradientti	Laatu pintakov.
F80	19,43	8,35	2,8		Q	Yli rajojen	S
F70	26,25	27	2,1		Yli rajojen	Yli rajojen	S
F62	16,11	3,38	2,9		E	E	S
F53	18,22	7,11	2,2	x	E	Yli rajojen	S
F44	22,1	13,9	2,1		S	Yli rajojen	S
F35	22	14,26	2,6		S	Yli rajojen	S
F26	18,9	7,26	2,2		Q	Yli rajojen	S
F17	17,8	5,64	1,9		E	S	
F56	22,74	24,2	2,5		Yli rajojen	Yli rajojen	S
F47	24,0	6,7	3		Yli rajojen	S	S
F38	20,0	9,39	2,4		Q	Yli rajojen	S
F29	27,34	14,77	2		Yli rajojen	Yli rajojen	S
F20	22,12	12,5	1,8	x	S	Yli rajojen	Q
F11	20,9	8,51	1,9		S	Yli rajojen	Q
F2	25,6	14	1,4		Yli rajojen	Yli rajojen	Q
F77	20,48	13,76	2,9		Q	Yli rajojen	S
F65	16,25	3,41	2		E	E	S
F59	16,34	4,34	1,5		E	Q	Q
F50	18,16	9,74	1,1		E	Yli rajojen	Q
F41	19,53	7,11	1,6	x	Q	Yli rajojen	Q
Laatuluokka				Vähäinen	Hylätty	Hylätty	S

EDG:n kuivauslaatusuositusten mukaan kuormasta otetaan tietyn kokoinen näyte-erä. 90 % näyte-erän puista tulee täyttää kuivauslaatuluokan vaatimukset, jotta kuorma tai toimituserä voitaisiin lukea ko. laatuluokkaan kuuluvaksi. Tässä tutkimuksessa tehtiin laaduntarkastus 20 koekappaleelle. Tämä tarkoittaa sitä, että 18 mittaustuloksen tulee täyttää ko. vaatimukset.

Tavoite tässä kuivauksessa oli 17 % kosteus. EDG:n mukaan sallitut mittauservojen u1/3 (keskikosteus) poikkeamat tavoitekosteudesta (17 %):

S (standard) = 11,9-22,1

Q (quality dried) = 13,6-20,4

E (exclusive) = 15,3-18,7

Kosteuserojen (gradienttien) sallitut vaihtelut tavoitekosteudessa 17 %:

S = 6,8 Q = 5,1 E = 3,4

Sallittu pintakovuuden määrä tasaannutuksen jälkeen eri kuivauslaatuluokissa:

S = 3 mm Q = 2 mm E = 1 mm

Tuloksista selviää, että kuorma jäi keskikosteuden osalta liian kosteaksi tavoitteesta ja tästä syystä vain 75 % koekappaleista menee vähintään luokkaan S. Myös gradienttien kosteusero on liian suuri, jolloin vain 25 % koekappaleista täyttää laatuluokan S vaatimukset. EDG:n mukaan tämä ei riitä, vaan näytteiden määrää voidaan lisätä 10 kappaleen portain, jolloin 27 mittauksen tulee täyttää asetetut vaatimukset näytemäärän ollessa 30 tai 40 näytteestä 36 tulee olla rajojen sisällä. Mikäli rajat ylittyvät edelleen, on kuivauskuorma hylättävä kuivauslaatuvaatimukset täyttämättömänä.

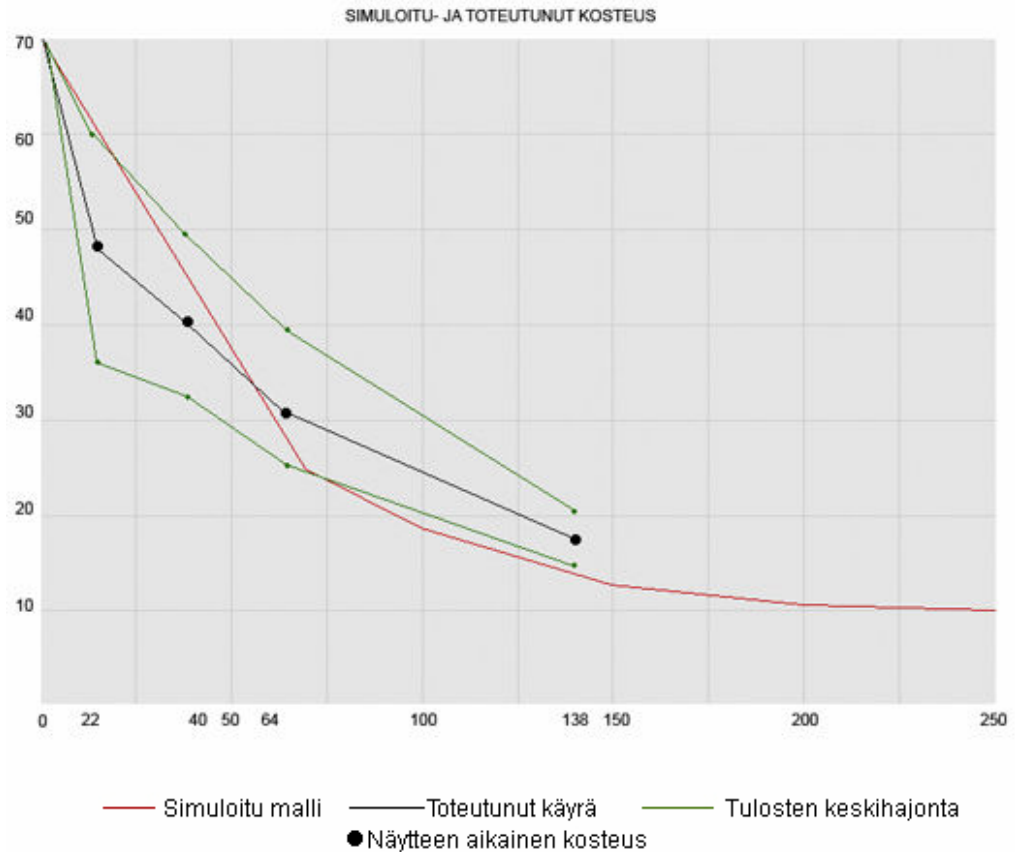
Pintakovuuden osalta kuorma kuuluu laatuluokkaan S. Kuormassa esiintyi vain pientä päätyhalkeilua (kaikki alle 50 mm), jolloin EDG:n mukaan päätyhalkeilun aste on vähäinen.

9.5 Kuivauslaadun parantaminen

Neljännessä kuivauskuormassa sahatavara jäi selvästi liian kosteaksi ja kolmannessa kuivauksessa gradienttien väliset erot olivat suuria. Kuivauslaatua olisi voitu parantaa siten, että kuorman kuivaamista olisi jatkettu pidemmälle. Laatu olisi saattanut olla parempaa myös, jos kuormalle olisi suoritettu selkeämpi tasaannutusvaihe tavoitteiden saavuttamiseksi.

10 KOEKUIVAUSTEN JA SIMULOINTIMALLIN VERTAILU

10.1 Kuivauskuorma 1.



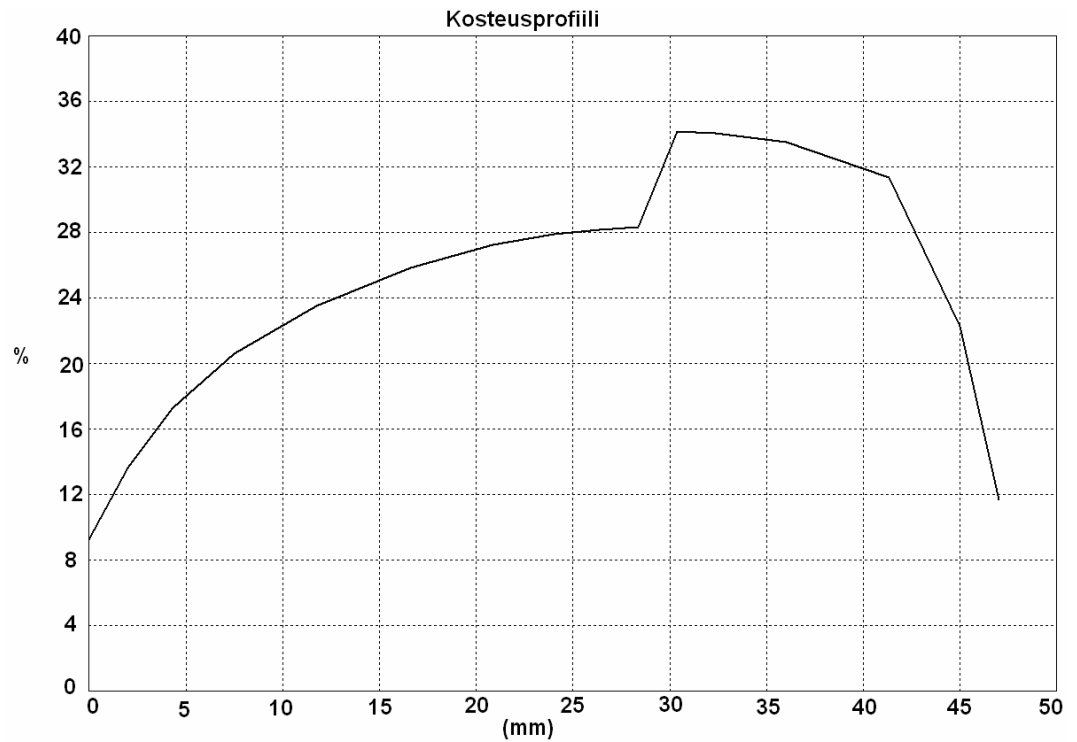
KUVIO 41. Ensimmäisen kuivauksen simuloitu ja toteutunut kosteus

Ensimmäisessä näyte-erässä, joka tehtiin 22 tunnin kohdalla, eroa simuloituun malliin oli noin 30 %. Simulointi näytti, että kosteus olisi vielä n. 65 %, kun todellisuudessa koekappaleiden olivat 47 % kosteudessa. Seuraava näyte-erä otettiin kun kuivausta oli kulunut 40 h. Tässä kohtaa simuloinnin ja todellisen kosteuden välinen ero oli 8,9 %. Kolmannen näyte-erän kohdalla ero oli 12,5 %. Kuivauksen päätyttyä 138 tunnin jälkeen eroa oli 16,6 %.

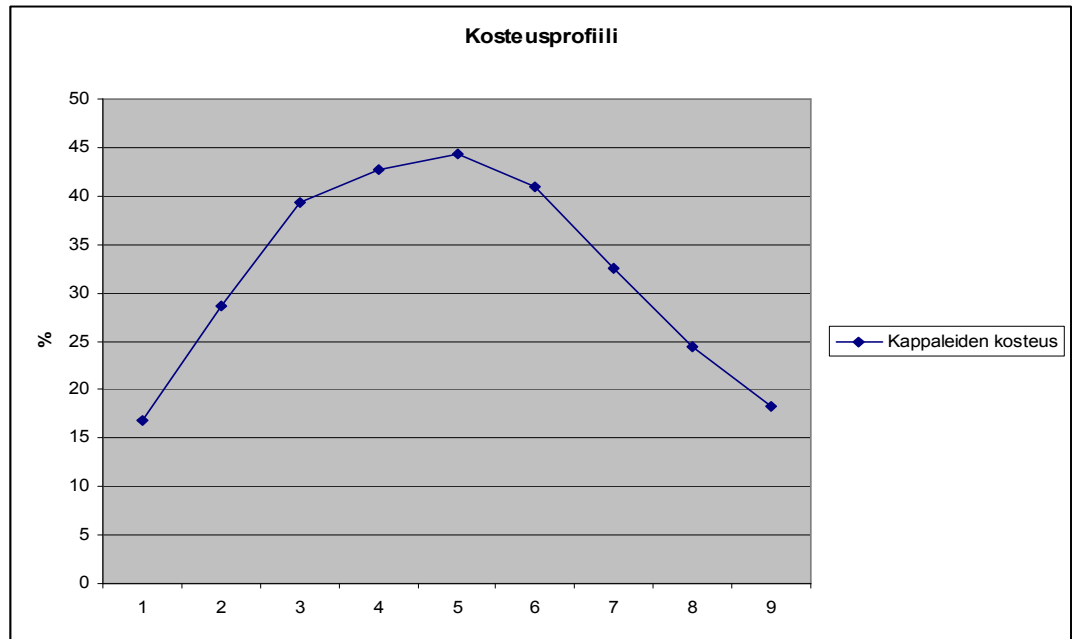
Tässä kuivauksessa suurin eroavaisuus todellisen kuivumisen ja simuloitun mallin välillä oli kuivauksen alussa. Simuloinnin mukaan kuorma oli kosteampaa kuin todellisuudessa. Tilanne muuttui toisinpäin noin 55 h kohdalla, kun simulointimalli näytti että kuorma olisi kuivempaa kuin todellisuudessa.

10.1.2 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili

Kuviossa 42. on kuvattu kappaleen kosteusprofiilia siten, että vasemmassa reunassa on kappaleen yläpinta ja oikeassa reunassa alapinta. Tätä on verrattu kuivauksen tietyn ajan hetkellä otettuun koekappaleen todelliseen kosteusprofiiliin. Todellinen kosteusprofiili on määritelty kappaleesta sahatun kosteusgradientin avulla. 1 ja 2 kuivauksissa gradientti viipaleita sahattiin 9 kappaletta ja 3 ja 4 kuivauksissa 6 kappaletta.



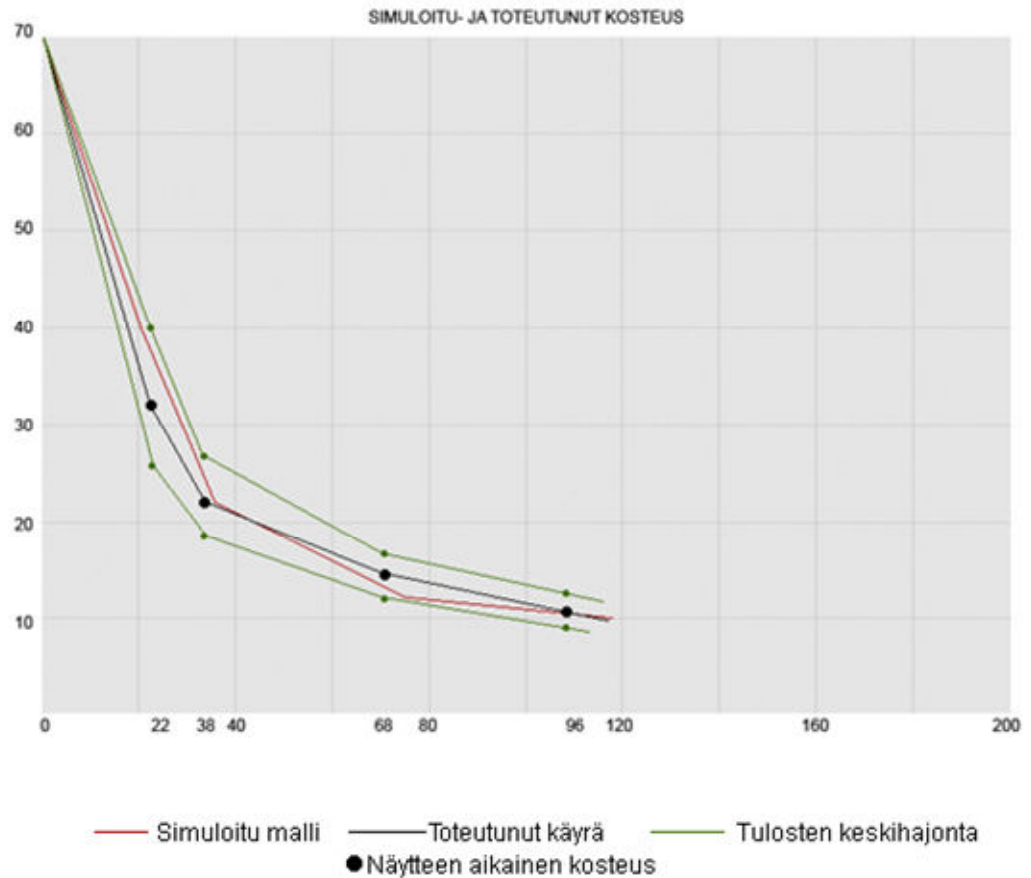
KUVIO 42. Simuloitu kosteusprofiili 64 tunnin kohdalla.



KUVIO 43. Todellinen kosteusprofiili 64 tunnin kohdalla.

Simuloitu kosteusprofiili on otettu kun kuivausta on kulunut 64 tuntia. Todellinen kosteusprofiili on tehty kuivauksen kolmannesta näyte-erästä, jolloin kuivausta oli kulunut sama 64 tuntia. Todellinen kosteusprofiili seuraa melko hyvin simuloitua mallia. Kappaleen pinta kosteus on todellisuudessa suurempi kuin simuloitua. Simuloitun mallin mukaan puun keskiosassa kostein kohta olisi noin 34 % kosteudessa, kun todellisuudessa puun keskellä kosteus on melkein 45 % kosteudessa.

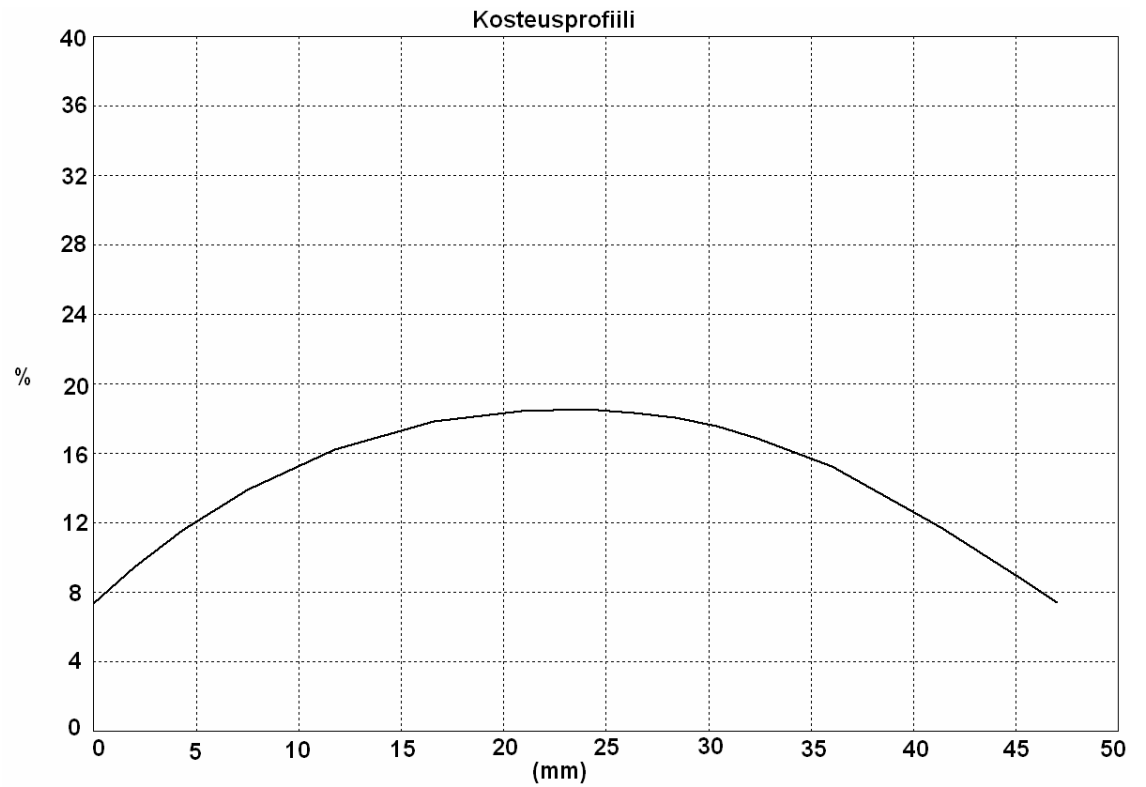
10.2 Kuivauskuorma 2



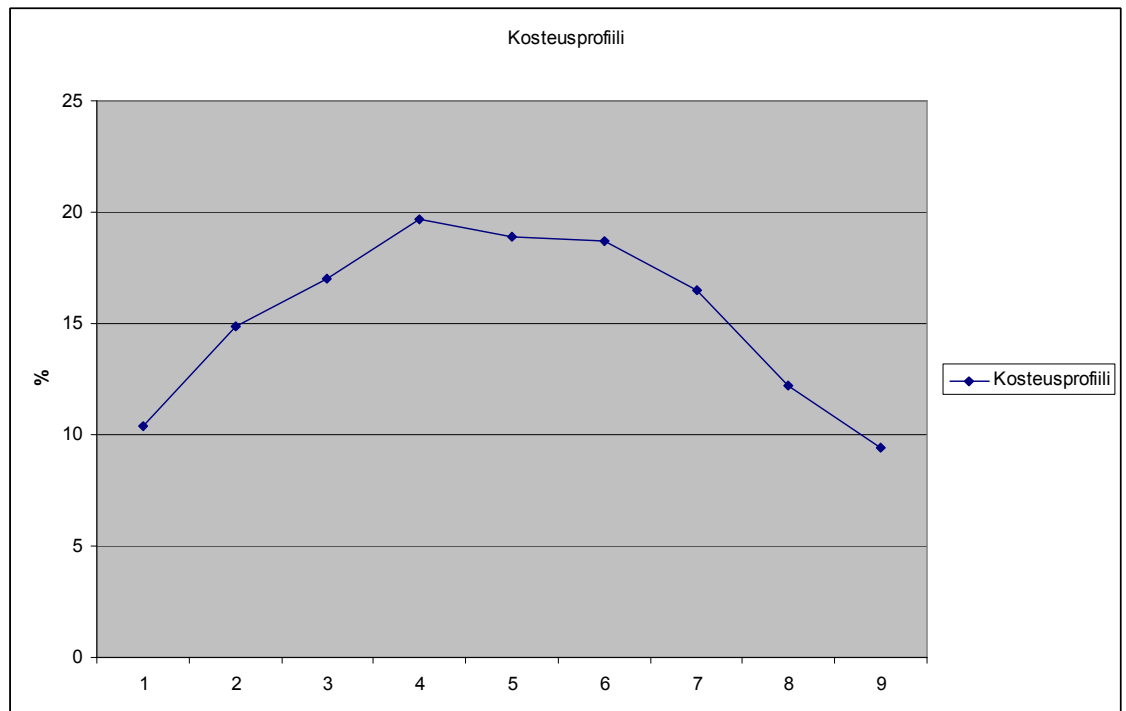
KUVIO 44. Toisen kuivauksen simuloitu ja toteutunut kosteus.

Tässä kuivauksessa simuloitu malli on hyvin lähellä todellista kuivumista. Ensimmäisen näyte-erän kohdalla, kun kuivausta on kulunut 22h, simulointimalli näyttää kuorman olevan n. 48 % kosteudessa ja todellinen kosteus oli 33 %. Seuraavissa näyte-erissä erot ovat jo pieniä. Toisessa näyte-erässä, joka tehtiin 38h kohdalla, eroa oli 8,0 % (tod. kost. 23 % ja simul.25 %). Kolmannen näyte-erän kohdalla ero oli 13,3 % (tod. kost. 15,0 % ja simul. 13 %). Kuivauksen loputtua 96:n tunnin kuluttua simuloitu ja todellinen kosteusprosentti olivat samat 11 %.

10.2.1 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili



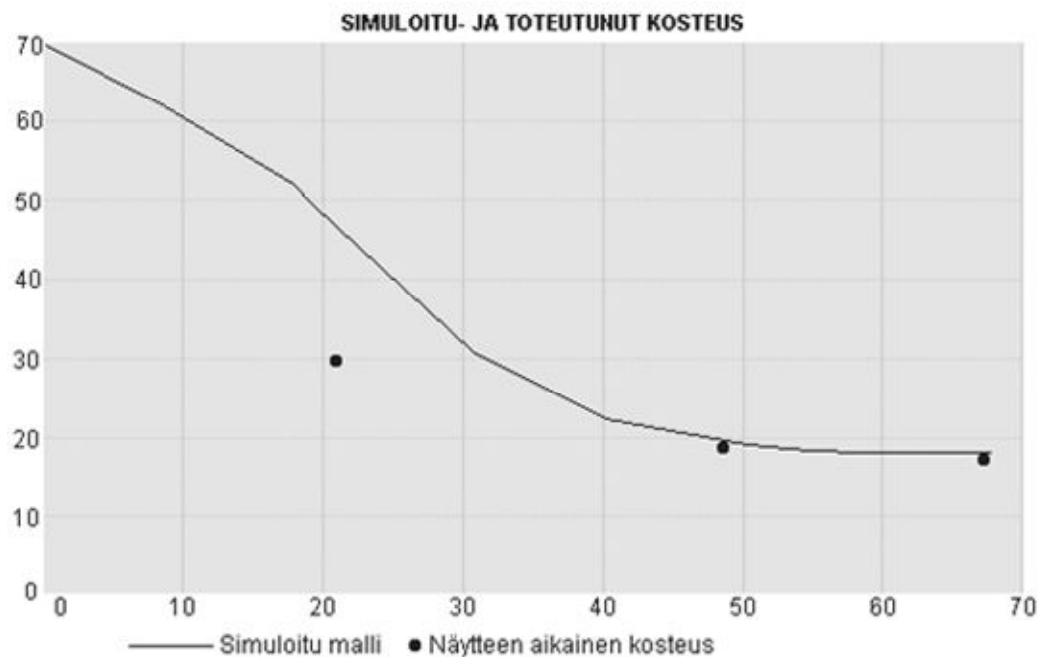
KUVIO 45. Simuloitu kosteusprofiili 63 tunnin kohdalla.



KUVIO 46. Todellinen kosteusprofiili 63 tunnin kohdalla.

Simuloitu kosteusprofiili on otettu kun kuivausta on kulunut 63 tuntia. Todellinen kosteusprofiili on tehty kuivauksen kolmannesta näyte-erästä, jolloin kuivausta oli kulunut sama 63 tuntia. Tässä kuivauksessa simuloitu ja todellinen kosteusprofiili ovat lähellä toisiaan. Simuloidun profiilin muoto seuraa hyvin todellista kosteusprofiilia. Kummassakin pintakosteudet ovat 8-10 % ja keskikosteus hieman alle 20 % kosteudessa.

10.3 Kuivauskuorma 3



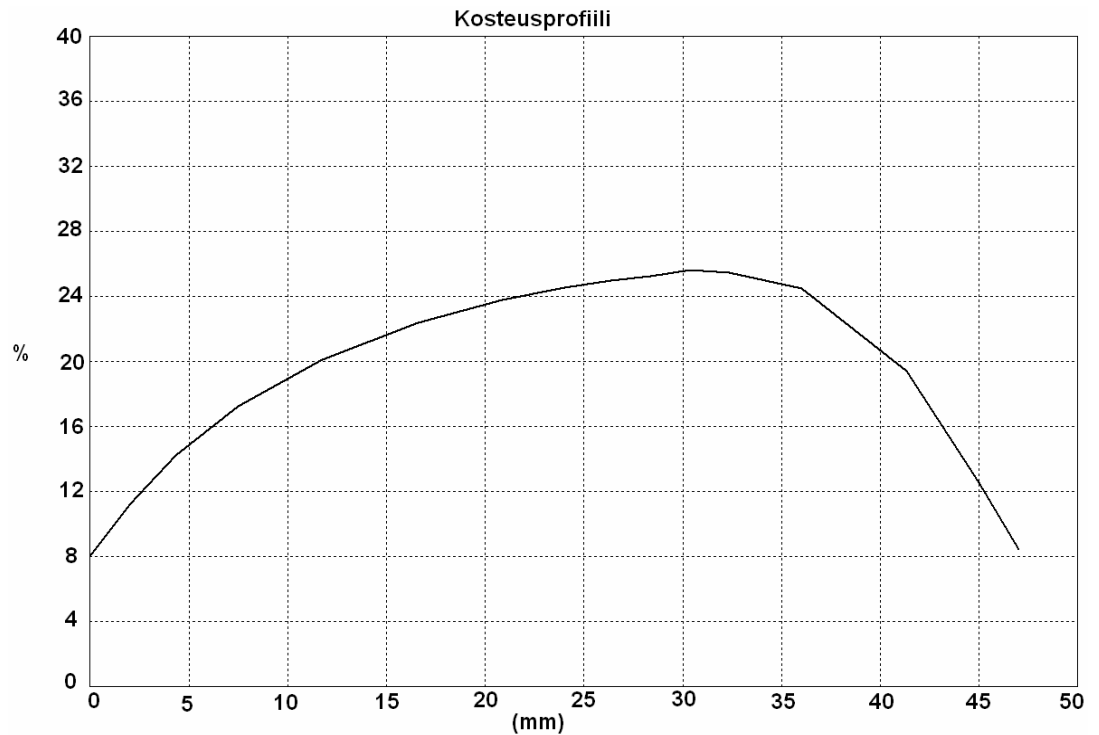
KUVIO 47. Kolmannen kuivauksen simuloitu ja toteutunut kosteus.

Simuloitu malli näyttää olevan lähempänä todellista kosteutta kuivauksen loppupuolella kuin alussa. Ensimmäinen näyte-erä otettiin 21 h kohdalla. Todellinen kosteus oli silloin 30 % kosteus ja simuloitu malli näyttää kappaleen olevan silloin vielä noin 48 % kosteudessa. Toisen näyte-erän kohdalla eroa simuloituun on vain 5 %. Kuivauksen loputtua 68 tunnin päästä ero on 2.7 %

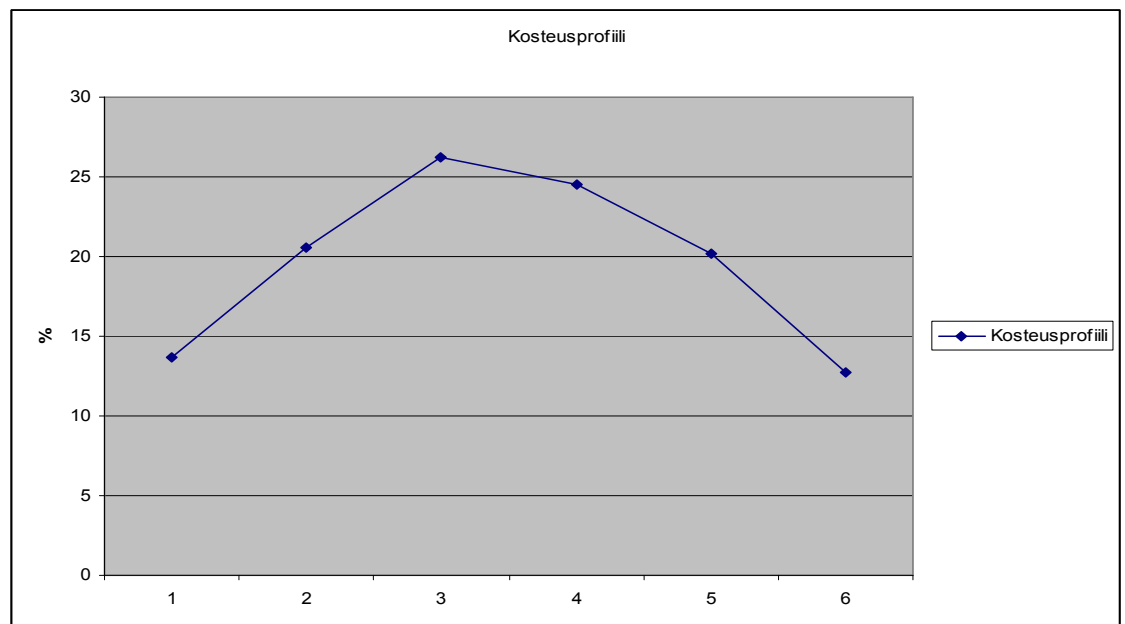
10.3.1 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili

Kuviossa 48 on kuvattu kappaleen kosteusprofiilia siten, että vasemmassa reunassa on kappaleen yläpinta ja oikeassa reunassa alapinta. Tätä on verrattu

kuivauksen tietyn ajan hetkellä otettuun koekappaleen todelliseen kosteusprofiiliin. Todellinen kosteusprofiili on määritelty kappaleesta sahatun kosteusgradientin avulla. 1 ja 2 kuivauksissa gradientti viipaleita sahattiin 9 kappaletta ja 3 ja 4 kuivauksissa 6 kappaletta.



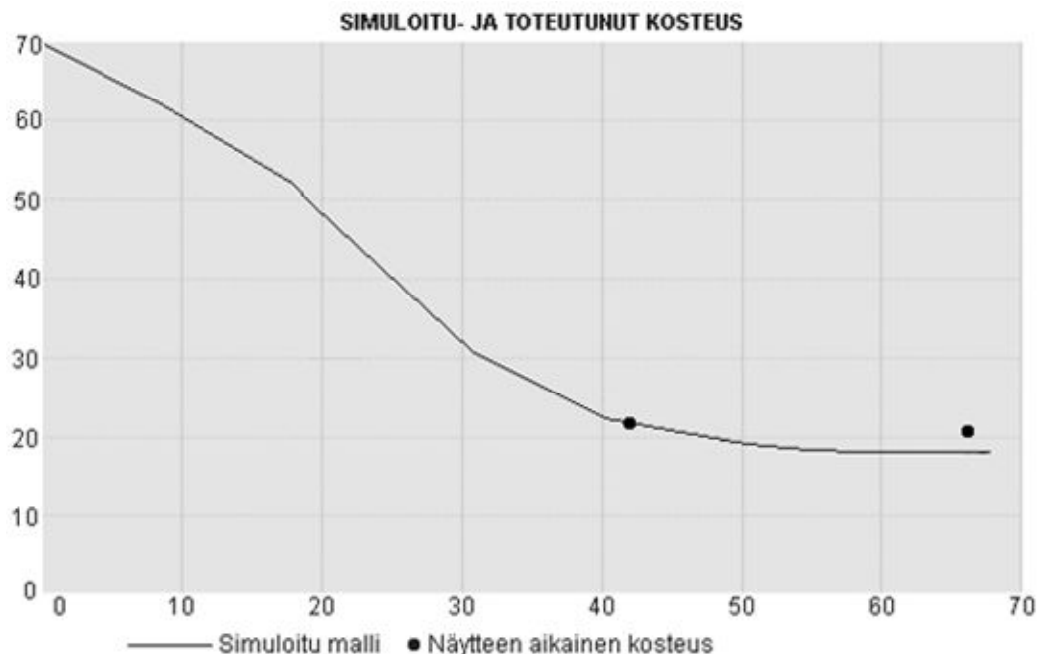
KUVIO 48. Simuloitu kosteusprofiili 47 tunnin kohdalla.



KUVIO 49. Todellinen kosteusprofiili 47 tunnin kohdalla.

Simuloitu kosteusprofiili on otettu kun kuivausta on kulunut 47 tuntia. Todellinen kosteusprofiili on tehty kuivauksen toisesta näyte-erästä, jolloin kuivausta oli kulunut sama 47 tuntia. Simuloidussa kosteusprofiilissa kappaleen pinta osat ovat kosteampia kuin todellisessa. Todellisessa profiilissa kappaleen kostein kohta 26 % on kolmannen näytelastun kohdalla eli noin 25 mm syvyydellä. Simuloidussa mallissa kappaleen suurin kosteus on sama 26 %, mutta kohta on hieman syvemmillä kappaleessa noin 33 mm kohdalla. Muuten simuloitu malli noudattaa suhteellisen hyvin todellisen kosteusprofiilin muotoa.

10.4 Kuivauskuorma 4

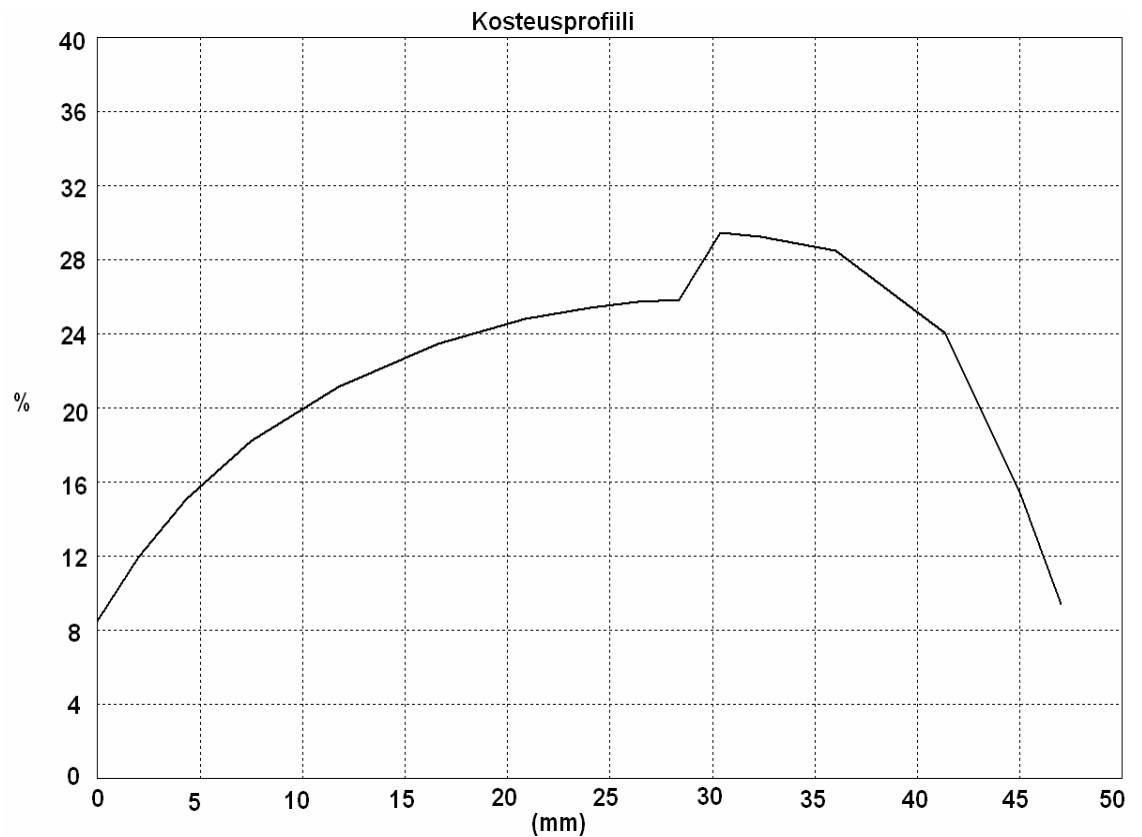


KUVIO 50. Neljännen kuivauksen simuloitu ja toteutunut kosteus.

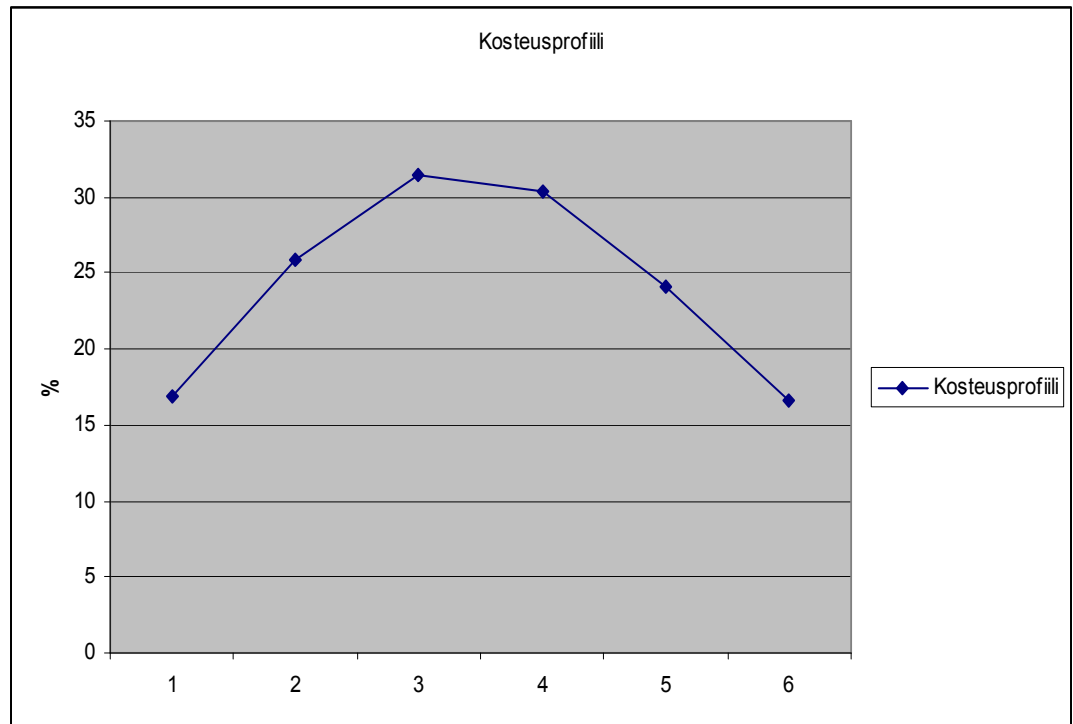
Neljännessä kuivauksessa näyte-eriä otettiin vain kaksi. Ensimmäinen näistä otettiin 42 tunnin kohdalla ja todellinen kosteusprosentti 23 % näyttää samaa kuin simuloitu. Toinen näyte-erä otettiin kuivauksen loputtua 68 tunnin päästä. Tässä todellinen kosteus näyttää jääneen hieman kosteammaksi kuin simuloitu. Eroa niiden välillä on 14 %.

10.4.1 Simuloitu ja todellinen kosteusprofiili

Kuviossa 51. on kuvattu kappaleen kosteusprofiilia siten, että vasemmassa reunassa on kappaleen yläpinta ja oikeassa reunassa alapinta. Tätä on verrattu kuivauksen tietyn ajan hetkellä otettuun koekappaleen todelliseen kosteusprofiiliin. Todellinen kosteusprofiili on määritelty kappaleesta sahatun kosteusgradientin avulla. 1 ja 2 kuivauksissa gradientti viipaleita sahattiin 9 kappaletta ja 3 ja 4 kuivauksissa 6 kappaletta.



KUVIO 51. Simuloitu kosteusprofiili 42 tunnin kohdalla.



KUVIO 52. Todellinen kosteusprofiili 42 tunnin kohdalla

Simuloitu kosteusprofiili on otettu kun kuivausta on kulunut 42 tuntia. Todellinen kosteusprofiili on tehty kuivauksen ensimmäisestä näyte-erästä, jolloin kuivausta oli kulunut sama 42 tuntia. Tässä kuivauksessa todellinen kosteusprofiili on koekappaleen pinnoilta huomattavasti kosteampi kuin simuloidussa mallissa. Todellisessa pinnan kosteus on noin 17 % kosteudessa. Simuloidussa profiilissa kosteus laskee noin 9 % kosteuteen.

Koekappaleen suurin todellinen kosteus 32 % sijaitsee kolmannen koelastun kohdalla eli noin 25 mm syvyydellä kappaleessa. Simuloidussa suurin kosteus on sama 32 % kosteus, mutta se sijaitsee syvemmillä kappaleessa noin 33 mm syvyydellä.

10.5 Johtopäätös simuloinnin ja koekuivausten vertailussa

Ensimmäisen ja toisen kuivauskaavan perusteella näyttäisi siltä, että suurimmat erot simuloidun mallin ja todellisen kosteuden välillä ovat kuivauksen

alkupuolella. Kuivauksen edetessä pidemmälle simulointi malli kulkee lähempänä todellista kosteutta.

Kolmas ja neljäs kuivaus olivat nopeampia kuivauksia minkä johdosta näyte-eriä otettiin vähemmän. Tämän vuoksi ei pystytä vertaamaan simuloitua ja todellista kosteutta kuivauksien alussa, mutta niiden tulosten perusteella, joita saatiin simuloitu malli seuraa hyvin todellista kosteutta.

Vaikka kuivauksien alkupuolella onkin eroja simuloitun ja todellisen kosteuden välillä, loppukosteuksien osalta simuloitu malli on hyvin lähellä todellista. Nämä tulokset viittaavat siihen, että sitkakuusella voitaisiin ajatella käytettävän pohjoismaisen kuusen arvoja kuivauskaavoissa. Parempiin tuloksiin voitaisiin vielä päästä muuttamalla joitakin parametreja ja optimoimalla kaavoja Laatukamari-ohjelmalla. Muutettavia parametreja ovat muun muassa suhteellinen jännitystaso, alin sallittu märkälämpötila ja halkeiluprosentti. Myöhemmin on tarkoitus tehdä tutkimus, jossa keskitytään tarkemmin parametrien muutoksiin.

VTT voi muuttaa laskentamallin kaavoja saatujen tulosten perusteella, mutta tämä vaatii oman tutkimuksen yhteistyössä VTT:n kanssa.

11 YHTEENVETO

Tämä opinnäytetyö käsittelee tutkimusta sitkakuusen lämminilmakuivauksista. YTI on tilannut tutkimuksen Lahden ammattikorkeakoululta. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kuinka hyvin pohjoismaisen kuusen simulointimalli toimii sitkakuusella. Kirjallisuus osuudessa kerrotaan sahatavaran kuivaamisen teoriaa. Siinä kerrotaan myös sitkakuusesta yleisesti ja käsitellään sen kuivausominaisuuksia muiden tekemien tutkimusten pohjalta.

Tässä tutkimuksessa tehtiin neljä lämminilmakuivausta. Kuivauksissa käytettiin 50mm x 100 mm sitkakuusisahatavaraa, joka on peräisin Skotlannista. Kuivauskaavat tehtiin VTT:n kehittämällä Laatukamariohjelmalla. Kuivauslämpötilat vaihtelivat 50 – 75 °C ja kuivausajat 68 – 140 h. Kuivaamona käytettiin Lahden ammattikorkeakoulun tutkimuskamarikuivaamo.

Kunkin kuivauksen aikana kuormasta otettiin useamman kerran näyte-eriä. Näistä koekappaleista tutkittiin sen hetkinen kosteus poikkileikkausnäytteestä sekä gradientista. Tässä käytettiin tarkkaa punnitus-kuivaus menetelmää. Ensimmäisessä ja toisessa kuivauksessa tavoitteena oli ottaa näyte 40 %, 30 %, 20 % kosteuksissa. Kuivauksien lopullinen tavoitekosteus oli 10 %. Kolmannessa ja neljännessä kuivauksessa näytteitä otettiin vain muutama ja tavoitekosteus oli 17 %. Kummankin kuivauksen loputtua tehtiin 20 kappaleelle EDG:n mukainen laaduntarkastus.

Tuloksista selviää, että neljäs kuorma jäi keskikosteuden osalta liian kosteaksi tavoitteesta. Sekä kolmannessa että neljännessä kuivauksessa myös gradienttien väliset kosteuserot olivat suuria. Ongelmaksi muodostuivat siis liian suuret kappaleiden sisäiset kosteuserot (gradientti) sekä liian suuri keskikosteus.

Kuivauksista saatuja tuloksia verrataan simuloitun mallin antamiin arvoihin. Joissakin kuivauksissa simulointi- malli noudatti hyvin todellisia arvoja, mutta suurimmat erot löytyivät kuivauksien alkupuolilta. Vaikka kuivauksien alkupuolella onkin eroja simuloitun ja todellisen kosteuden välillä, loppukosteuksien osalta simuloitu malli on hyvin lähellä todellista.

Nämä tulokset viittaavat siihen, että sitkakuusella voitaisiin ajatella käytettävän pohjoismaisen kuusen arvoja kuivauskaavoissa. Parempiin tuloksiin voitaisiin vielä päästä muuttamalla joitakin parametreja ja optimoimalla kaavoja Laatukamari- ohjelmalla. Tulosten perusteella voi myös todeta, että noin kolmen vuorokauden kuivausaika on mahdollista saavuttaa, kunhan kuivauslämpötiloina käytetään 70 - 75 °C (alkukosteutena sahatuore, sahatavaran paksuutena 50 mm ja tavoitekosteutena 17 %).

LÄHTEET

European Wood Drying Group.2008. [verkkojulkaisu] EDG. Saatavissa
www.timberdry.net

High Temperature Drying. 2005 [verkkojulkaisu] Saatavissa
<http://www.forestry.gov.uk>

Laatukamari [verkkojulkaisu] Saatavissa
<http://wood.tkk.fi/opinnot/kurssit/168/pdf/laatukamari.pdf>

Laakso, V, 2004. Tutkimuskuivaamon käyttöönotto. Puutekniikan opinnäytetyö.
Lahti: Lahden ammattikorkeakoulu, Tekniikan laitos.

Sitkankuusi.2002. [verkkojulkaisu]. Saatavissa
<http://kyamk.fi/~aaayl/sitkankuusi.html>

Suomen sahateollisuusmiesten yhdistys. 1994. Pohjoismainen sahatavara.
Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino

Tiedotteet VTT.2005. [verkkojulkaisu] Saatavissa
<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2295.pdf>

Sipi, M, Opetushallitus, P.2002, Sahatavaratuotanto, Edita Oy Helsinki

LIITTEET