

# **Sahatavaran kamarikuivauskaavojen optimointi LAATUKAMARI-simulointiohjelmalla**

Antti Hukka

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5163-X (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5164-8 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT,  
Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Puumiehenkuja 2 A, PL  
1806, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7027

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Träkarlsgränden 2 A, PB 1806, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7027

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology,  
Puumiehenkuja 2 A, P.O.Box 1806, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7027

Toimitus Leena Ukoski

Oy EDITA Ab, ESPOO 1997

Hukka, Antti. Sahatavaran kamarikuivauskaavojen optimointi LAATUKAMARI-simulointiohjelmalla [Optimisation of timber drying schedules in a batch kiln using the simulation program LAATUKAMARI]. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1866. 27 s. + liitt. 2 s.

**UDK** 674.04:681.3.06

**Avainsanat** structural timber, drying, moisture content, computer programs, LAATUKAMARI

## Tiivistelmä

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. Ohjelman taustalla olevaan matemaattiseen malliin on sisällytetty kaikki olennaisimmat sahatavaran kuivauslaadun osatekijät: kosteus, sen hajonta, pinnan halkeilu ja sahatavaran sisäinen kosteusjakauma eli kosteusgradientti.

Ohjelmassa käytetty matemaattinen malli perustuu puussa vallitsevan sisäisen kosteusjakauman laskentaan, jolloin saadaan lähtötieto kuivumisjännityksiä laskevalle mallille. Lisäksi otetaan huomioon teollisuusmittakaavaisen kuivaamon suuresta puhallussyvyydestä johtuva kuivausolosuhteiden epätasaisuus. Kuivumisjännityksistä lasketaan laajaan kokeelliseen aineistoon perustuva kuivaushalkeilun numeerinen arvo.

Mallin lähtötiedot kattavat sekä sahatavaran että kuivaamon ominaisuudet, joten laskennan alkuarvoina voidaan käyttää aina kulloisenkin käyttäjän todellista tilannetta vastaavia lukuja. Yksi simulointiajo kestää nopealla tietokoneella joitakin minuutteja, joten optimaalisen kuivauskaavan teko vie LAATUKAMARilla useimmiten noin puoli tuntia.

Hukka, Antti. Sahatavaran kamarikuivauskaavojen optimointi LAATUKAMARI-simulointiohjelmalla [Optimisation of timber drying schedules in a batch kiln using the simulation program LAATUKAMARI]. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1866. 27 p. + app. 2 p.

**UDC** 674.04:681.3.06

**Keywords** structural timber, drying, moisture content, computer programs, LAATUKAMARI

## Abstract

The timber drying simulation program LAATUKAMARI ("Quality Kiln") has been designed made to developing drying schedules for Finnish softwoods. It calculates the drying quality of any user-given drying schedule and thus provides an opportunity to find the best possible schedule for each purpose. The mathematical model behind the program covers all the essential aspects of drying quality: average moisture, moisture variation, drying checking and the internal moisture distribution of wood (moisture gradient).

The mathematical model used in the program is based on calculating the development of the moisture distribution inside the timber, which calculation produces input data for a model that simulates drying stresses. Variation in drying conditions due to the large blowing depth of an industrial-scale kiln is also taken into account. Based on the simulated stresses and extensive empirical research work, a numerical value for the drying checking is given.

The input data of the model cover both the timber and the kiln, making it possible to perform every simulation with such data as are relevant to the actual user of the program. Using a fast computer, a single simulation run takes a few minutes, which means that in most cases an optimal schedule will be found in about half an hour.

# Alkusanat

Sahatavaran kuivauksen simulointiohjelma LAATUKAMARI oli alun perin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen ja eräiden muiden tahojen yhteishankkeena vuosina 1990 - 1992 toteutuneen "Sahatavaran kuivauksen laadun parantaminen" -projektin konkreettinen lopputulos. Tuolloin valmistunut versio 1.2 oli heti valmistuttuaan tutkimusta rahoittaneen Suomen Puututkimus Oy:n jäsenyritysten käytettävissä. Vuonna 1994 valmistui ohjelman seuraava versio nimellä LAATUGENERAATTORI, joka nimensä mukaisesti automaattisesti generoi kuivauskaavoja. Tämän jälkeen ohjelmaa on kehitetty VTT:n omana hankkeena, jolloin siihen on pyritty kiteyttämään kaikki se sahatavaran kuivauksesta jatkuvasti kertyvä kokeellinen tietämys, joka muiden projektien yhteydessä syntyy.

Nyt käsillä oleva ensimmäinen Windows-pohjainen versio on edeltäjiinsä verrattuna sekä käytöltään selkeämpi ja monipuolisempi että antamiensa tulosten luotettavuudelta olennaisesti parempi. Ohjelman käyttöliittymän kehityksen kannalta täysin ratkaisevaa on ollut sen aikaisempien versioiden käyttäjien eri yhteyksissä antama palaute.

Antti Hukka

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	7
2. Ohjelman asennus	9
2.1 Laitteistovaatimukset	9
3. Tietojen syöttö	10
3.1 Tietojen tallentaminen tiedostoon	10
3.2 Sahatavaran tiedot	11
3.3 Kuivaamon tiedot	13
3.4 Kuivauskaava	14
4. Laskenta	16
4.1 Esikuivuminen	16
4.2 Alkulämmitys	16
4.3 Varsinainen kuivausvaihe	17
4.4 Lopputasaannutus	18
5. Tulosten tarkastelu	20
5.1 Keskimääräinen kosteus	20
5.2 Halkeilu	20
5.3 Kosteusgradientti	21
5.4 Kosteuden hajonta	22
5.5 Tarkastelun ulkopuolelle jäävät kuivauslaadun osatekijät	23
5.6 Tulostaminen paperille	24
6. Yhteystiedot	25
7. Yhteenveto	26
Lähdeluettelo	27
LIITE	
1. Esimerkki LAATUKAMARI-ohjelman tulosteista	

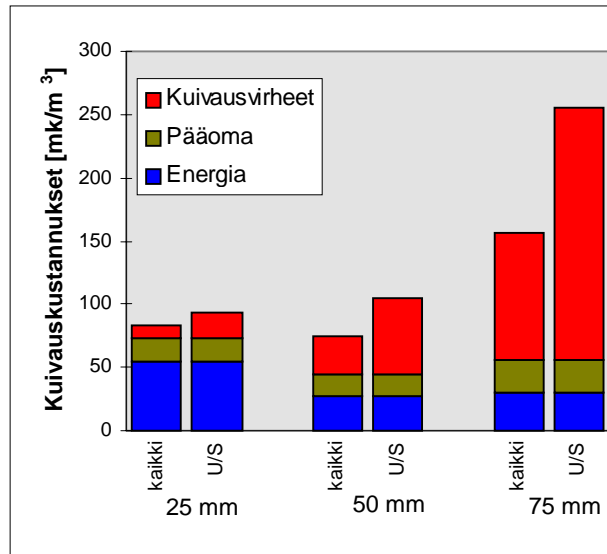
# 1. Johdanto

Kuivauksen simulointiohjelma LAATUKAMARI on kehittynyt VTT:llä 1990-luvun aikana suomalaisen sahateollisuuden tarpeista tuottaa mahdollisimman edullisesti hyvälaatuisia sahatavaraa, jossa erityisesti halkeilu ei aiheuta ylimääräisiä laatukustannuksia. LAATUKAMARI on sahatavaran kamarikuivaamon toimintaa simuloiva ohjelma, jonka avulla voidaan määrittää tietyn sahatavaran kuivauskaavan antama kuivauslaatu. Ohjelmassa tarkasteltavia kuivauslaadun osatekijöitä ovat

- loppukosteus
- kuivumisjännitykset ja sahatavaran pinnan halkeilu
- kosteusgradientti eli puun sisäinen kosteusjakauma
- kosteuden keskihajonta.

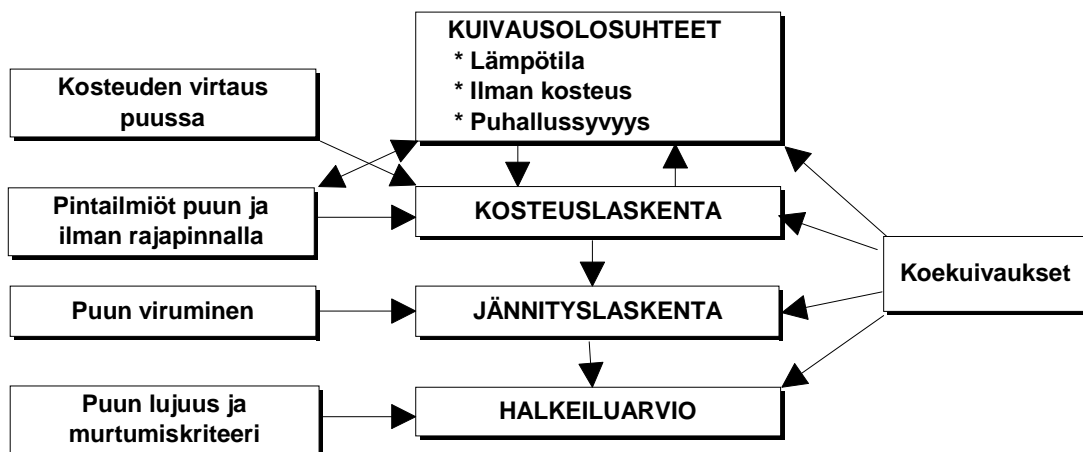
Ohjelma ottaa huomioon sekä kuivattavan puun alkutiedot että käytettävän kuivaamon ominaisuudet. Se on tehty pääasiassa sydänpuuvaltaiselle mänty- tai kuusisahatavaralle, jonka kuivauksessa perusongelmana on halkeilu. Kuivaamon oletetaan olevan ohjattu joko kuiva- ja märkälämpötila-antureilla tai lämpötilan ja suhteellisen kosteuden antureilla. Sääto tapahtuu joko kuormiin puhallettavan ilman olosuhteiden mukaan tai paine- ja imupuolen olosuhteiden keskiarvon mukaan.

LAATUKAMARin kehittämisen lähtökohtana oli kuvan 1 mukainen tilanne, jossa kuivaushalkeilu aiheuttaa sahatavaran arvon alenemisen takia suuremmat kustannukset kuin kaikki muut kuivauksen kustannukset yhteensä. Vaikkakin tilanne on viime vuosina parantunut, tämä tilanne on edelleenkin yleisesti vallitseva etenkin paksun, hyvälaatuisen mäntysahatavaran kohdalla. Erityisen merkittävä kustannustekijä kuivaushalkeilu on sen vuoksi, että sitä on mahdollista ratkaisevasti pienentää, kun taas kuivauksen muihin suurin kustannustekijöihin, energiaan ja pääomaan, on erittäin vaikeaa olennaisesti vaikuttaa.



Kuva 1. Sahatavaran kuivauskustannukset yleisellä tasolla esitettynä.

LAATUKAMARIn taustalla on matemaattinen malli, joka perustuu puun kosteuden ja kuivumiskutistumisesta sahatavaran pinnalle syntyvien kuivumisjännitysten numeeriseen laskentaan. Simuloiduista kuivumisjännityksistä voidaan laajaan kokeelliseen aineistoon perustuen ennakoida sahatavaran pintalapteen halkeilu (kuva 2). Yksityiskohtaisesti puun kuivumisen ja kuivumisjännitysten laskentaan käytettävät matemaattiset mallit on esitetty Hukan (1996) esitelmässä.



Kuva 2. LAATUKAMARI-ohjelman taustalla olevan matemaattisen mallin rakenne.



## 2. Ohjelman asennus

LAATUKAMARI sisältää 3 levykettä, jotka kaikki tarvitaan ohjelman asentamiseen. Asennus tapahtuu suorittamalla levykkeellä 1 oleva ohjelma "Setup.exe", jonka ohjeita seuraamalla asennus tapahtuu. Asennuksen päätteeksi setup-ohjelma luo automaattisesti Windows-järjestelmään ikonin, jota hiirellä näpäyttämällä ohjelma käynnistyy. Setup-ohjelman käyttö asennuksessa on välttämätöntä, koska tiedostot ovat levykkeillä pakatussa muodossa.

Ohjelma on kopiosuojattu siten, että se tarvitsee toimiakseen tietokoneen rinnakkaisliitännään kytketyn Ægis System -rasian, joka toimitetaan ohjelman mukana. Rasian jälkeen voidaan liittää ko. liitännään mahdollisesti tuleva muu laite, esim. kirjoitin. Rasian on oltava kiinnitettynä koneeseen aina, kun ohjelmaa käytetään.

Windows-pohjainen LAATUKAMARI ei pysty lukemaan aikaisemmillä LAATUKAMARIn versioilla tehtyjä tiedostoja, koska laskennan lähtötiedot ovat muuttuneet entistä selvästi laajemmiksi. Tiedostojen sekaantumisvaaran vuoksi ohjelmaa ei näin ollen pidä asentaa tietokoneen levyille samaan hakemistoon, jossa jo sijaitsee jokin sen aikaisempi versio.

### 2.1 Laitteistovaatimukset

Windows-pohjainen LAATUKAMARI toimii periaatteessa hyvinkin vaatimattomassa laiteympäristössä, mutta laskentaan kuluvan ajan vuoksi tietokoneen tulisi olla varustettu vähintään Pentium-prosessorilla ja 16 megatavun keskusmuistilla. Ohjelman tekemät tiedostot ovat kooltaan pieniä (noin 100 kilotavua), joten levytilaa tarvitaan asennuksen välittömästi vaatiman 9 megatavun lisäksi vain joitakin megatavuja. Koneeseen asennetun Windows-käyttöjärjestelmän on oltava vähintään versio 3.1, ja kirjoittimeksi käy mikä tahansa Windows-yhteensopiva kirjoitin. LAATUKAMARIn kuvat tulostuvat mustavalkoisina myös värejä tukevalla kirjoittimella.

### 3. Tietojen syöttö



Kuva 3. LAATUKAMARI-ohjelman päävalikko.

Kuvassa 3 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.

Jos laskenta on jo suoritettu tai tiedostosta on luettu vanhat tulokset, lähtötietojen muuttaminen poistaa laskentatulokset muistista. Tarkoituksena on, että nähtävillä olevat tulokset vastaavat aina syötettyjä lähtötietoja.

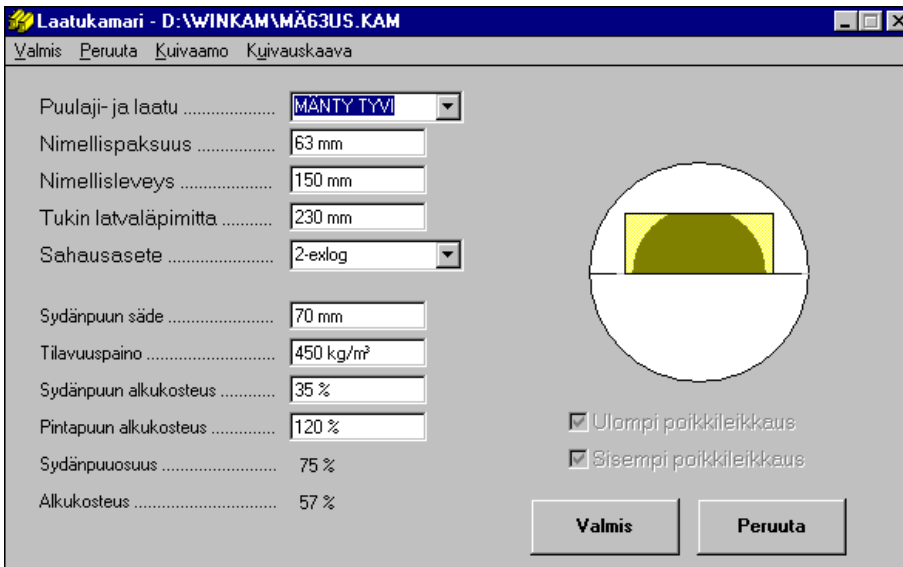
#### 3.1 Tietojen tallentaminen tiedostoon

Sekä lähtötiedot että laskennan tulokset voidaan tallentaa tiedostoon päävalikon kohdassa "Talleta". Tällöin tallennettavalle tiedostolle on annettava nimi, jota koskevat tavanomaiset tiedostonimiä koskevat rajoitukset. Nimelle annetaan automaattisesti tarkentimeksi ".KAM", jonka perusteella LAATUKAMARI myöhemmin tunnistaa tiedostot. Tiedostojen sijainti tietokoneen kovalevyn hakemistojärjestelmässä voidaan

valita kuten Windows-ohjelmissa yleensä. Myös levykkeen käyttö tiedostojen tallentamiseen ja siirtoon tietokoneiden välillä on mahdollista.

Luotavaan tiedostoon tallennetaan automaattisesti kaikki ne tiedot, jotka ohjelmassa tallennushetkellä ovat. Jos siis simulointi on jo suoritettu, tallentuvat sekä lähtötiedot että tulokset, muussa tapauksessa vain lähtötiedot.

### 3.2 Sahatavaran tiedot



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 several input fields and a diagram. The input fields are: '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/m³), 'Sydänpuun alkukosteus' (35 %), 'Pintapuun alkukosteus' (120 %), 'Sydänpuuosuus' (75 %), and 'Alkukosteus' (57 %). To the right is a circular diagram of a log cross-section with a yellow semi-circle representing the saw cut. Below the diagram are two checked checkboxes: 'Ulompi poikkileikkaus' and 'Sisempi poikkileikkaus'. At the bottom are 'Valmis' and 'Peruuta' buttons.

Kuva 4. Kuivattavan sahatavaran tiedot.

“Sahatavara”-ikkunassa (kuva 4) nähdään simuloinnin tarvitsemat perustiedot simuloinnin kohteena olevasta sahatavarasta. Sahatavaran tiedot (erityisesti alkukosteus) koskevat vastasahattua tavaraa; mahdollisen sahauksen jälkeen tapahtuvan esikuivumisen vaikutus otetaan huomioon määriteltäessä kuivauskaavaa. Tiedot ovat

- puulaji ja -laatu: MÄNTY TYVI, MÄNTY LATVA tai KUUSI
- sahatavaran paksuus: nimellisarvo [mm]. Kuivauserän oletetaan koostuvan yhtä dimensiota olevasta tavarasta.
- sahatavaran leveys: nimellisarvo [mm]
- tukin latvaläpimitta: kuorettoman, tuoreen tukin latvan läpimitta [mm]

- sahausasete: 2-exlog, 3-exlog, 4-exlog tai sivulauta. Sahausasete vaikuttaa paitsi sydänpuuosuuteen ja sitä kautta alkukosteuteen, myös tavaran halkeiluerkkyyteen.
- sydänpuun säde: tukin latvasta mitattu sydänpuun läpimitta [mm]. Ohjelma laskee automaattisesti oletusarvon puulajin ja tukin läpimitan perusteella.
- tiheys: puun kuivapaino jaettuna sen tuoretilavuudella. Ohjelma antaa automaattisesti oletusarvon perustuen valittuun puulajiin ja -laatuun.
- sydänpuun alkukosteus: Normaalisti 35%, mutta voi poiketa tästä suurestikin, jos sahatavara on ollut pitkään esimerkiksi vesivarastossa.
- pintapuun alkukosteus: Normaalisti 120%, mutta talvikautena erityisesti kuusen kohdalla enemmänkin.
- ulompi / sisempi kappale. Näillä valinnoilla valitaan 3-exlog- ja 4-exlog-tapauksissa kuivaukseen mukaan otettavat kappaleet. Aina on valittava vähintään toinen vaihtoehto.

Lisäksi nähdään näiden tietojen perusteella lasketut sahatavaran keskimääräinen sydänpuuosuus ja alkukosteus. Oletusarvoina käytetään sekä VTT:n omiin tutkimustuloksiin että kirjallisuudessa mainittuihin lukuihin pohjautuvia keskimääräisiä arvoja. Ohjelma ei hyväksy kunkin suureen sallitun alueen ulkopuolella olevia arvoja.

Sahatavaran tietojen syöttö lopetetaan painamalla "Valmis". Haluttaessa peruuttaa tehdyt muutokset valitaan "Peruuta", jolloin voimaan jäävät ne arvot, jotka ikkunassa olivat siihen tultaessa.

### 3.3 Kuivaamon tiedot

Aika [h]	Ilman nopeus [m/s]	Suunnan vaihtoväli [h]
0	3.5	2
100	2.5	4

Kuva 5. Kuivaamon tiedot

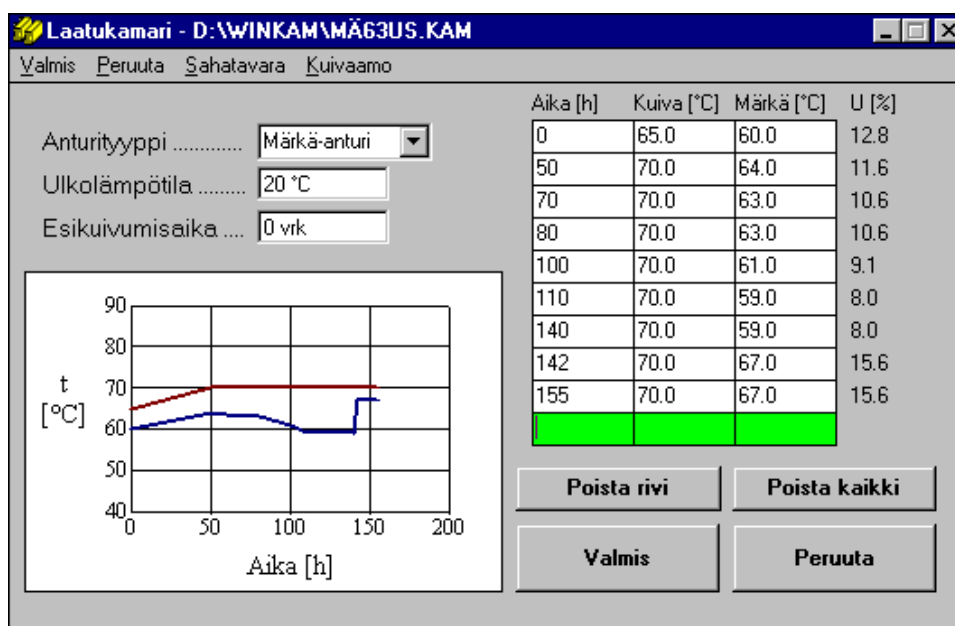
“Kuivaamo”-ikkunassa (kuva 5) nähdään perustiedot simuloitavasta kuivaamosta:

- simuloinnin lopetuskriteeri: asetuksella AIKA simulointia jatketaan seuraavassa kohdassa määriteltävään kuivausaikaan saakka, asetuksella LOPPUKOSTEUS simuloidaan määriteltäyn loppukosteuteen saakka.
- kuivausaika täysinä tunteina tai tavoitekosteus [%], edellisen kohdan valinnasta riippuen
- ohjausanturit: asetuksella PAINESUOLI kuivaamon ohjaus tapahtuu kuormiin puhallettavan ilman olosuhteiden mukaan, asetuksella KESKIARVO vastaavasti paine- ja imupuolen olosuhteiden keskiarvon ohjaamana.
- anturityyppi: MÄRKÄ-ANTURI tai RH-ANTURI. Määrittää kuivauskaavan syötössä käytettävän kuivausilman kosteutta kuvaavan suureen. (Itse anturi voi olla muuta tyyppiä.)
- puhallussyvyys [m]: kuivauskuormien yhdessä kerroksessa olevien sahatavarakappaleiden yhteenlaskettu nimellisleveys. Esim: 4 kuormaa 100 mm leveää sahatavaraa, 15 kpl/kerros =  $4 \times 15 \times 0,1 \text{ m} = 6,0 \text{ m}$ .
- rimaväli [mm]: käytettävän rimän todellinen paksuus

- “Laske kosteushajonta”. Tällä asetuksella valitaan, lasketaanko myös loppukosteuden keskihajonta. Valinta vaikuttaa laskentaan kuluvaan aikaan keskimäärin 30 %.
- ilman virtausnopeus rimavälissä [m/s] ja puhallussuunnan vaihtoväli täysinä tunteina. Molemmat voivat muuttua ajan funktioina. Näiden arvojen muuttaminen tapahtuu syöttämällä lukurivejä aika-nopeus-vaihtoväli, joissa aika on annettu tasatunnein. Listaan syötetyt ajat järjestyvät oikeaan järjestykseen automaattisesti. Listan rivi voidaan poistaa painamalla “Poista rivi” ja koko taulukko painamalla “Poista kaikki”. Ensimmäistä riviä (aika=0) ei kuitenkaan voida poistaa.

Kuivaamon tietojen syöttö lopetetaan painamalla “Valmis”. Haluttaessa peruuttaa tehdyt muutokset valitaan “Peruuta”, jolloin voimaan jäävät ne arvot, jotka ikkunassa olivat siihen tultaessa.

### 3.4 Kuivauskaava



Kuva 6. Kuivauskaavan syöttö.

Simuloitavan kamarin ohjauskohdan olosuhteet määräytyvät ajan funktioina kuvan 6 mukaisessa ”Kuivauskaava”-ikkunassa annettavan kuivauskaavan mukaisesti. Kuivauskaava annetaan käännepisteiden avulla taulukkoon, jonka rivit järjestyvät oikeaan järjestykseen automaattisesti. Listan rivi voidaan poistaa painamalla “Poista

rivi” ja koko taulukko painamalla “Poista kaikki”. Kaavan käännepeisteitä voidaan korjata antamalla uudelleen jo kaavassa olevaa ajanhetkeä vastaavat arvot.

Muut ikkunassa syötettävät arvot ovat

- ulkolämpötila: vuorokauden keskilämpötila esikuivumisen aikana. Ulkolämpötilan tarkalla arvolla ei ole käytännön merkitystä, mutta alle 0 °C olevan lämpötilan vallitessa ohjelma olettaa puun olevan jäässä.
- esikuivumisaika täysinä vuorokausina sahauksesta kuivauksen alkuun. Mahdollista ennen sahausta tapahtuvaa tukkien esikuivumista ohjelmassa ei oteta huomioon.

Kuivauskaava voidaan antaa vaihtoehtoisesti joko kuiva- ja märkälämpötilojen avulla tai lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla. Kuivauskaavan syöttötapa valitaan kohdassa “Anturityyppi”. Käytössä oleva syöttötapa nähdään ruudun yläosassa. Jos syöttötapaa vaihdetaan, kun kuivauskaava on jo annettu, kaavan esitystapa muuntuu automaattisesti. Kaava nähdään myös graafisesti, jolloin punainen käyrä kuvaa aina lämpötilaa ja sininen käyrä märkälämpötilaa tai suhteellista kosteutta. Kaavataulukon oikealla puolella nähdään lisäksi puun tasapainokosteuden arvo kussakin käännepeisteessä.

Kuivauskaavaa koskevat seuraavat rajoitukset:

- Kuivauslämpötilan on oltava 10 - 90 °C.
- Suhteellisen kosteuden on oltava 30 - 100 %.
- Märkälämpötila ei voi olla kuivalämpötilaa korkeampi eikä alhaisempi kuin 30 % suhteellista kosteutta vastaava arvo.

Kuivauskaavan ensimmäinen piste (ajanhetki 0) voidaan syöttää varsinaisen kuivausvaiheen ensimmäisenä pisteenä. Tällöin ohjelma simuloi kuivauksen lämmitysvaiheen (kuivaamon ylösajo) automaattisesti olettaen, että kuivan ja märän lämpötilan erotus tai suhteellinen kosteus on tänä aikana sama kuin ensimmäisessä kuivauskaavaan annetussa pisteessä.

Jos kaava ei mahdu numeerisessa muodossa näyttöön kokonaisuudessaan, sen oikealla puolella on palkki, jonka avulla näyttöä voidaan vierittää alas ja ylös.

Kuivauskaavan syöttö lopetetaan painamalla “Valmis”. Haluttaessa peruuttaa tehdyt muutokset valitaan “Peruuta”, jolloin voimaan jäävät ne arvot, jotka ikkunassa olivat siihen tultaessa.

## 4. Laskenta

Kuivauskaavan optimointi tapahtuu LAATUKAMARI-ohjelmalla käytännössä siten, että ensin lasketaan varsinaisen kuivausvaiheen kuivumisjännityksiin perustuva optimaalinen kuivauskaava, minkä jälkeen siihen erikseen lisätään tarvittavat tasaannutusvaiheet. Ensimmäisessä vaiheessa simulointia kannattaa jatkaa haluttua loppukosteutta 1 prosenttiyksikkö kuivempaan kosteuteen saakka, jolloin saadaan selville varsinaiseen kuivausvaiheeseen kuluva aika. Tämän jälkeen lisätään kuivauskaavaan tasaannutusvaiheet ja niiden vaatima aika.

Laskenta käynnistetään päävalikon painikkeesta "Laskenta". Laskenta voidaan keskeyttää milloin tahansa painamalla sen aikana kuvaruudun yläreunassa "Peruuta", jolloin muistiin jäävät siihen mennessä lasketut tulokset. Samoin toimitaan laskennan päätyttyä, jolloin päästään takaisin ohjelman pääikkunaan.

### 4.1 Esikuivuminen

Jos sahatavaraa ei kuivata välittömästi sahauksen jälkeen, sen pinta kuivuu nopeasti puunsyiden kyllästymispisteen alapuolelle ja kuivumisjännityksiä alkaa syntyä. Tällä on etenkin lämpimänä vuodenaikana olennainen vaikutus kuivaushalkeilun syntymisessä, mutta myös talvella asiaan tulisi kiinnittää huomiota. Jäätäneessä puussa veden liikkuminen kohti puun pintaa on lähes estynyt, joten puun pintaan syntyy helposti hyvinkin suuri kosteusgradientti. Kun tällainen pinnaltaan kuivahtanut sahatavara lämmitetään varomattomasti, halkeilu on selvästi runsaampaa kuin vastasahatulla tavaralla.

LAATUKAMARI olettaa esikuivumisen tapahtuvan käyttäjän syöttämän ulkolämpötilan määrittelemissä vakio-olosuhteissa, joissa auringon lämpösäteily tai tuulen aiheuttama ilmavirtaus eivät vaikuta kuivumista edistävästi. Ulkoilman suhteelliseksi kosteudeksi oletetaan tällöin vakio 80 %, minkä katsotaan vastaavan koko vuorokauden keskiarvoa riittävän tarkasti. Myös ulkolämpötilaa syötettäessä on huomattava, että kyseessä on esikuivumisaikana vallitseva vuorokautinen keskilämpötila.

### 4.2 Alkulämmitys

Viimeisimpien tutkimusten mukaan alkulämmitysvaiheella on olennainen vaikutus sahatavaran kuivauksen laatuun erityisesti kuivaushalkeilun osalta. Varomattomasti suoritettu alkulämmitys aiheuttaa puun pinnalle mikrohalkeilua, joka myöhemmässä

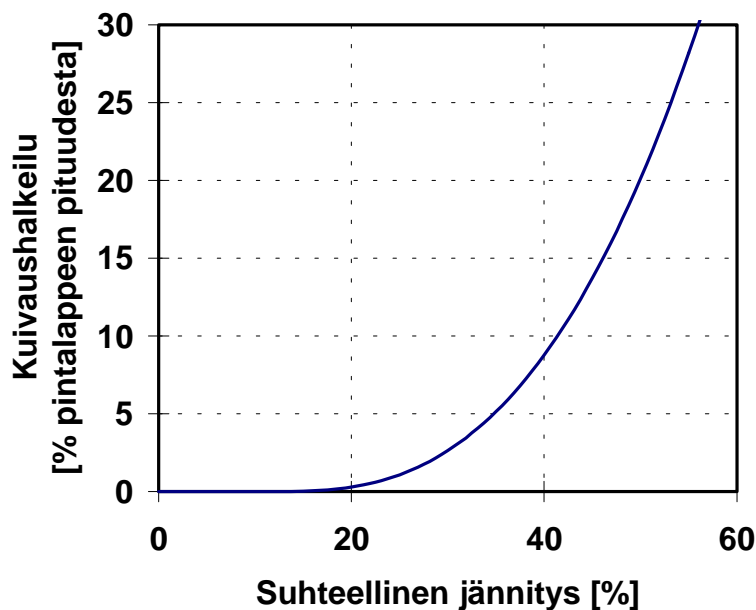


kuivauksen vaiheessa kasvaa silmin havaittavaksi halkeiluksi varovaisellakin kuivauskaavalla kuivattaessa.

LAATUKAMARI olettaa alkulämmitysvaiheessa noudatettavan kuivauskaavaa, jossa kuivan ja märän lämpötilan erotus (tai suhteellinen kosteus) on sama kuin ensimmäisessä kuivauskaavaan syötetyssä pisteessä. Ylösajoon kuluva aika määräytyy vallitsevan ulkolämpötilan mukaan siten, että kylmällä säällä aikaa kuluu enemmän. Jos käytävissä on mitattua tietoa todellisesta alkulämmitysvaiheesta toteutuvasta kuivauskaavasta, on parasta käyttää tätä tietoa laskennassa hyväksi ja syöttää ensimmäiseksi kuivauskaavan pisteeksi kuivaamossa välittömästi käynnistyksen jälkeen vallitsevat olosuhteet.

### 4.3 Varsinainen kuivausvaihe

Varsinaisessa kuivausvaiheessa optimaalinen toimintatapa on kuivata sahatavara siten, että puun pinnalla halkeilua aiheuttavat kuivumisjännitykset pysyvät kuivauksen laatutavoitteen mukaisesti valitulla vakiotasolla. Tulokseksi saatava halkeilun määrä riippuu jännitystasosta kuvan 7 mukaisesti.

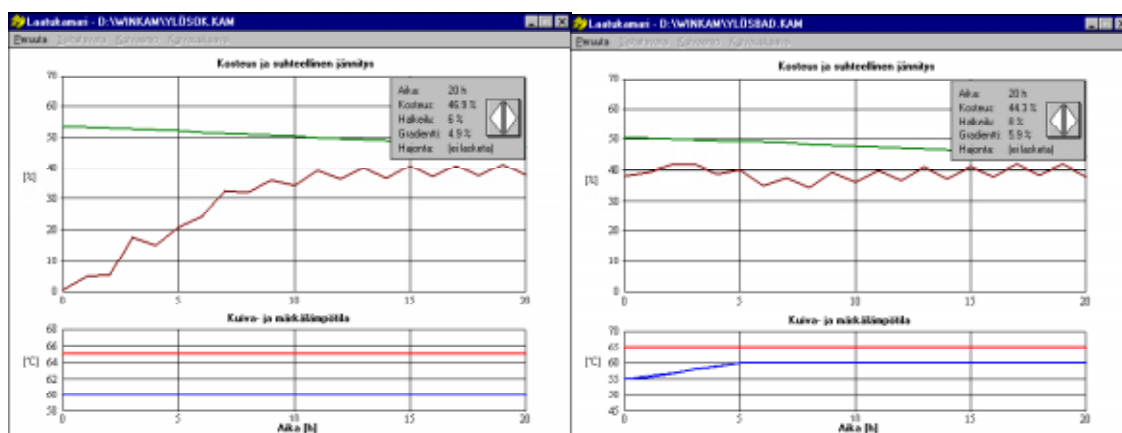


*Kuva 7. Sahatavaran halkeilupituuden riippuvuus simuloidusta suhteellisesta jännityksestä*

LAATUKAMARIn tulostama suhteellisen jännityksen käyrä kuvaa kuivaamossa kulloinkin vallitsevaa suurinta jännityksen arvoa. Näin ollen halkeiluprosentti ei ole

suoraan laskettavissa käyrän huippuarvosta, vaan se lasketaan ohjelmassa keskiarvona kuivaamon eri osissa simuloituista tapauksista.

Aivan kuivauksen alussa kuivumisjännityksiä ei välttämättä vielä simuloinnissa synny, joten kuivauskaavaa ei voida niiden mukaan optimoida. Tällöin kaava tulee valita siten, että jännitysten alkaessa kasvaa kuivausilman kosteutta ei jouduta kuivumisjännitysten hillitsemiseksi nostamaan, ks. kuva 8. Tällainen tilanne johtuu siitä, että jännitykset tulostetaan ohjelmassa 3 mm:n syvyydeltä sahatavaran pinnasta, jolloin mikrohalkeilua on jo voinut syntyä ennen kuivumisjännitysten syntymistä. Tarkastelusyvyys 3 mm on valittu parhaan korrelaation saamiseksi simuloitujen kuivumisjännitysten ja teollisuuden koekuivauksissa havaitun halkeilun välille.



Kuva 8a - b. Oikeaoppinen (vasemmalla) ja huono (oikealla) kuivauskaavan alku.

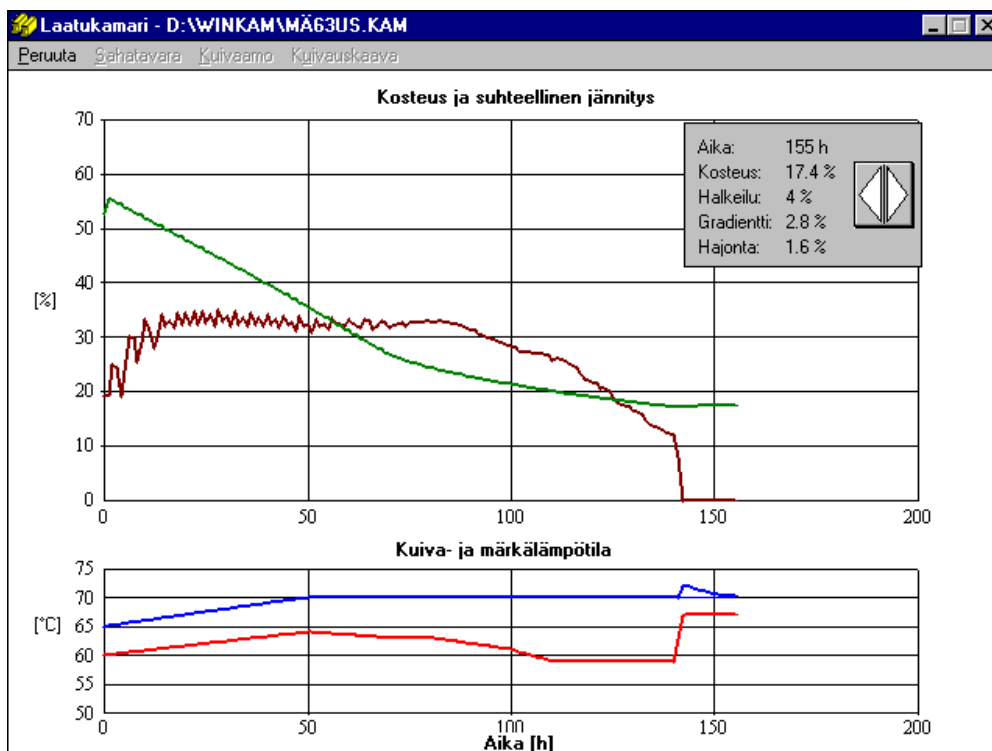
Kuivattaessa alhaiseen loppukosteuteen kuivumisjännitykset puun pinnalla kääntyvät jossakin vaiheessa puristusjännityksiksi eikä halkeilun riskiä enää ole. Kuivauksen ohjaus jännitystason avulla ei tällöin ole enää mahdollista, vaan käytettävä ilman kosteus on suhteutettava tavoitteena olevaan loppukosteuden keskihajontaan. Mitä suuremmalla lämpötilaerotuksella (eli pienemmällä RH-arvolla) lopussa kuivataan, sitä suurempi kosteuden hajonta tulokseksi saadaan.

## 4.4 Lopputasaannutus

Jotta sahatavaran kosteuden hajonta ja sen sisäinen kosteusjakauma, kosteusgradientti, täyttäisivät tiukatkin laatuvaatimukset, tarvitaan kuivauksen lopussa usein lopputasaannutusvaiheita. Tasaannutus voidaan jakaa kahteen osaan:

1. Kappaleiden välisen kosteushajonnan pienentäminen siten, että kuivausilman olosuhteiden määräämä tasapainokosteus asetetaan tavoitekosteutta 2 - 3 prosenttiyksikköä alemmaksi, jolloin kuorman keskimääräinen kosteus siis laskee. Tätä vaihetta on tarve jatkaa yleensä 10 - 30 tuntia sahatavarasta ja kosteuden tasaisuudelle asettavista vaatimuksista riippuen, mutta alhaisiin loppukosteuksiin kuivattaessa se voidaan myös korvata käyttämällä varsinaisen kuivausvaiheen lopussa riittävän korkeaa ilman kosteutta.
2. Kosteusgradientin tasaaminen tapahtuu tehokkaimmin höyryttämällä jo jäähdytettyä puuta (Hukka ja Tarvainen 1997). Käytännössä tähän ei useinkaan ole mahdollisuutta, joten tasaannutus suoritetaan nostamalla kuivausilman kosteus (puun tasapainokosteus) niin ylös kuin mahdollista. Tässä vaiheessa kuorman keskimääräinen kosteus hieman kasvaa, mutta liiasta kostumisesta ei yleensä ole pelkoa. Huomioon tulee kuitenkin ottaa kuivaamon suorituskyky, jotta liian tehoton vesisumutus ei aiheuta ongelmia kuivaamon lattialle valuvan veden takia.

Lopputulokseksi näin saatava kuivauskaava näyttää kuvassa 9 esitetyn kaltaiselta.



Kuva 9. LAATUKAMARILLA optimoitu kuivauskaava 63 x 150 mm männyn kuivaukseen.

## 5. Tulosten tarkastelu

Päävalikon kohdasta “Jännitykset” saadaan näkyviin sama laskennan tulokset esittävä ikkuna kuin laskennan aikana piirtyy. Ikkunassa nähtävät numeeriset tulokset koskevat kuivauksen lopetushetkeä, mutta ne voidaan nähdä myös muina ajanhetkinä painelemalla hiirellä tulosten vieressä olevia nuolia.

LAATUKAMARIn antamat tulokset perustuvat kattavien laboratorionkokeiden lisäksi 16 suomalaisella sahalla 1990-luvun aikana tehtyihin koekuivauksiin. Näissä kuivauksissa on mitattu toteutunut kuivauskaava, sahatavaran kosteus, kosteusgradientti ja pintalapteen halkeilu. Kokeita on tehty sekä männyllä että kuusella siten, että päähuomio on kiinnitetty paksun, hyvälaatuisen sahatavaran kuivaukseen. Kattavimmat koesarjat on raportoitu julkaisuissa Hakala (1992), Forsén ym. (1993) ja Länsiluoto (1994).

### 5.1 Keskimääräinen kosteus

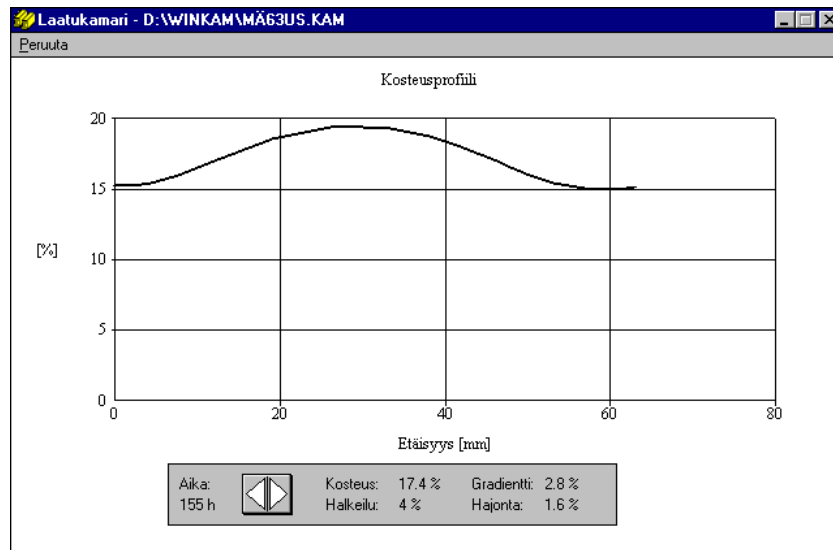
Ohjelmassa simuloitu keskimääräinen kosteus merkitsee koko kuivauserästä tasaisella otannalla välittömästi kuivauksen päätyttyä punnitus-kuivausmenetelmällä määritettyä kosteuden keskiarvoa. Jos kosteus määritetään käyttämällä sähköistä kosteusmittaria (piikkimittaria), on erityistä huomiota kiinnitettävä oikeaan lämpötilakorjaukseen (puun todelliseen lämpötilaan) ja käytettävään mittausvyönteeseen. Etenkin paksun sahatavaran kosteusmittarilla määritetty kosteus on useimmiten korkeampi kuin punnituskuivauksella saatu arvo. Myös sahatavaran lopputasaannutus vaikuttaa herkästi vastusmittarin antamaan arvoon selvästi enemmän kuin mitä todellinen kosteuden muutos tasaannutuksen aikana on.

### 5.2 Halkeilu

LAATUKAMARIn laskema halkeiluprosentti merkitsee prosentteja sahatavaran pintalapteen pituudesta. Halkeilun numeerinen arvo perustuu 16 sahalla tehtyihin kokeisiin, joissa on mitattu toteutunut kuivauskaava ja todellinen pintalapteen halkeilupituus noin 100:sta pääasiassa U/S-laatusesta sahatavarakappaleesta. Käytettyjä koekappaleita ei ollut millään tavalla lajiteltu, joten näin saatu halkeilu on lukuarvona suurempi kuin jos joukosta olisi poistettu lylyiset, vinosyiset, vesivarastoidut yms. herkästi halkeilevat kappaleet.

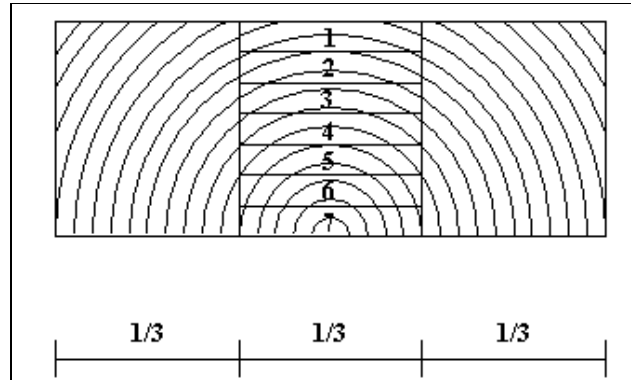
### 5.3 Kosteusgradientti

Simuloinnin tuloksena nähdään päävalikon ”Kosteusgradientti”-painikkeella sahatavaran sisäinen kosteusjakauma, kosteusgradientti (kuva 10). Tämän perusteella lasketaan lisäksi gradientille numeerinen arvo, joka European Drying Groupin (EDG) valmisteleman yleiseurooppalaisen kuivauslaatusuosituksen mukaisesti on sahatavaran keskiosan ja 1/6-syvyydellä vallitsevan kosteuden erotus. Myös tässä ikkunassa nähdään numeeriset tulokset kuivauksen lopetushetkeltä.



Kuva 10. Simuloitu sahatavaran sisäinen kosteusjakauma.

Kokeellisesti kosteusgradientti on määritetty käyttämällä kuvan 11 mukaisia koepaloja, joiden kosteus on määritetty punnitus-kuivausmenetelmällä. Poikkileikkauksesta otettavien viipaleiden lukumäärä riippuu sahatavaran paksuudesta siten, että viipaleita on pariton määrä ja yhden viipaleen paksuus on 5 - 8 mm.



Kuva 11. Sahatavaran sisäisen kosteusjakauman määrittäminen kokeellisesti.

## 5.4 Kosteuden hajonta

Loppukosteuden hajonta kuivauserässä aiheutuu useista eri tekijöistä, joista kaikkia ei voida ottaa simuloinnissa huomioon ilman käytettävässä kamarissa suoritettuja mittauksia. Tärkeimmät kuivatun sahatavaran kosteuden hajontaa aiheuttavat tekijät ovat

- alkukosteuden hajonta, joka johtuu pääasiassa sydänpuuosuuden vaihtelusta eri sahatavarakappaleiden välillä. Alkukosteuden hajonta on suurin silloin, kun sahataan 3-exlog- ja 4-exlog -aseteilla.
- puhallussyvyys, joka merkitsee annetun kuivauskaavan toteutumista erilaisena kuivaamon eri osissa, vaikka kuivaamon toiminta olisi täysin optimaalistakin. Olennaisin asiaan vaikuttava tekijä on kuivauskuorman rimavälissä vallitseva ilman nopeus.
- puun kuivumiseen vaikuttavien materiaaliominaisuuksien vaihtelu. Suurin yksittäinen tähän vaikuttava tekijä on puun tiheys, mutta myös muista syistä johtuvaa tilastollista vaihtelua esiintyy.
- kuivaamossa kiertävän kuivausilman olosuhteiden epätasaisuus. Sekä lämpötilan, ilman kosteuden että ilman virtausnopeuden vaihtelut aiheuttavat kuivumisen epätasaisuutta.

Näiden tekijöiden keskinäinen merkittävyys riippuu kuivattavasta sahatavarasta ja tavoitteena olevasta loppukosteudesta. Ohuella, alkukosteudeltaan korkealla tavaralla korostuvat kuivaamon ominaisuudet (ilman nopeus ja sen tasaisuus, lämpötila), kun taas paksulla, sydänpuuvaltaisella tavaralla puun materiaaliominaisuuksien merkitys kasvaa. Materiaaliominaisuudet ovat kosteushajonnan suhteen avainasemassa myös alhaisiin loppukosteuksiin kuivattaessa.

LAATUKAMARI-ohjelman taustalla olevassa matemaattisessa mallissa kosteuden hajonta aiheutuu sahatavaran alkukosteuden, kuivaamon puhallussyvyyden ja puun materiaaliominaisuuksien vaihtelun yhteisvaikutuksesta. Lisäksi kuivaamon vaikutus on pyritty huomioimaan eräänlaisena keskiarvona tutkittujen kuivaamoiden ominaisuuksista. Hajonnan simuloitu arvo ei siis välttämättä vastaa tarkasti käytännössä toteutuvaa arvoa, mutta usein olennaisempaa onkin kuivauskaavan muuttamisella saatavan hajonnan muutoksen ennakointi.

Myös hajontalaskelmien parametrit on sovitettu siten, että simuloinnin tulos vastaa koekuivauksissa välittömästi kuivauksen päätyttyä punnitus-kuivausmenetelmällä määritettyä loppukosteuden keskihajontaa. Sähköisellä kosteusmittarilla mitattaessa hajontaa syntyy edellä mainittujen tekijöiden lisäksi puun sähkönjohtavuuden vaihtelusta sekä itse mittarin ominaisuuksista. Näin ollen hajonta on mittarilla mitattuna useimmiten liian suuri.

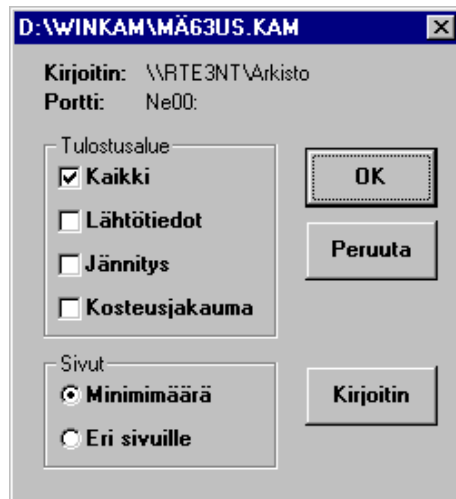
## **5.5 Tarkastelun ulkopuolelle jäävät kuivauslaadun osatekijät**

Kokonaan tarkastelun ulkopuolelle LAATUKAMARIssa jäävät kuivauksen aiheuttamat välittömät muodonmuutokset (lape- ja syrjävääritys sekä kierous). Myös näiden simulointi on sinänsä mahdollista, mutta tehtyjen suhteellisen suppeiden tutkimusten mukaan asiaan voidaan vaikuttaa kuivauskaavan avulla vain hyvin rajoitetusti (Tarvainen & Hukka 1997). Ensisijaisesti asiassa on kysymys käytettävän puuraaka-aineen luontaisista ominaisuuksista, joiden ilmentymistä kuivauksenaikaisina muodonmuutoksina voidaan säädellä sahausasetteen valinnalla. Pyrittäessä välttämään välittömiä muodonmuutoksia ensisijainen huomio on kiinnitettävä oikeaan loppukosteuteen. Jo 2 prosenttiyksikön suuruinen ylikuivuminen saattaa tietyissä tapauksissa aiheuttaa ratkaisevaa kierouden kasvua.

Sahatavaran pinnan kuivauksenaikaiset värimuutokset ovat matemaattisesti hyvin vaikeasti mallinnettavissa, joten näitä asioita ei ole sisällytetty LAATUKAMARI-ohjelmaan. Kysymys on kemiallisten reaktioiden aiheuttamista muutoksista, joita voidaan hillitä lähinnä käyttämällä riittävän alhaista lämpötilaa. Kokeiden perusteella tiedetään lisäksi, että märkä puu värjäytyy nopeammin ja alhaisemmassa lämpötilassa kuin kuiva. Jos värimuutokset ovat kuivauslaadun kriittinen tekijä, kuivauskaava on tehtävä siten, että kuivauslämpötilaa nostetaan vähitellen kuivumisen edistyessä.

## 5.6 Tulostaminen paperille

LAATUKAMARilla voidaan tulostaa paperille sekä kuivauksen lähtötiedot että lasketut tulokset halutussa laajuudessa. Tulostus tapahtuu päävalikon “Tulosta”-painikkeella, josta päästään kuvassa 12 esitettyyn tulostusikkunaan. Tästä voidaan valita tulostuksen laajuus sekä se, tulostuuko kukin tieto omalle sivulleen. Esimerkki ohjelmalla tehdyistä tulosteista on liitteessä 1.



Kuva 12. LAATUKAMARIn tulostusikkuna.

Jos muuta ei valita, tulostus tapahtuu Windows-järjestelmässä määritellyä oletuskirjoitinta käyttäen. Jos halutaan käyttää jotakin muuta koneeseen tai käytettävään verkkoon kytkettyä kirjoitinta, valitaan painike “Kirjoitin”, joka avaa mahdollisuuden vaihtaa kirjoitinta. Näin valittu kirjoitin säilyy oletuskirjoittimena myös ohjelman lopettamisen jälkeen.

Myös värejä tuottavalla kirjoittimella kuvat tulostuvat harmaasävyisinä.



## 6. Yhteystiedot

LAATUKAMARIn tekijöiden yhteystiedot löytyvät myös ohjelman päävalikon ”Tietoja”-ikkunasta:

Antti Hukka / Juha Kurkela  
VTT Rakennustekniikka / Puutekniikka  
PL 1806  
02044 VTT

Puh. (09) 456 5473  
Fax (09) 456 7027  
Sähköposti: Antti.Hukka@vtt.fi

## 7. Yhteenveto

Sahatavaran kuivauksen simulointiohjelma LAATUKAMARIn ensimmäisellä Windows-pohjaisella versiolla pystytään ennakoimaan tärkeimmät suomalaisen havusahatavaran kuivauslaadun osatekijät: keskimääräinen kosteus, kosteuden hajonta, pinnan halkeilu ja kosteusgradientti. Jos käytettävä kuivaamo toteuttaa olosuhteet sellaisina, kuin on aiottu, ja jos myös muut simuloinnin lähtötiedot vastaavat todellisuutta, simuloinnin antama tulos on lähes poikkeuksetta teolliseen tarkoitukseen riittävän luotettava. Lähtötietojen osalta ongelmallisimpia tekijöitä ovat alkulämmitysvaiheessa toteutuva kuivauskaava sekä kuivauskuorman rimavälissä vallitseva ilman nopeus.

## Lähdeluettelo

Forsén H., Ranta-Maunus A., Hakala J. & Siimes H. 1993. Sahatavaran halkeilu teollisuuden koekuivauksissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 46 s. + liitt 29 s. VTT Julkaisuja 787.

Hakala J. 1992. Sahatavaran kuivauksen simulointiohjelman testaus teollisuusmitta-kaavan kuivauskokeilla. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos (diplomityö). 63 s. + liitt 39 s.

Hukka, A. 1996. A simulation program for optimisation of medium temperature drying on an industrial scale. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Québec City, Canada, 13 - 17 Aug. 1996. Québec City : Forintek Canada Corp., 1996. S. 41 - 48.

Hukka A. & Tarvainen V. 1997. Höyryn käyttö sahatavaran kuivauksessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 45 s. + liitt. 11 s. VTT Julkaisuja 826.

Länsiluoto K. 1994. Sahatavaran kuivaushalkeilun vähentäminen. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos (diplomityö). 68 s. + liitt 13 s.

Tarvainen V. & Hukka A. 1997. Sahatavaran kierouden vähentäminen kuivauksen keinoin. Esiselvitys. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 36 s. VTT Tiedotteita 1861.

# Esimerkki LAATUKAMARI-ohjelman tulosteista

Laatukamari 1.00 Windows

D:\WINKAMESIMER-1\MA63US.KAM

10/22/97 10:03:54 AM

## Laskennan lähtötiedot:

Puulaji- ja laatu	MÄNTY TYVI	Lopetuskriteeri	Aika
Nimellispaksuus	63 mm	Tavoiteaika	155 h
Nimellisleveys	150 mm	Ohjausanturit	Painepuoli
Tukin latvaläpimitta	230 mm	Anturityyppi	Märkä-anturi
Sahausasete	2-exlog	Puhallussyvyys	6.0 m
Sydänpuun säde	70 mm	Rimaväli	25 mm
Tilavuuspaino	450 kg/m <sup>3</sup>	Ulkolämpötila	20 °C
Sydänpuun alkukosteus	35 %	Esikuivumisaika	0 vrk
Pintapuun alkukosteus	120 %		
Sydänpuuosuus	75 %		
Alkukosteus	57 %		

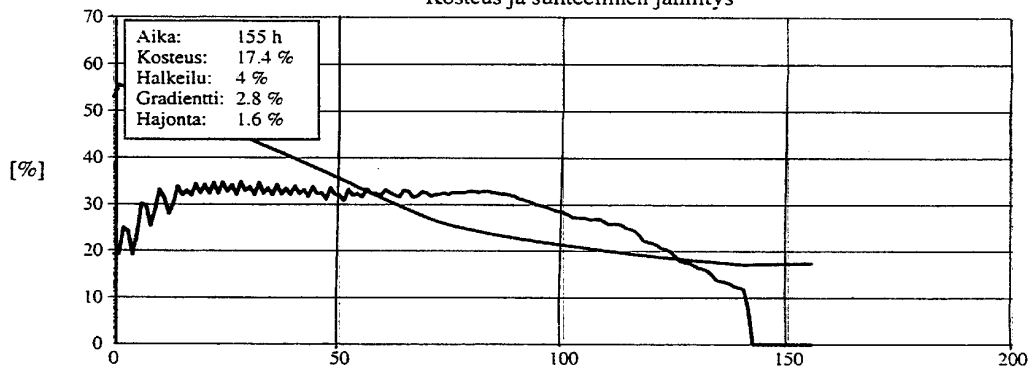
## Ilman virtausnopeus rimavälissä ja puhallussuunnan vaihtoväli

Aika [h]	Ilman nopeus [m/s]	Suunnan vaihto [h]
0	3.5	2.0
100	2.5	4.0

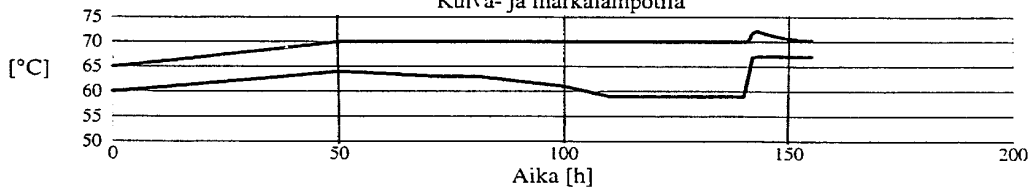
## Kuivauskaava

Aika [h]	Kuiva [°C]	Märkä [°C]	RH [%]	U [%]
0	65.0	60.0	78.4	12.8
50	70.0	64.0	75.6	11.6
70	70.0	63.0	72.0	10.6
80	70.0	63.0	72.0	10.6
100	70.0	61.0	65.2	9.1
110	70.0	59.0	58.9	8.0
140	70.0	59.0	58.9	8.0
142	70.0	67.0	87.2	15.6

### Kosteus ja suhteellinen jännitys



### Kuiva- ja märkälämpötila



Kosteusprofiili

