

# RAPPORT

Lars Malmquist

## **Kammartorkning av virke på basis av en diffusionsmodell**

---

*Kiln Drying of Lumber on the  
Basis of a Diffusion Model*

**Träteknik**

Korrelationen mellan  $(w_{m1})_0$  och densiteten  $\rho$  är betydligt sämre,  $r = 0,50$ . Den tolerabla fuktkvotsgradienten under torkningen är således huvudsakligen beroende av den råa fuktkvoten i det växande trädet.

Den normala krympningen av de olika träslagen finns också tabellerad i Dry Kiln Operators Manual. Anmärkningsvärt nog finns det ingen korrelation ( $r \approx 0$ ) mellan denna och  $(w_{m1})_0$ . Detta tyder på att det mer är cellkonstruktionens förmåga att deformeras som bestämmer torkningsspänningarnas storlek än själva krympningen.

Våttemperaturintervallet för 25-50 mm virke är tabellerat i tabell 1a och 2a och medelvärdena inritade i figur 8 som funktion av parametern  $\rho_{max}/\rho \cdot w_{m1}$ , där den maximala lumenfria densiteten är

$$\frac{1}{\rho_{max}} = \frac{u_s}{1000} + \frac{1}{1500} \quad , \quad \rho_{max} = 1090 \text{ kg/m}^3$$

$u_s$  = fibermättnadsfuktkvoten (0,25)

1000 = vattnets densitet (kg/m<sup>3</sup>)

1500 = cellväggens densitet (kg/m<sup>3</sup>)

Korrelationskoefficienten för dessa båda variabler är  $r = 0,75$ . Något samband mellan våttemperatur och övriga parametrar finns ej.

Om man indelar träslagen i tre grupper, temperaturkänsliga, temperaturtåliga och övriga träslag, kan våttemperaturens beroende av parametern  $\rho_{max}/\rho \cdot w_{m1}$  skrivas

$$t_v/t_0 = 1 + \rho_{max}/\rho \cdot w_{m1} \quad (29)$$

Grupp 1      $t_0 = 18 - \underline{19} - 20$

2             $20 - \underline{22} - 24$

3             $24 - \underline{27} - 30$

Temperaturintervallen för vardera gruppen innehåller då i stort sett den experimentella temperaturintervallen enligt tabell 1a och 2a. Någon precis definierad våttemperatur existerar givetvis inte för ett visst träslag, däremot kan ett visst intervall anses motiverat. Intervallet är relativt starkt beroende av den vattenmängd  $\rho_{u_{m1}}$  träet innehåller per m<sup>3</sup> vid inträdet i den hygroskopiska torkningsfasen, våttemperaturen minskar med ökad vattenmängd.

Torkningstiden har beräknats i enlighet med Appendix 1 med i rekommenderade scheman angivna värden av  $t_{max}$ . Då  $\theta > \theta_{max}$  torkar man i amerikanska scheman med konstant (maximal) psykrometerskillnad och medelfuktkvoten kan då antagas bli exponentiellt utjämnad mot den mot maximal psykrometerskillnad svarande jämviktsfuktkvoten. Denna metodik för beräkning av torkningstiden stämmer väl med verkligheten enligt nedan behandlade torkningsförsök med furu och gran.

Konditioneringen bör utföras vid en så hög temperatur som torken tillåter, helst 80-85 °C, förutsatt att basningsanordningarna och torkens täthet och värmeisolation tillåter att rätt konditioneringsklimat då kan upprätthållas.

Om konditionering av virket inte erfordras men en liten fuktkvotsspridning är väsentlig, kan utjämningsperioden 1-3 enligt ovan tillämpas separat. Standardavvikelsen blir då cirka  $s = 0,5 \%$ , förutsatt att torken kan realisera en jämn lufttemperatur och jämn lufthastighet samt att blåsdjupet inte är för stort.

Huvudsyftet med det här redovisade arbetet har varit att eliminera behovet av att styra torkningen på basis av fuktkvoten i provplankor och att kunna ersätta denna metodik med en tidsstyrning av torkningen. Detta bör då gälla även för fuktkvotsutjämnning och konditionering. Orienterande konditioneringsförsök har utförts i anslutning till försöken för utprovning av torkningsmodellerna (furuvirke), varav framgår att en tidsstyrning av konditioneringen synes vara möjlig. Fuktkvotsutjämningsperioden har inte undersökts, men torde inte utgöra något stort problem.

Följande mätningar har utförts på virket efter avslutad konditionering:

1. Den utgående medelfuktkvoten på basis av 20 st provstycken, nedtorkade i torkskåp.
2. Fuktkvotsvariationen över virkestvärnsnittet i 20 st provstycken som uppdelats i lameller enligt figur 16.
3. Tillverkning av 20 st gaffelprover enligt figur 16 och mätning av deformationen efter fuktkvotsutjämnning i gaffelproven.
4. Mätning av skevhet, flatböj och kantkrok mot plant underlag enligt figur 17 för allt i torksatsen ingående virke (98-126 st virkesstycken). Mätning på full virkeslängd och omräkning till 3 m längd enligt nedan.

Data från försök med konditionering och medelvärden av uppmätta värden på ythårdhetsmättet  $c_y$  (vid försöken efter fuktutjämnning till cirka 11 % fuktkvot) och fuktgradientmättet  $c_u$  har införts i tabell 3. Följande samband har härletts ur dessa försök:

$$\frac{a'_{\text{kond}} \cdot \tau_{\text{kond}}}{\delta_1^2} \cdot (1 - F_{t_{\text{max}}}) = C_k \cdot \frac{\theta_{\text{kond}}}{\theta_{\text{max}}} \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \frac{1}{3600} \quad (30)$$

$C_k$  = ythårdhetsberoende faktor (-)

$\tau_{\text{kond}}$  = konditioneringstiden (h)

$\delta_1$  = halva virkestjockleken (m)

$\delta_2$  = halva virkesbredden (m)

$\theta_{\text{kond}}$  = psykrometerskillnad under konditioneringen (°C)

$\theta_{\text{max}}$  = psykrometerskillnad i torkningens slutfas (°C)

$$M1: \quad \Delta w = 0$$

$$M2: \quad \Delta w = \frac{1 - e^{-9(\text{tg}\beta/\beta - 1)^3}}{16 w_s (1 - w_s)} \cdot e^{-\frac{1}{1,28} \left( \ln \frac{w_s}{1-w_s} - m \right)^2}$$

$$m = 0 \text{ för lövträ}$$

$$m = 0,4 \text{ för barrträ}$$

Vid torkning av virke från nyavverkat timmer är  $w_{m0} = w_{m0}^*$ . Vid vattenlagrat respektive förtorkat virke är  $w_{m0} > w_{m0}^*$ .

Diffusiviteten a' beräknas enligt sambandet

$$a' = \frac{140}{e} \cdot F_w \cdot F_{\mu_k} \cdot e^{\beta F_t F_\delta + t/33,4} \cdot 10^{-10}$$

$$F_t = \Phi\left(\frac{70,6 - t}{21,6}\right), \quad \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-x^2/2} dx$$

$$F_\delta = \Phi\left(2,4 \left(1 - \frac{0,015}{\delta_1}\right)\right)$$

$$F_{\mu_k} = \mu_k e^{0,26n_k} + (1 - \mu_k) e^{0,26n_s}$$

$$F_w = 1 - (1 - w_m)^2$$

$$t_{\text{trä}} = t_{\text{max}} - \theta_{\text{max}} (w_{m2} - w_e), \quad w_e = \frac{1}{1 + \theta_{\text{max}}/5}$$

Diffusivitetsnivån n för amerikanska träslag se tabell 1a och 2a. För furu och gran:

Modell	M1	M2
Splintved $n_s$ =	6	7
Kärnved $n_k$ =	4	5

Den tidpunkt då virkesytan når fibermättnadsfuktkvoten ( $w_s = 1$ ) betecknas med  $\tau_1$  och den tidpunkt, då spänningsomvändning antages ske i virkesytan, betecknas med  $\tau_2$ . För barrträ antages generellt att medelfuktkvoten då är  $w_{m2} = 0,6$  ( $u_m = 15\%$ ). För lövträ antages att  $\tau_2$  inträffar då  $\theta$  når  $\theta_{\text{max}} = 28$  °C enligt modellen (A).

För  $\tau < \tau_2$  sätts  $t = t_v$ ,  $F_w = 1$  i formeln för  $a'$ . För  $\tau > \tau_2$  sätts  $\beta F_t F_\delta = 0$ ,  $t = t_{\text{trä}}$  och  $F_w = 1 - (1 - w_{m2})^2$ .  $F_{\mu_k}$  beräknas i beroende av om kärnved ( $\mu_k = 1$ ), splintved ( $\mu_k = 0$ ) eller medelvärde avses. Lövträ och många barrträarter styrs på kärnvedens fuktkvot ( $\mu_k = 1$ ). Svensk furu och gran styrs på splintvedens fuktkvot ( $\mu_k = 0$ ) inom giltighetsområdet för modellen (A).

### Torkanläggningens inverkan på torkningsschemat

Lufthastigheten  $v$  i strömellanrummen inverkar genom värmeövergångstalet  $\alpha$  på den karakteristiska psykrometerskillnaden  $\theta_k$ . Lufthastigheten bör mätas separat för olika virkestjocklekar.

Det ovan angivna värdet av  $\theta_k$  måste korrigeras för torkluftens temperaturfall genom virkestaplarna. Korrigerat värde  $\theta'_k$  kan uppskattas enligt följande, varvid förutsättes, att reversering av cirkulationsluften alltid tillämpas.

1. Om styrning av torkluftens temperatur sker endast på inblåsningssidan av staplarna

$$\theta'_k / \theta_k = \frac{\gamma \cdot L}{1 - e^{-\gamma \cdot L}}$$

2. Om styrning sker på medelvärdet vid in- och utströmning

$$\theta'_k / \theta_k = \frac{\gamma \cdot L}{2} \cdot \frac{1 + e^{-\gamma L}}{1 - e^{-\gamma L}}$$

3. Om styrning sker av temperaturen vid halva blåsdjupet

$$\theta'_k / \theta_k = \frac{\gamma L \cdot e^{-\gamma L / 2}}{1 - e^{-\gamma L}}$$

$$\gamma = \frac{16}{d_s} \cdot v^{-0.33} \cdot (1 - 0,75\mu_k)$$

$L$  = blåsdjup (m)

$d_s$  = strötjocklek (mm)

$v$  = lufthastighet (m/s)

Torkluftens temperaturolikformighet = förhållandet mellan medelvärdet vid in- och utströmning och vid stapelmitt (påverkar utgående fuktkvotsspridningen) är

$$\frac{1}{2} \cdot e^{\frac{\gamma L}{2}} (1 + e^{-\gamma L})$$

Olikformigheten ökar med ökat blåsdjup, minskad lufthastighet, minskad strötjocklek och minskad kärnvedsandel.

Erforderliga parametrar som ingår i modellen

1. Den genomsnittliga råfuktkvoten  $u_m^*$  för träslaget ifråga, som bestämmer intensitetsparametern  $\beta$ .
2. Den ingående medelfuktkvoten  $u_{m0}$  om virket är vattenlagrat eller förtorkat.
3. Den genomsnittliga densiteten  $\rho$  för torkningssatsen.
4. Kärnvedsandelen  $\mu_k$ .
5. Virkets nominella tjocklek och bredd.
6. Lufthastigheten  $v$  i strömmellanrummen för virkestjockleken ifråga (uppmätt värde).
7. Torkanläggningens blåsdjup  $L$  (sammanlagda djupet av virkesstaplarna i cirkulationsluftens riktning).
8. Strötjockleken.

Konditionering

$$\text{Önskad slutfuktkvot} = u_m^* \quad (\%)$$

$$\text{Fuktkvot efter torkning} = u_m^* - 1 \quad (\%)$$

$$\text{Jämviktfuktkvot i konditioneringsklimatet} = u_m^* + \Delta u \quad (\%)$$

$$\Delta u = 2 \text{ à } 3 \quad \% \text{ för barrträ}$$

$$\Delta u = 3 \text{ à } 4 \quad \% \text{ för lövträ}$$

Psykrometerskillnad under konditioneringen

$$\theta_{\text{kond}} = 5 \left( \frac{25}{u_m^* + \Delta u} - 1 \right) \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{Torr temperatur under konditioneringen} = t_{\text{kond}} \quad (^\circ\text{C})$$

Erforderlig konditioneringstid  $\tau_{\text{kond}}$  (h) erhålles ur

$$\frac{a'_{\text{kond}} \cdot \tau_{\text{kond}}}{\delta_1^2} (1 - F_{t_{\text{kond}}}) = 0.18 \cdot \frac{\theta_{\text{kond}}}{\theta_{\text{max}}} \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \frac{1}{3600}$$

$$a'_{\text{kond}} = \frac{140}{\rho} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{u_m^*}{25} \right)^2 \right] \cdot F_{\mu_k} \cdot e^{t_{\text{kond}}/33.4} \cdot 10^{-10}$$

Lars Malmquist

KAMMARTORKNING AV VIRKE PÅ BASIS AV EN DIFFUSIONSMODELL

*Kiln Drying of Lumber on the Basis of a Diffusion Model*

TräteknikCentrum, Rapport I 8902004

Nyckelord

*conditioning  
diffusion model  
diffusivity  
kiln drying  
kiln drying schedules*

Stockholm december 1988

Rapporter från TräteknikCentrum är kompletta sammanställningar av forskningsresultat eller översikter, utvecklingar och studier. Publicerade rapporter betecknas med I eller P och numreras tillsammans med alla utgåvor från TräteknikCentrum i löpande följd.

Citat tillåtes om källan anges.

---

*Reports issued by the Swedish Institute for Wood Technology Research comprise complete accounts for research results, or summaries, surveys and studies. Published reports bear the designation I or P and are numbered in consecutive order together with all the other publications from the Institute.*

*Extracts from the text may be reproduced provided the source is acknowledged.*

TräteknikCentrum betjänar de fem industrigrenarna sågverk, trämanufaktur (snickeri-, trähus-, möbel- och övrig träbearbetande industri), träfiberskivor, spånskivor och plywood. Ett avtal om forskning och utveckling mellan industrin och Styrelsen för Teknisk Utveckling (STU) utgör grunden för verksamheten som utförs med egna, samverkande och externa resurser. TräteknikCentrum har forskningsenheter, förutom i Stockholm, även i Jönköping och Skellefteå.

---

*The Swedish Institute for Wood Technology Research serves the five branches of the industry: sawmills, manufacturing (joinery, wooden houses, furniture and other woodworking plants), fibre board, particle board and plywood. A research and development agreement between the industry and the Swedish National Board for Technical Development (STU) forms the basis for the Institute's activities. The Institute utilises its own resources as well as those of its collaborators and other outside bodies. Apart from Stockholm, research units are also located in Jönköping and Skellefteå.*

Innehållsförteckning

	<u>Sid</u>
SAMMANFATTNING	3
INLEDNING	4
DET EMPIRISKA TORKNINGSSCHEMAT	6
ANALYTISK FORMULERING AV TORKNINGSSCHEMAT	7
TRÄETS DIFFUSIVITET	14
SYSTEMATISERING AV AMERIKANSKA TORKNINGSSCHEMAN	16
TORKNING ENLIGT MODELLERNA M1 OCH M2	31
KONDITIONERING AV VIRKET EFTER TORKNINGEN	43
APPENDIX 1	61
Formelsammanställning för torkningsmodellerna M1 och M2 med konditionering. Metodik för val av torkningsparametrar.	
APPENDIX 2	75
Prövning av modellerna M1 och M2 genom jämförelse med tork- ningsförsök med furu. Förslag till kompletterande försöks- torkningar.	
SUMMARY	90
LITTERATURREFERENSER	91

## SAMMANFATTNING

Trycket från trävarumarknaden ökar successivt behovet av en tekniskt mer kvalificerad virkestorkning. Ett mer rationellt utnyttjande av trämaterial inom snickeriindustrin kan uppnås genom en förbättrad torkning, som inriktas mot minskade torkningsskador, en homogenare slutfuktkvot och mindre spänningar i materialet på grund av torkningen.

Metodiken att uppnå detta är sedan länge väl känd. Lämpliga scheman för hur torkluftens temperatur och fukt bör regleras under torkningen har empiriskt utprovats för ett mycket stort antal olika träslag. Torkluftens tillstånd sätts därvid i relation till det torkande virkets fuktkvot, som fortlöpande mäts i ett antal "provplankor". Metodiken förutsätter torkning i en kammartork, där klimatet kan varieras på erforderligt sätt.

Huvudsyftet med föreliggande arbete är att på basis av en diffusionsmodell för torkningsförloppet i virket eliminera den vanskliga fuktkvotsmätningen under torkningen och ersätta denna med en för modern styrningsteknik anpassad ekvivalent tidsstyrning av torkningen. Härutöver har uppnåtts att torkningsintensiteten enkelt kan varieras genom ändring av en "intensitetsparameter", vilket förenklar en optimering av torkningen i varje särskilt fall med avseende på relationen torkningstid - kvalitet. Vidare kan hänsyn enkelt tas till olika torkars speciella konstruktiva utformning med hänsyn till lufthastighet och blåsdjup vilket tidigare inte varit möjligt.

Såväl europeiska som amerikanska empiriska torkningsscheman har utnyttjats och därvid gett två något olika modeller, benämnda M1 och M2. En sammanfattning av erforderliga formler för inprogrammering i mikrodator ges i Appendix 1 med riktlinjer för val av torkningsparametrar.

Modellerna har experimentellt prövats för furuvirke genom ett antal försökstorkningar i institutets mobila tork. Därjämte har en preliminär metodik för konditionering av virket i anslutning till torkningen utarbetats. Ytterligare ett antal försökstorkningar för kontroll av modellerna och en vidareutveckling av konditioneringstekniken får anses önskvärda.

Den komplexa naturen hos en generell fuktvandring i trä och dess troliga sammanhang med tillståndet hos de fria hydroxylgrupperna diskuteras. Bindningsförhållandena förändras på ett idag okänt sätt.

## INLEDNING

Torkningen av furu- och granvirke i de nordiska länderna utförs sedan 1950-talet i stor utsträckning i längdcirkulationstorkar. Denna torktyp utvecklades i avsikt att uppnå en i jämförelse med brädgårdstorkningen mer rationell torkning av exportvirket till s k "skeppningstorrhet", d v s en förtorkning av virket till en tillräckligt låg fuktkvot för att blånads- och mögelskador ska undvikas vid lagring av virket.

Utvecklingen vid sågverken har i vissa avseenden inneburit negativa konsekvenser för torkning i längdcirkulationstorkar. Den rationaliserade virkestransporten i form av paketerade varor har gjort en sänkning av fuktkvotsnivån för undvikande av lagringsskador nödvändig, med ökad sprickbildning i de grövre dimensionerna som följd. Den ökade tendensen till sågning i korta serier med täta växlingar mellan furu och gran står i konflikt med längdcirkulationsprincipen och förorsakar därför ojämn torkning och sämre kontroll av torkningen. Den i ökad utsträckning tillämpade inskränkningen i satsning av kanalerna under lördag-söndag verkar i samma riktning.

Dessa olägenheter har i viss mån kunnat motverkas genom byggande av tvåstegskanaler och införande av automatiserad satsning av kanalerna samt under senare år genom en höjning av temperaturnivån under torkningen. Byggande av speciella, för brädtorkning dimensionerade, kanaler och förbättrade styrsystem för torkarna är andra positiva åtgärder.

Trots sådana ansträngningar kännetecknas virkesmarknaden av en alltmer ökande kritik från virkesköparnas sida av vårt sätt att torka virket. Detta kan sammanhånga med sådana faktorer som att man i ökad utsträckning använder även kvinta som snickerivirke, att nya fuktkvotsstandarder tillkommit i köparländerna, att tillverkningsprocesserna blivit mer känsliga för sprickor i virket, o s v. Det är troligt, att det från brädgårdstorkningen nedärvda begreppet skeppningstorr idag inte står i överensstämmelse med de krav köparna till följd av teknikens utveckling numera ställer på virket.

Också från teknisk synpunkt kan invändningar resas mot torkningen. Furu och gran tillhör de mest lättorkade träslagen och kan med lämplig metodik torkas i det närmaste sprickfritt till förhållandevis väldefinierad fuktkvotsnivå och de genom torkningen uppkomna spänningstillstånden kan reduceras genom konditionering i direkt anslutning till torkningen. Det måste anses som råvaruslöseri att inte utnyttja de möjligheter som finns. Den springande punkten är självfallet kostnaden - hur denna ska fördelas mellan tillverkare och köpare.

En torkinvestering är för ett sågverk relativt kostsam, varför man ofta väljer det billigaste alternativet. Man har haft svårt att motivera inköp av en bättre tork och detta är kanske inte så förvånansvärt. Den vinst man skulle göra med ett bättre o/s-utfall är svårbedömd och ganska marginell. Den stora potentiella vinsten, som ligger i en förbättrad torkning, förblir outnyttjad, eftersom det pris man får ut är baserat på den traditionella torkningen.

Under senare år har en öppning skett, som bör kunna leda till att sågverken successivt utnyttjar denna potential i allt större omfattning.

"Vidareförädling" och "kundanpassad torkning" har blivit slagord. Man kan notera, att nyinvesteringar numera till större delen sker i kammartorkar. Det får anses tveksamt, om investering i en längdcirkulationstork för torkning av centrumvirke kan bli lönsam på sikt. Man får räkna med att torkningskapaciteten i det stora bestånd av längdcirkulationstorkar som finns i många fall måste skäras ned genom ökning av torkningstiden och minskning av psykrometerskillnaden i uttagsänden eller alternativt torka virket till en högre utgående fuktkvot med vidare torkning på annat sätt om kundkraven ska kunna tillgodoses. Hur en sådan ändring i driften i detalj ska utföras måste utredas ingående.

Längdcirkulationstorken kommer härigenom knappast att bli ett ekonomiskt gynnsamt alternativ till kammartorken. Ett undantag utgör torkningen av bräder (sidovirke) där den stora avdunstningen skapar problem vid kammartorkning och där ett idealt torkningsschema inte har samma betydelse för torkningskvaliteten. Korta kanaler med automatsatsning bör komma till användning.

Kammartorkningen ger inte "automatiskt" en bättre torkningskvalitet. Förutsättningen är en bra konstruerad tork med jämn temperatur och strömningshastighet och att torkningen styrs i enlighet med beprövade torkningsscheman. Ändamålet med det arbete som ligger bakom föreliggande rapport är att sammanfatta den omfattande empiriska kunskapen om torkningsschemat i en analytisk formulering, som kan ligga till grund för en modern styrningsteknik och underlätta en optimering av torkningen i varje särskilt fall. Metodiken är användbar inte bara för furu och gran. Den är generell för alla träslag.

Det bör poängteras, att andra faktorer också spelar in. Det är numera känt, att timmerlagring under vatten redan efter någon månad kan medföra en väsentligt ökad sprickbildning under torkningen. Även bevattning av timret på land medför denna konsekvens fast i långsammare takt /1/. Ju kortare timmerlagring, desto mer ekonomisk torkning.

## DET EMPIRISKA TORKNINGSSCHEMAT

Ett torkningsschema är en utprovad föreskrift om hur torkluftens temperatur och fuktighet bör regleras i torken i förhållande till den successivt avtagande fuktkvoten i virket. Schemat uttrycks lämpligen som en föreskrift för torkluftens torra och våta temperaturer. Även lufthastigheten genom virkespaketet utövar ett inte oväsentligt inflytande på hur fort virket torkar, särskilt i början av torkningen. De flesta torkningsscheman torde vara utprovade vid en lufthastighet på mellan 1 och 2 m/s. Man brukar rekommendera ett schema med det förbehållet, att en justering bör ske i den egna torkanläggningen. Detta för att olika torkars specifika egenskaper varierar. I den här utarbetade systematiken ingår också lufthastighetens inflytande och torkluftens temperaturutfall genom virket, så att ett schema blir generellt användbart i alla kommartorkar, förutsatt att en någorlunda jämn temperatur och lufthastighet råder i torken.

Eftersom torkluftens tillstånd anges i förhållande till den löpande virkesfuktkvoten, förutsätter tillämpningen av ett schema, att man mäter denna under torkningen. Detta tillgår sedan gammalt på så sätt, att man väljer ut ett antal "representativa" provplankor, vilkas fuktkvot förlöpande bestäms genom uttag ur torken för vägning. Metodiken förutsätter, till följd av att fuktkvoten i allmänhet sprider starkt i en torksats, stor vana hos torkoperatören. Om produktionen är likformig brukar torkningsschemat efter tillräcklig erfarenhet kunna överföras till ett tid-schema.

Denna tungrodda metodik har under de senaste decennierna i rätt stor utsträckning ersatts med elektrisk fuktkvotsmätning under torkningen. Problematiken med fuktkvotsspridningen kvarstår dock och mätnoggrannheten försämras avsevärt, särskilt för fuktkvoter som överstiger cirka 25 %. Schemats utformning vid fuktkvoter över detta värde är av stor betydelse för torkningsskadorna.

Ett stort antal torkningsscheman har sedan seklets början utprovats för olika träslag och virkesdimensioner. År 1950 lyckades R. Keylwerth /2/ genom studium av europeiska torkningsscheman för cirka 200 träslag visa, att schemat, sedan virket kommit in i den hygroskopiska torkningsfasen, kan formuleras som ett enkelt förhållande mellan fuktkvoten och den mot luftens tillstånd svarande jämviktsfuktkvoten hos virket. Detta förhållande ska hållas konstant. Systematiken gav ingen upplysning om torkningsschemat innan virket kommit in i den hygroskopiska fasen. Den har sedan dess i stor utsträckning varit normgivande i Europa, ofta i kombination med elektrisk fuktkvotsmätning.

I USA pågick vid denna tid ett omfattande arbete på att experimentera fram lämpliga torkningsscheman för inhemska träslag (ett drygt 50-tal kommersiellt viktiga träslag). Arbetet var främst koncentrerat till Madisonlaboratoriet, där man hade 16 st försökstorkar till förfogande. Den amerikanska metodiken gick ut på att söka skaffa sig en uppfattning om de under torkningen uppträdande spänningarna i virket och utforma torkningsschemat med hänsyn därtill. Framtagna scheman är sammanfattade i "Dry Kiln Operators Manual /3/. Man har där också tabellerat de olika träslagens medeldensitet, medelfuktkvot i kärna och splint i nyavverkat virke, ungefärlig torkningstid för 25 mm virke, samt krympningen i tangentiell och radiell led. Framtagna torkningsscheman överensstämmer inte med den av Keylwerth utformade systematiken för i Europa utprovade scheman. Det har

dock visat sig möjligt att sammanfatta både europeisk och amerikansk teknik i en generell systematik, som baserats på torkningen som en enkel diffusionsprocess. Detta innebär inte, att fuktvandringen i trä generellt är en enkel diffusionsprocess - den är tvärtom, på grund av träets termodynamiskt irreversibla karaktär, en ytterligt komplicerad process - men det innebär, att det speciella randvillkor, som det empiriska torkningsschemat utgör, ger en okomplicerad fuktvandring mot virkesytan, där förångning av fukten äger rum. Och detta är då att uppfatta som ett kriterium för bra torkningskvalitet.

#### ANALYTISK FORMULERING AV TORKNINGSSCHEMAT

Cellväggarna i trä är i väsentlig grad uppbyggda av trådformiga cellulosa-molekyler, längs vilka s k hydroxylgrupper är anordnade. Strukturen kännetecknas av att ett antal cellulosa-molekyler är permanent bundna till varandra i form av kristalliter via en del av hydroxylgrupperna, medan de övriga hydroxylgrupperna - cirka en tredjedel av det totala antalet - är fria. Dessa fria grupper binder vatten och kan även forma temporära bindningar med angränsande cellulosa-molekyler. De fria grupperna återfinns dels på kristalliternas ytor, dels i den mindre ordnade delen av micellerna, de s k "micell-fransarna". Under inverkan av de fria grupperna kan troligen vattnet stabiliseras i olika strukturer, som kan ha en uppgift i det växande trädet.

En närmare kunskap om hur bindningsförhållandena gestaltar sig under fukttransport och torkning finns inte. Området är mycket svårutforskat. Man kan föreställa sig en stor mångsidighet i bindningsmöjligheterna och det är känt /4/ att även små fuktändringar är irreversibla, d v s om ett trästycke utsätts för två näraliggande växlingsklimat (torkning - befuktning) återkommer man inte till utgångsfuktkvoten efter en cykel, d v s man återkommer inte till det ursprungliga bindningstillståndet. Detta innebär, att bindningstillståndet är processberoende och en generell analytisk behandling av fuktvandringen är därigenom möjlig endast om de specifika bindningsmönstren kan klarläggas.

Tänkbart är emellertid, att någon viss typ av process (torkningsschema) kan ge ett reproducerbart bindningsförlopp och därigenom en möjlighet att analytiskt formulera just denna process. Processen måste i så fall vara av sådan art, att den inte leder till strukturella komplikationer, som kan utvecklas till sprickbildning och cellkollaps eller därmed besläktade fenomen. Man kan tänka sig, att det empiriskt framtagna torkningsschemat, som ju framtagits i avsikt att undvika alla komplikationer, kan realisera en dylik reproducerbar process.

År 1974 /5/ kunde visas, att en mycket enkel partikulär lösning till den för diffusion gällande differentialekvationen - tillämpad på virkestorkningen - förutsätter ett randvillkor av samma karaktär som det empiriska torkningsschemat. Man kan då omvänt tänka sig att en torkning efter ett sådant schema ger fuktvandringen karaktären av en reproducerbar diffusionsprocess. Denna partikulära lösning innebär en likformigt med tiden avtagande fuktkvot i träets alla delar, vilket kan vara ett annat kriterium på att små komplikationer inträder.

Den aktuella partikulära lösningen har formen

$$u = C \cdot e^{-\tau/\tau_k} \cdot \cos(\beta x/\delta_1) \quad (1)$$

där  $u$  = den lokala fuktkvoten (kg vatten/kg absolut torrt trä)

$\tau$  = tiden (s)

$$\tau_k = \frac{1}{a'} \left(\frac{\delta_1}{\beta}\right)^2 = \text{"karateristisk" torkningstid (s)}$$

$\beta$  = intensitetsparameter (-)

$\delta_1$  = halva virkestjockleken (m)

$x$  = tjocklekskoordinat räknad från virkesmitten (m)

$a'$  = diffusionskonstant = diffusivitet ( $m^2/s$ )

$C$  = integrationskonstant (kg vatten/kg absolut torrt trä)

Lösningen är endimensionell, d v s utgör lösningen för en "oändligt" utsträckt platta av tjockleken  $2 \delta_1$ . Virkestvärnsnittets rektangulära form beaktas på så sätt, att avdunstningsytan tänkes förstörad med kantsidorna, d v s med ytförstoringsfaktorn  $1 + \delta_1/\delta_2$  där  $\delta_2$  (m) är halva virkesbredden. Då denna ytförstoring innebär en däremot ungefär proportionell förkortning av torkningstiden (ökning av energiöverföringen från torkluften), är det lämpligt att dividera den karakteristiska torkningstiden  $\tau_k$  med denna faktor. Om man dessutom räknar torkningstiden i timmar istället för den obekväma enheten sekund, blir den karakteristiska torkningstiden

$$\tau_k = \frac{1}{a'} \left(\frac{\delta_1}{\beta}\right)^2 \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \frac{1}{3600} \text{ tim} \quad (2)$$

Erfarenheten har visat, att detta ganska väl motsvarar olikheten i torkningstid för olika virkesbredder.

Randvillkoret till lösningen (1) får man genom att betrakta värmeöverföringen från torkluften till virkesytan. Värmeövergången uttrycks konventionellt genom produkten av ett värmeövergångstal  $\alpha$  ( $W/m^2, C$ ), temperaturskillnaden  $t - t_0$  (C) mellan torkluft och virkesyta och virkesytan  $A$  ( $m^2$ ).

$$P = \alpha(t - t_0) \cdot A \quad (W) \quad (3)$$

Den komplexa naturen av vattnets struktur, som förändras under torkningens gång, ger anomalier i värmeövergången /6/. Som en approximation antages dock sambandet (3) vara giltigt, om värmeövergångstalet beräknas enligt formeln

$$\alpha = 8 \cdot v^{0.67} \quad (W/m^2, C) \quad (4)$$

$v$  är strömningshastigheten (m/s) utefter virket. Den till virkesytan överförda värmemängden  $P$  antages huvudsakligen åtgå till att förångna det till virkesytan i bunden form diffunderade vattnet (inre förångning i virket antages ej äga rum vid denna speciella diffusionsprocess), d v s

$$P = -\rho a' \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=\delta_1} \cdot r \cdot A \quad (W) \quad (5)$$

där  $\rho$  = virkets densitet (kg/m<sup>3</sup>)  
(torr vikt/rå volym)

$r$  = vattens ångbildningsvärme (J/kg)

Fuktgradienten antages approximativt vara densamma på virkets kant- och flatsidor. Ångbildningsvärmets  $r$  är vid låga fuktkvoter på grund av hygroskopisk bindning något högre än det för vatten normala, då även en mindre del av den överförda värmemängden åtgår till höjning av virkestemperaturen. Dessa båda effekter motverkas av att diffusiviteten  $a'$  minskar vid lägre fuktkvot. Det får därför anses acceptabelt att sätta  $P$  proportionellt mot fuktkvotsgradienten i virkesytan. Randvillkoret blir då enligt (3) och (5)

$$-\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=\delta_1} = \frac{\alpha(t-t_0)}{a' \rho r} \quad (6)$$

Den i detta samband ingående obekanta yttemperaturen  $t_0$  kan uttryckas som en funktion av ytfuktkvoten  $u_{x=\delta_1}$ , om fuktjämvikt råder mellan torkatmosfär och trä i virkesytan. Jämviktsfuktkvoten  $u_e$  kan inom våttemperaturområdet 35-70 °C med god noggrannhet beskrivas som funktion av psykrometerskillnaden  $t-t_v$  med den enkla formeln

$$u_e = \frac{0,25}{1+(t-t_v)/5} \quad (7)$$

Avvikelsen från gängse tabellerade värden är mindre än en fuktkvotsprocent för psykrometerskillnader  $t-t_v > 0,5$  °C.

Det är emellertid inte självklart att fuktjämvikt råder i virkesytan och knappast heller troligt. Inställning till jämvikt är en mycket långsam process även i mycket små virkesstycken, åtföljd av strukturella förändringar i träet. Vi uttrycker därför sambandet mellan yttemperatur och ytfuktkvot under formen

$$u_{x=\delta_1} = u_e(t_0 - t_v) + \Delta u \quad (8)$$

där  $\Delta u$  är ett tills vidare inte närmare bekant fuktkvotsbelopp utöver jämviktsfuktkvoten.

I det följande införes det dimensionslösa "fukttalet"

$$w = u/0,25$$

där 0.25 är den schematiska fibermättnadsfuktkvoten enligt (7), samt den dimensionslösa tjocklekskoordinaten

$$y = x/\delta_1$$

Om tiden  $\tau$  räknas från den tidpunkt, då ytfuktkvoten når fibermättnad och den hygroskopiska torkningsfasen börjar, och medelfukttalet över virkestvårsnittet vid denna tidpunkt betecknas  $w_{m1}$ , får man följande samband:

$$\text{Medelfukttalet} \quad w_m = w_{m1} e^{-\tau/\tau_k} \quad (9)$$

$$\text{Lokala fukttalet} \quad w = w_m \cdot \frac{\beta}{\sin\beta} \cos(\beta y) \quad (10)$$

$$\text{Ytfukttalet} \quad w_s = w_m \cdot \frac{\beta}{\text{tg}\beta} \quad (11)$$

$$\text{Ytgradienten} \quad -\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_s = w_m \cdot \beta^2 \quad (12)$$

Av (11) följer för  $w_s = 1$ , att

$$\left. \begin{aligned} w_{m1} &= \text{tg}\beta/\beta \\ w_s &= w_m/w_{m1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Randvillkoret (6) kan omformas till

$$t-t_v = \theta = 5\left(\frac{1}{w_s - \Delta w} - 1\right) + w_s \cdot \theta_1 \quad (14)$$

$$\text{där } \theta_1 = \frac{0,25 a' \rho r \beta \text{tg}\beta}{\alpha \delta_1} \quad (15)$$

som utgör torkningsschemat i den hygroskopiska torkningsfasen, om torkningen antages följa den enkla diffusionsprocessen (1).  $w_s$  kan i (14) ersättas med  $w_m/w_{m1}$  enligt (13).  $\theta_1$  är psykrometerskillnaden vid inledningen till den hygroskopiska fasen.

I den hittills behandlade torkningsprocessen har hänsyn inte tagits till begynnelsevillkoret, att fuktkvoten är ungefär konstant över virkestvårsnittet vid torkningens början. Lösningen innebär tvärtom, att fuktgradienten är allt större ju högre fuktkvoten är. Lösningen kan därför endast användas för utjämningsfasen i torkningen. Enligt det empiriska schemat torkar man under gradientuppbyggnadsfasen med en konstant psykrometerskillnad, som är lika med  $\theta_1$ . Om begynnelsefukttalet  $w_{m0}$  inte ligger alltför nära  $w_{m1}$  blir skillnaden liten mellan en exakt lösning till diffusionsekvationen inkluderande gradientuppbyggnaden och den här behandlade lösningen A för den hygroskopiska fasen.

Det är relativt enkelt att konstruera en lösning B till diffusionsekvationen, som beaktar begynnelsevillkoret. Summan av ett antal lösningar av typen (1) är också en lösning till diffusionsekvationen, d v s

$$\omega = \omega_{m0} \cdot \sum_{v=1}^n C_v \cos(v\beta y) e^{-v^2 \tau / \tau_k} \quad (16)$$

är en lösning. Integrationskonstanterna  $C_v$  kan bestämmas så att begynnelsevillkoret ( $\omega = \omega_{m0} =$  konstant över virkestvärnsnittet) kan uppfyllas med godtycklig grad av noggrannhet om  $n$  väljes tillräckligt stort.

För praktiskt bruk är det fullt tillräckligt att välja  $n = 3$ , varvid integrationskonstanterna bestäms av villkoren, att  $\omega_{m0}$  överensstämmer och att  $\omega_0 = \omega_{m0}$  i ytan och i centrum av virket. Integrationskonstanterna blir då

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= \frac{3}{4} \cdot \frac{2 + \cos\beta - \frac{\beta}{\sin\beta} (1 + 2\cos\beta)}{(1 - \cos\beta) \cdot \sin^2\beta} \\ C_2 &= - \frac{1 + 4C_3 \cos\beta (1 + \cos\beta)}{1 + 2\cos\beta} \\ C_1 &= 1 - C_2 - C_3 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Vidare blir

$$\text{Medelfukttalet} \quad \omega_m = \omega_{m0} \sum_{v=1}^3 C_v \frac{\sin v\beta}{v\beta} e^{-v^2 \tau / \tau_k} \quad (18)$$

$$\text{Ytfukttalet} \quad \omega_s = \omega_{m0} \sum_{v=1}^3 C_v \cos v\beta e^{-v^2 \tau / \tau_k} \quad (19)$$

$$\text{Ytgradienten} \quad -\left(\frac{\partial \omega}{\partial y}\right)_s = \omega_{m0} \sum_{v=1}^3 C_v v\beta \sin v\beta e^{-v^2 \tau / \tau_k} \quad (20)$$

Tillhörande torkningsschema blir

$$\left. \begin{aligned} \underline{w_s} > 1 \quad \theta &= \theta_k \left( -\frac{\partial w}{\partial y} \right)_s \\ \underline{w_s} < 1 \quad \theta &= \theta_k \left( -\frac{\partial w}{\partial y} \right)_s + 5 \left( \frac{1}{w_s - \Delta w} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

där den "karaktäristiska" psykrometerskillnaden

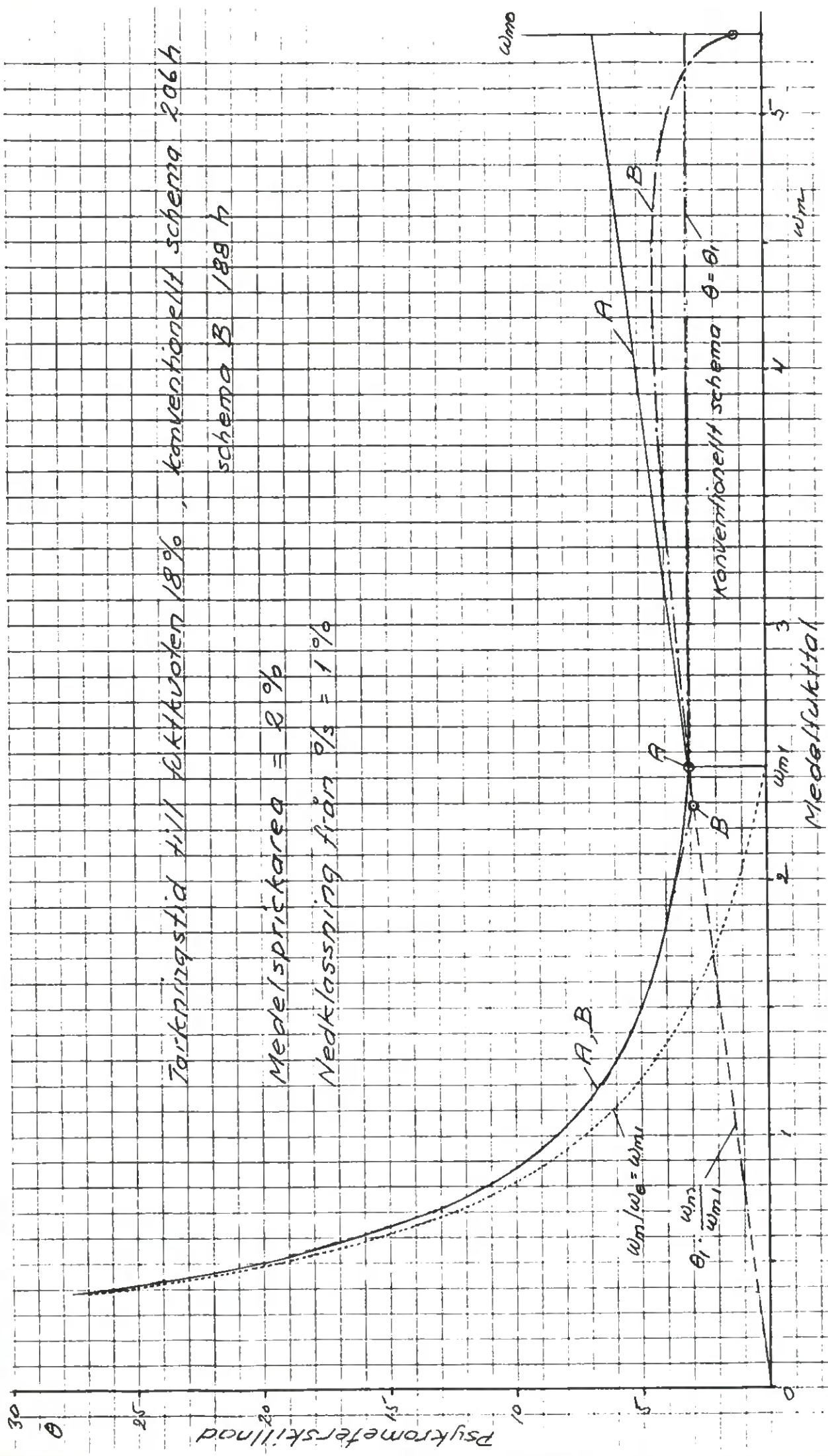
$$\theta_k = \frac{0,25 \text{ a'gr}}{\alpha \delta_1} \quad (= \frac{\theta_1}{\beta t g \beta}) \quad (22)$$

Ungefär efter tiden  $\tau_k$  försvinner inflytandet av termerna  $v=3$  och efter tiden  $2\tau_k$  termerna  $v=2$ , varefter lösningen blir identisk med lösning A. I lösningen B är det inte möjligt att uttrycka torkningsschemat explicit under formen  $\theta = f(w_m)$  som i lösningen A. Lösning A är därför lämpligare för systematisering av empiriska scheman, där ändå inte den inledande torkningsfasen överensstämmer med någon av diffusionslösningarna ( $\theta = \theta_1$  i denna fas). Torkningstiden till  $w_{m1}$  blir

$$\frac{\tau}{\tau_k} = \frac{w_{m0}}{w_{m1}} - 1 \quad (23)$$

om psykrometerskillnaden är  $\theta_1$ . Om torkningen tänkes fortsatt med denna psykrometerskillnad och torkningen gällde fritt vatten (ej trä) skulle den resterande fukten  $w_{m1}$  torka bort på tiden  $\tau = \tau_k$ . Detta är en åskådlig tolkning av den karakteristiska torkningstiden  $\tau_k$ .

I figur 1 visas en jämförelse mellan lösningarna A och B, tillämpade på torkning av 75 x 150 furuvirke med lufthastigheten 3 m/s och fuktöverskottet  $\Delta w = 0$ . Skillnaden har praktiskt betydelse endast så länge fukttalet är högre än  $w_{m1}$ . Schema B ger då kortare torkningstid. Genom att endast tre termer medtagits ( $n=3$ ) i schema B blir psykrometerskillnaden inte noll vid torkningsstarten (i exemplet 1 °C). Detta är en fördel, eftersom det inte går att styra en tork på  $\theta=0$ .



Figur 1. Torkningsschema A och B för 75 x 150 furu.

## TRÄETS DIFFUSIVITET

Eftersom hydroxylgruppernas bindningstillstånd är processberoende och detta måste utöva ett inflytande på diffusiviteten, måste även diffusiviteten vara processberoende. Experimentella bestämmningar på basis av olika försök har också gett bristande överensstämmelse. Som utgångspunkt har här använts mätningar av Shergowskij /7/. Korrigeringar och tillägg har gjorts på basis av erfarenheter från torkningsförsök med furu och gran i enlighet med den här betraktade processen samt på basis av erfarenheter från systematiseringen av amerikanska torkningsscheman.

Temperaturinflytandet på diffusiviteten har ej ändrats och kan uttryckas med en faktor

$$e^{t/33,4}$$

Om i denna faktor insättes den våta temperaturen  $t_v$  (= konstant under torkningen) förorsakar den successivt ökande virkestemperaturen en successiv ökning av diffusiviteten. Denna kompenseras dock till en viss grad av en minskning av diffusiviteten på grund av den successivt minskande fuktkvoten. Om man antar, att jämvikt råder i virkesytan, kan sambandet mellan yttemperatur och ytfuktkvot beräknas enligt sambandet (7) och därvid erhålles den kompenserande minskningen av diffusiviteten

$$a'(u)/a'(u=25) = e^{\frac{-(25/u-1) \cdot 5}{33,4}}$$

som åskådliggörs i figur 2. Motsvarande kurvor, då jämvikt inte råder i virkesytan (amerikanska torkningsscheman), är också inritade i figuren. Direkta mätningar av Shergowskij får ett likartat förlopp. Det innebär därför troligen inget större fel att anta, att inflytandet av fuktkvot och temperatur kompenserar varandra så att man vid den betraktade processen kan räkna med en konstant diffusivitet, förutsatt att man använder temperaturfaktorn

$$e^{t_v/33,4}$$

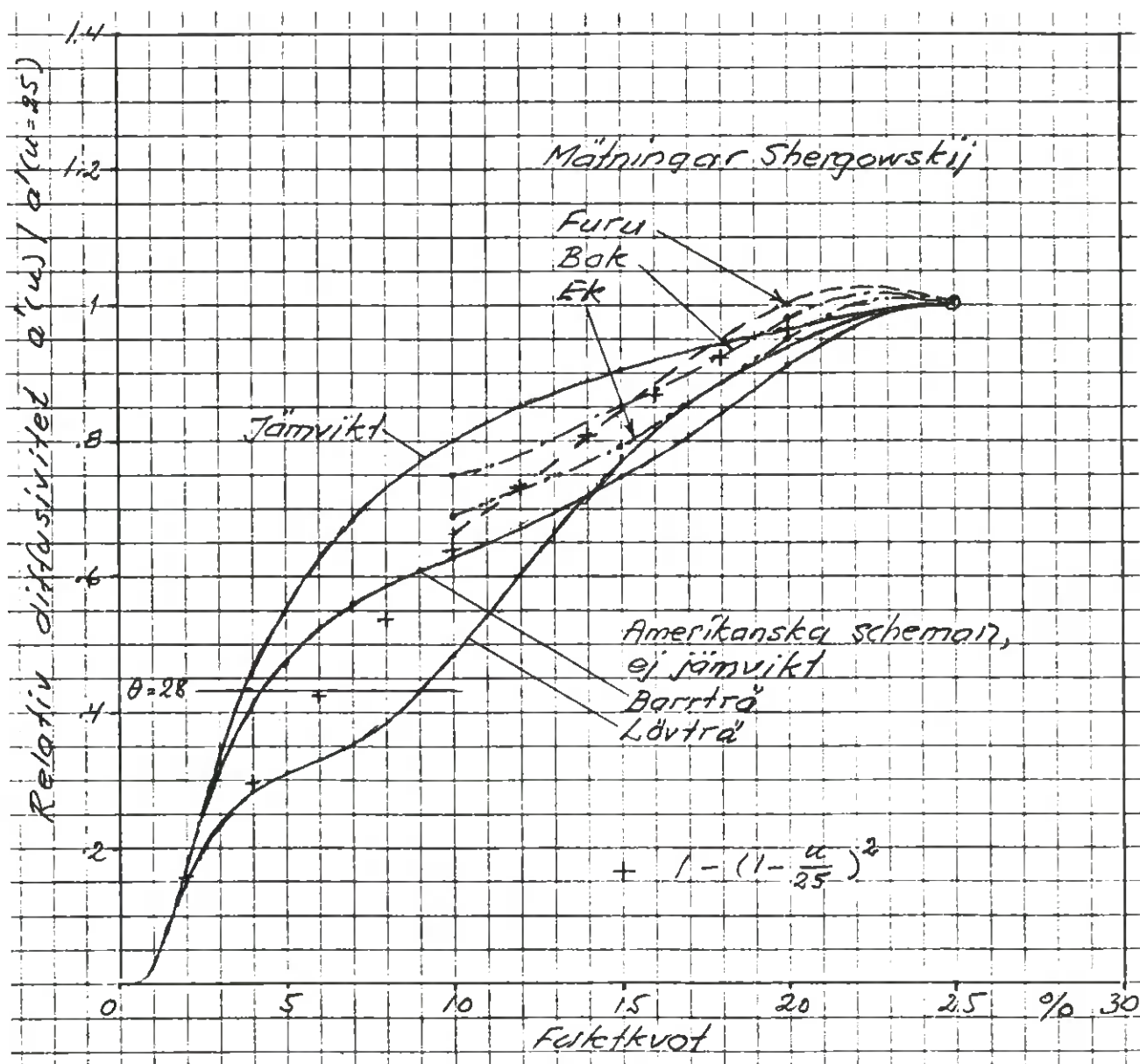
För beräkning av diffusiviteten efter spänningsomvändningen hänvisas till Appendix 1.

Shergowskij fann, att skillnaden i diffusivitet mellan olika träslag kunde förklaras av skillnaden i densitet. Detta har ej kunnat bekräftas. Utvärderingar för 57 olika träslag ger vid handen, att diffusiviteten troligen är omvänt proportionell mot densiteten (cellväggarnas tjocklek), men att härutöver ett betydande träslagsinflytande är för handen, betingat av strukturella olikheter i cellväggarna.

Härutöver har det visat sig, att diffusiviteten är beroende av virkestjockleken. Detta kan eventuellt förklaras med att större dragspänningar inträder i tjockt virke, som exiterar hydroxylgrupperna så att bindningen blir svagare. För denna förklaring talar dels det förhållandet, att tjockleksinflytandet försvinner ungefär då dragspänningarna i virkesytan övergår i tryckspänningar, samt att inflytandet minskar vid högre temperatur.

Spänningen blir då mindre på grund av träets förhöjda plasticitet. Det empiriska samband som framtagits, innebär att diffusiviteten bör innehålla en faktor

$$e^{\beta F_t F_\delta}$$



Figur 2. Diffusivitetens fuktkvotsberoende.

där funktionen  $F_t$  minskar från 1 till 0 med ökande temperatur och funktionen  $F_\delta$  ökar från 0 till  $\approx 1$ , då virkestjockleken ökar från 0. Vid högre torkningsintensitet  $\beta$  ökar också detta inflytande.

Sammanfattningsvis kan konstateras, att det empiriska torkningsschemat betraktat som randvillkor till den singulära lösningen (1) tillfredsställande kan överföras till ett tidsschema för praktisk styrning av torkningen, om diffusiviteten beräknas enligt formeln

$$a' = \frac{140}{\rho} e^{n \cdot 0,26 + \beta F_t F_\delta + t_v / 33,4} \cdot 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad (24)$$

$\rho$  = densiteten (kg/m<sup>3</sup>)

$t_v$  = den våta temperaturen (°C)

$\beta$  = intensitetsparametern

$$F_t = \varnothing \left( \frac{70,6 - t_v}{21,6} \right)$$

$$F_\delta = \varnothing \left[ 2,4 \left( 1 - \frac{0,015}{\delta_1} \right) \right]$$

$$\varnothing(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dt$$

$\delta_1$  = halva nominella virkestjockleken (m)

$n$  = 1, 2, .....7 (diffusivitetnivå)

Sedan spänningsomvändning skett i virket försvinner  $\beta F_t F_\delta$  och temperaturinflytandet justeras i enlighet med Appendix 1.

#### SYSTEMATISERING AV AMERIKANSKA TORKNINGSSCHEMAN

Anpassningen av lösningen A till diffusionsekvationen, så att den på bästa möjliga sätt överensstämmer med ett empiriskt schema, erfordrar en optimering med avseende på de båda parametrarna  $w_{m1} = \text{tg}\beta/\beta$  och diffusiviteten  $a'$ , som ingår i parametern  $\theta_1$ . Det är inte möjligt att formulera något kriterium för optimal anpassning, utan optimeringen får ske på basis av en bedömning från fall till fall.

Amerikanska scheman är givna tillsammans med en approximativ torkningstid för 25 mm virke. Eftersom diffusiviteten ingår i den karakteristiska torkningstiden  $\tau_k$ , ger detta ytterligare ett villkor för anpassning av diffusiviteten, som måste vara någorlunda uppfyllt. För dessa scheman är  $\Delta w \neq 0$ , varför ett gemensamt samband för  $\Delta w$  först måste formuleras, som är förenligt med samtliga scheman. Följande samband har tagits fram

$$\Delta w = \frac{C}{w_s(1-w_s)} \cdot e^{-\frac{C}{1,28} \left( \ln \frac{w_s}{1-w_s} - m \right)^2} \quad (25)$$

$$C = \frac{1}{16} \left( 1 - e^{-9 \left( \frac{\text{tg}\beta}{\beta} - 1 \right)^3} \right)$$

som är en logaritmiskt normal frekvensfunktion inom gränserna  $w_s = 0$  och  $w_s = 1$  ( $\Delta w \rightarrow 0$  i gränserna), multiplicerad med en faktor C så beskaffad, att  $\Delta w \rightarrow 0$ , då  $w_{m1} \rightarrow 1$ . För  $w_{m1}$  nära 1 närmar sig schemat alltså jämviktsschemat  $\Delta w = 0$ . Det logaritmiska medelvärdet  $m$  är

$m = 0$  för lövträ

$m = 0,4$  för barrträ

Frekvensmaximum ligger närmare  $\omega_s = 1$  för barrträ än för lövträ.

Olika scheman rekommenderas för olika virkestjocklekar. Från såväl europeiska som amerikanska scheman har härletts det gemensamma beroendet

$$(\omega_{m1})_{\delta_1} = 1 + [(\omega_{m1})_0 - 1] e^{-\left(\frac{\delta_1}{0,055}\right)^2} \quad (26)$$

där  $\delta_1$  är halva den nominella virkestjockleken (m).  $(\omega_{m1})_0$  avser virkestjockleken  $\delta_1 = 0$ .

Den i ekvation (14) ingående termen

$$\omega_s \cdot \theta_1$$

är under hela torkningen från  $\omega_{m1}$  och nedåt proportionell mot avdunstningen (torkningshastigheten). De flesta scheman anges under förutsättning, att torkluften styrs på tillströmningssidan av virkespaketen och att torkluftens rörelseriktning reverseras. Medelpsykrometerskillnaden i virkespaketen är därför längre än den rekommenderade psykrometerskillnaden på grund av luftens temperaturfall genom paketen. Hänsyn härtill tas lämpligen genom att vid schemaanpassningen ersätta  $\theta_1$  med  $/8/$

$$\frac{2 \theta_1}{1 + e^{-\frac{2\alpha}{1000 \cdot v \cdot d_s} \cdot L}} \quad (27)$$

där  $\alpha$  = värmeövergångstalet ( $W/m^2 \cdot C$ )

$v$  = strömningshastigheten genom virkespaketen (m/s)

$d_s$  = strötjockleken (m)

$L$  = blåsdjupet (m)

I "Dry Kiln Operators Manual" anges, att rekommenderade scheman gäller under förutsättning att lufthastigheten ligger på mellan 1 och 2 m/s och att styrningen sker enligt ovan. Blåsdjup anges ej, men ett i USA vanligt blåsdjup är 2,7 m (9 fot).

Vid anpassningen av dessa scheman har  $\theta_1$  ersatts med  $1,5 \theta_1$  som ett ungefärligt mått på blåsdjupets inverkan. En sådan korrektion av  $\theta_1$  måste alltid göras vid en tillämpning av ett schema, anpassat till den aktuella torken.

Det schemasystem, som utarbetats av Madisonlaboratoriet, innehåller ett antal diskreta temperaturvärden. För exempelvis  $\theta_1$  förekommer endast värdena  $\theta_1 = 1,7, 2,2, 2,8, 3,9, 5,6, 8,3, 11,1, 13,9$  °C.

Om anpassningen ger ett mellanliggande värde, kan detta inte anses strida emot det rekommenderade schemat. Om man får ett  $\omega_{m1}$ -värde som ligger nära begynnelsefukttalet  $\omega_{m0}$  blir angivet  $\theta_1$ -värde av kort varaktighet och valet av  $\theta_1$  därför oväsentligt. I sådana fall är  $\omega_{m1}$ -värdet det mest väsentliga.

Ett empiriskt torkningsschema anger psykrometerskillnaden som funktion av fuktkvoten i form av en trappstegscurva, figur 3. Figuren visar anpassningen av diffusionsmodellen till ett europeiskt schema för 50 mm ek /9/ med vissa antagna värden på lufthastighet och blåsdjup. Figur 4 visar torkningsschemat för ett likartat träslag, red oak, enligt amerikanska rekommendationer /3/. I figuren har också inritats schemat enligt figur 3. Dessa båda scheman skiljer sig från varandra huvudsakligen därigenom, att fukttalsöverskottet  $\Delta w$  är noll i det europeiska schemat och i överensstämmelse med ekvation (25) för det amerikanska schemat.

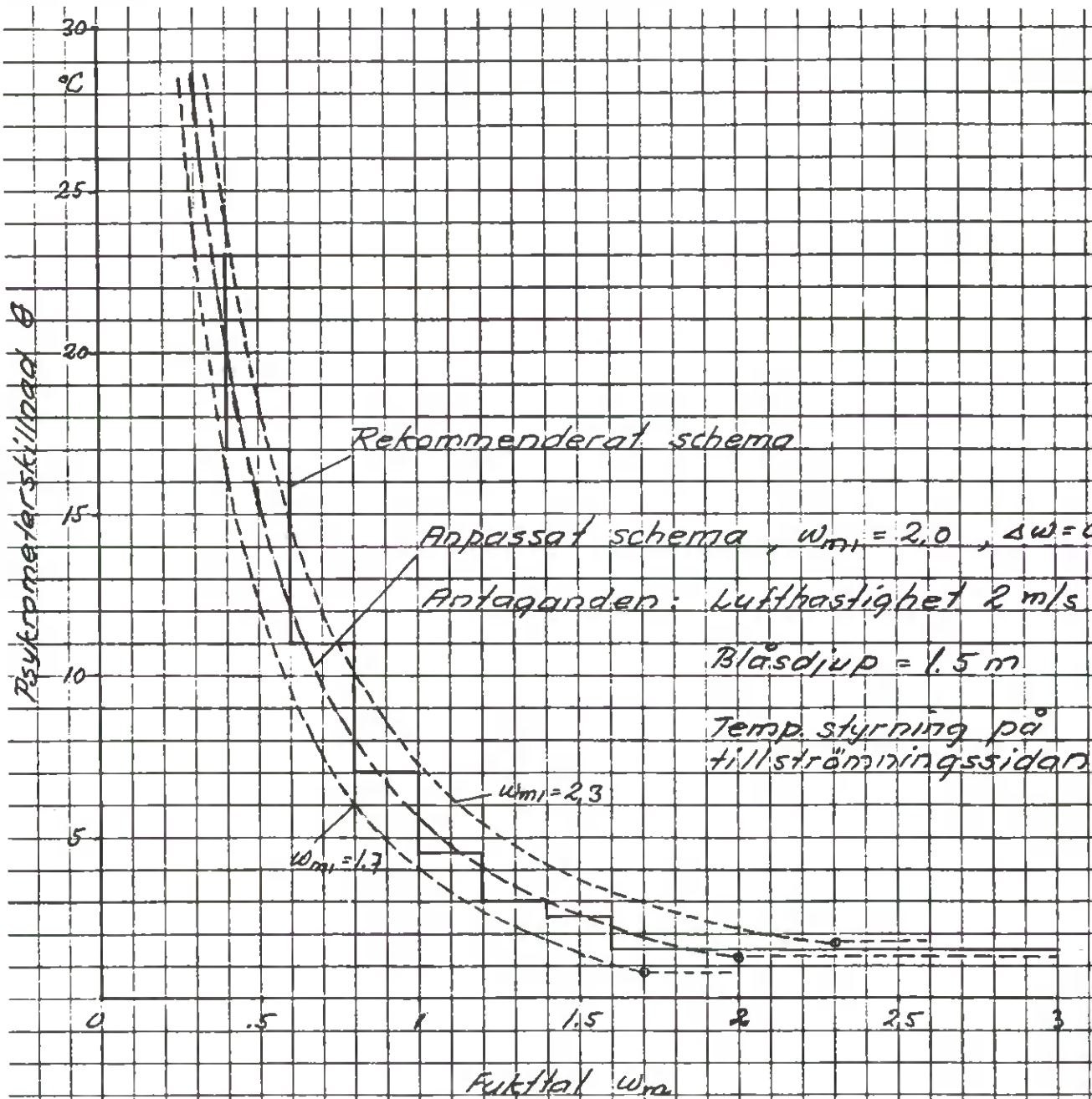


Fig. 3 Europeiskt torkningsschema för 50 mm ek

Figur 3. Europeiskt torkningsschema för 50 mm ek.

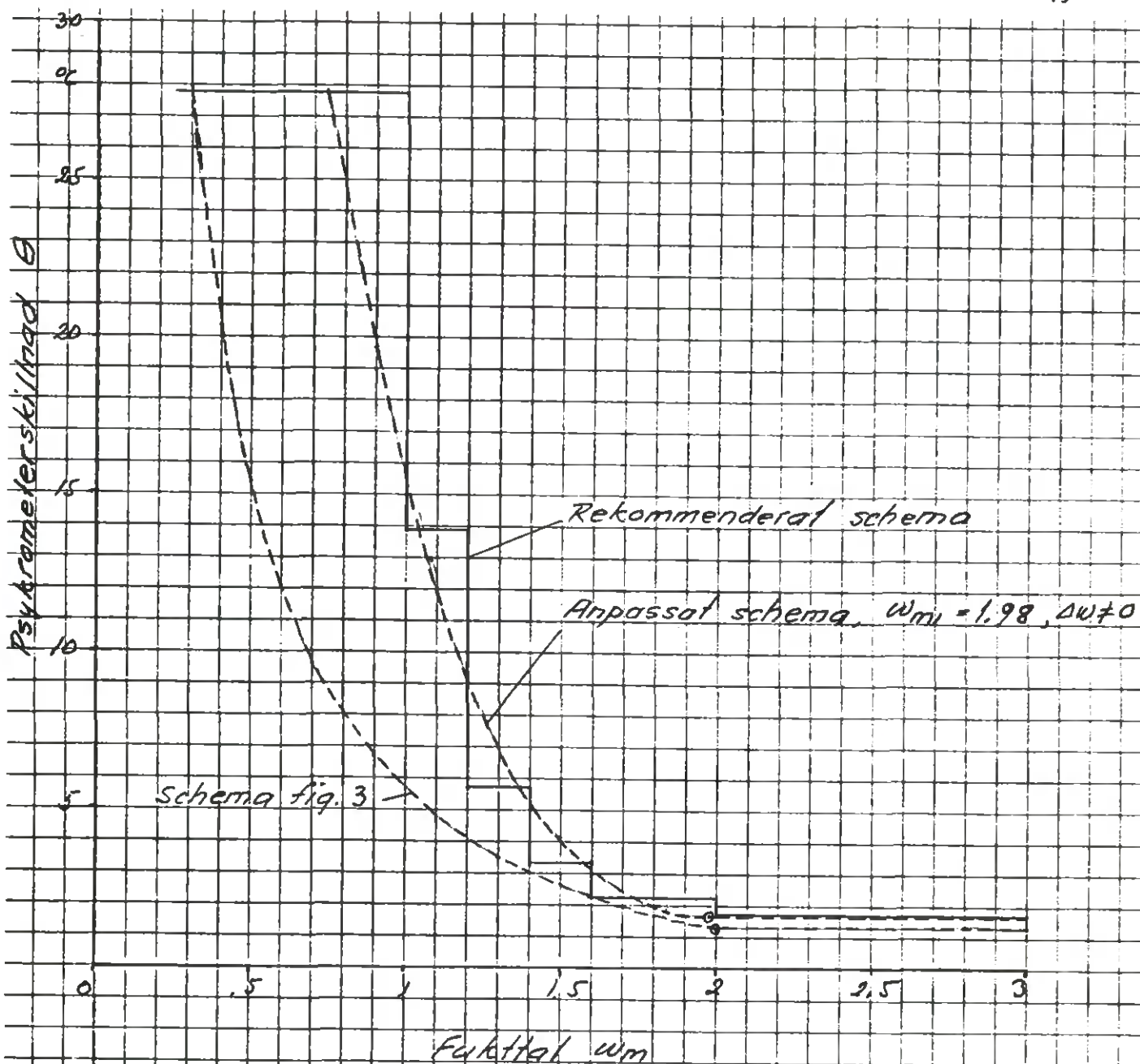


Fig. 4 Amerikanskt torkningsschema för 50 mm red oak.

Figur 4. Amerikanskt torkningsschema för 50 mm red oak.

Amerikanska torkningsscheman för barrträ skiljer sig från scheman för lövträ, dels genom olika värden på  $m$  i ekvation (25), dels genom att spänningsovändningen alltid anses ligga vid medelfuktkvoten 15 % ( $\omega_m = 0,6$ ) eller något däröver. Vid denna fuktkvot ställer man alltid in maximal psykrometerskillnad  $\theta = 27,8$  °C (50 °F). För lövträ sker spänningsovändningen ofta vid högre fuktkvoter. Medan torkningen av lövträ alltid sker på basis av kärnans fuktkvot, styrs barrträtorkningen i en del fall på basis av både kärn- och splintfuktkvot (geometriska mediet har använts vid utvärderingarna) eller stundom enbart splintfuktkvoten. Figurerna 5 och 6 visar ett par exempel på barrträscheman, i figur 5 vid lågt  $\omega_{m1}$  och i figur 6 vid högre  $\omega_{m1}$ .

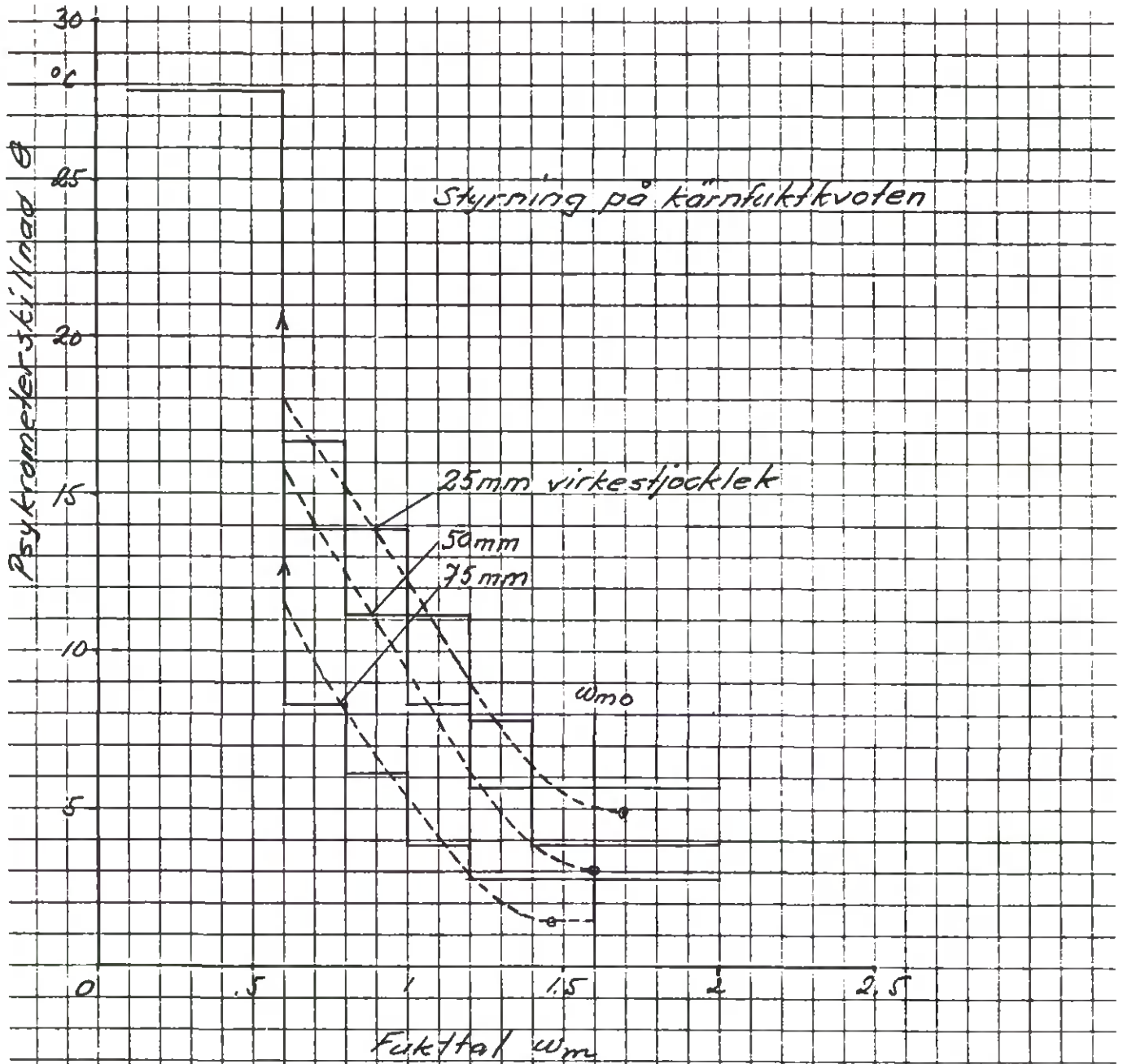
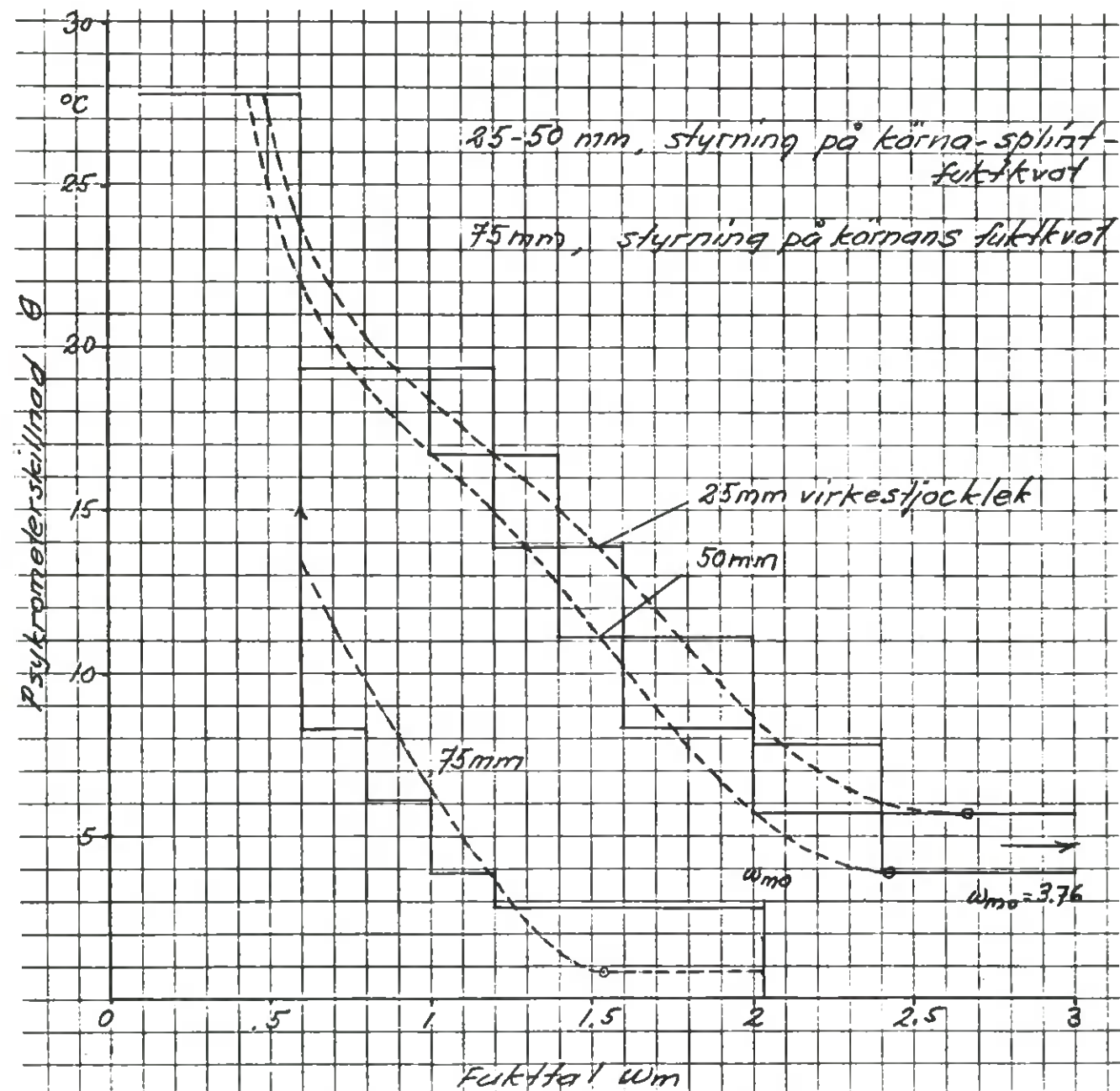


Fig. 5 Amerikanskt torkningsschema för Incence cedar.

Figur 5. Amerikanskt torkningsschema för Incence cedar.



Figur 6. Amerikanskt torkningsschema för Engelmann spruce.

Rekommenderade scheman för 75 mm virke, som sällan torkas i USA, följer i de flesta fall den här utarbetade systematiken, men avviker i några fall rätt väsentligt (mildare scheman än vad systematiken ger). Scheman för 75 mm virke anges dock i "Dry Kiln Operators Manual" som preliminära, varför avvikelserna inte väger särskilt tungt.

Torkningsschemat är inte fullständigt fastlagt genom ett schema över psykometerskillnaden  $\theta$ . Härtill kommer ett fastläggande av temperaturnivån. Den amerikanska schemasystematiken är framställd genom en serie torrtemperaturscheman och en serie  $\theta$ -scheman, som paras ihop till ett fullständigt schema i varje särskilt fall. Beräknar man därur den under torkningen rådande nivå på den våta temperaturen  $t_v$  har det visat sig, att  $t_v$  ökar och minskar något på ett oregelbundet sätt omkring ett medelvärde. Dessa smärre variationer i våttemperaturen torde sakna betydelse och det är enklare att definiera temperaturnivån med ett konstant  $t_v$ -värde under hela torkningen.

I tabellerna 1a och 1b för lövträ och tabellerna 2a och 2b för barrträ har basdata och utvärderade data sammanställts för rekommenderade amerikanska torkningsscheman, gällande för lövträ kvalitet "lumber" och för barrträ kvalitet "upper grades".

Ett starkt samband kan konstateras mellan det kritiska fukttalet  $(w_{m1})_0$  och styrfuktkvoten  $w_{m0}$ . Exklusive de båda extrema träslagen aspen och basswood är korrelationskoefficienten  $r = 0,88$  inklusive dessa båda träslag  $r = 0,76$ . Sambandet framgår av figur 7. Man kan uppdelat de undersökta träslagen i 4  $w_{m1}$ -grupper, tabell 1a, 2a och figur 7. För vardera gruppen gäller då att ett linjärt samband råder inom utvärderingsnoggrannheten.

$$(w_{m1})_0 = 1 + k \cdot w_{m0} \quad (28)$$

Grupp 1	$k = 0,23$
2	0,33
3	0,43
4	0,89

Tabell 1 a.

Träslag	Densitet kg/m <sup>3</sup> 1)	Råfukttal		Styrfukttal $w_{m0}$	Kritiskt fukttal		Våttemperatur t. °C	Diffusivitet tetsnivå n
		kärna k	splint s		( $w_{m1}$ ) <sup>0</sup>	Grupp		
Alder, red	370	-	3,88	3,88 (s)	2,44	2	46-50	3
Apple	610	3,24	2,96	3,24 k	1,92	2	39-44	4
Ash, white	550	1,76	1,84	1,76 k	1,75	3	46-51	3
Aspen	350	3,8	4,52	3,8 k	4,10	4	44-51	2
Basswood	320	3,24	5,32	3,24 k	4,10	4	44-51	2
Beech, american	560	2,2	2,88	2,2 k	1,80	2	45-50	3
Birch, paper	420	3,56	2,88	3,56 k	2,09	2	49-52	3
Birch, yellow	550	2,96	2,88	2,96 k	2,09	2	43-48	3
Cherry, black	470	2,32	-	2,32 k	1,75	2	46-51	3
Chestnut, american	400	4,8	-	4,8 k	2,95	3	44-48	2
Cottonwood	320	6,48	5,84	6,48 k	3,93	3	41-45	1
Elm, american	460	3,8	3,68	3,8 k	2,49	3	39-40	3
Elm, rock	570	1,76	2,28	1,76 k	1,69	3	43-48	3
Hackberry	490	2,44	2,6	2,44 k	2,09	3	44-48	4
Hickory	640	2,88	2,04	2,88 k	2,03	2	44-46	4
Hophornbeam	630	2,08	2,08	2,08 k	1,63	2	44-48	4
Locust, black	660	1,6	1,6	1,6 k	1,46	2	49-54	3
Magnolia	460	3,2	4,16	3,2 k	2,49	3	46-50	2
Maple, silver	440	2,32	3,88	2,32 k	2,09	3	44-45	3
Maple, sugar	560	2,6	2,88	2,6 k	1,92	2	44-49	3
Oak, California black	510	3,04	3,0	3,04 k	2,45	3	35	1
Oak, red	540	3,26	2,88	3,26 k	2,21	2	37-38	2
Oak, white	600	2,56	3,12	2,56 k	1,86	2	41-44	2
Persimmon	640	2,32	2,32	2,32 k	1,92	3	39-44	4
Sweetgum, red	460	3,16	-	3,16 k	2,21	3	43-48	1
Sweetgum, sap	460	-	5,48	5,48 s	2,78	2	53-56	2
Sycamore	460	4,56	5,2	4,56 k	2,15	1	37-43	2
Tupelo, black	460	3,48	4,6	3,48 k	2,49	3	55-60	2
Walnut, black	510	3,6	2,92	3,6 k	2,49	3	35-40	3
Yellow poplar	400	3,32	4,24	3,32 k	2,49	3	51-58	2

1) Torr vikt/råvolym

Tabell 1 b.

Träslag	Kritisk psykrometerskillnad Schema/Utvärderat 25-38 mm	Kritisk psykrometerskillnad 1,5 $\theta_1$ 50 mm	Torkningstid till 6 % fuktkvot, dygn Angiven för 25 mm virke	Beräknad för 25x150 mm virke
Alder, red	3,9/4,5	2,8/3,1	6-10	8,0
Apple	2,8/3,2	2,2/2,1	10-15	13,5
Ash, white	3,9/2,3	2,8/1,5	11-15	11,0
Aspen	11,1/8,0	8,3/5,4	6-10	8,9
Basswood	11,1/8,0	8,3/5,4	6-10	8,1
Beech, american	2,2/2,4	1,7/1,6	12-15	12,1
Birch, paper	3,9/3,5	2,8/2,4	3-5	9,2
Birch, yellow	3,9/3,2	2,8/2,1	11-15	12,4
Cherry, black	3,9/2,3	2,8/1,5	10-14	10,6
Chestnut, american	3,8/4,6	2,8/3,2	8-12	12,5
Cottonwood	5,6/5,1	3,9/3,7	8-12	14,4
Elm, american	3,9/3,7	2,8/2,9	10-15	13,0
Elm, rock	2,8/2,0	2,2/1,2	13-17	12,9
Hackberry	3,9/4,2	2,8/2,8	7-11	7,9
Hickory	2,8/3,8	1,7/2,7	7-15	11,9
Hophornbeam	2,8/2,3	1,7/1,5	12-16	12,5
Locust, black	2,8/1,1	1,7/0,6	12-16	13,6
Magnolia	3,9/3,6	2,8/2,6	10-15	11,9
Maple, silver	3,4/3,0	2,8/2,2	7-13	9,8
Maple, sugar	2,8/2,8	2,2/1,8	11-15	12,6
Oak, California black	2,2/1,9	1,7/1,5	25-35	25,8
Oak, red	2,2/2,2	1,7/1,6	16-28	21,1
Oak, white	2,2/1,6	1,7/1,3	20-30	22,5
Persimmon	2,8/3,2	2,2/2,1	12-16	12,2
Sweetgum, red	3,9/2,1	2,8/1,4	15-25	17,1
Sweetgum, sap	5,6/5,0	3,9/3,5	10-15	12,2
Sycamore	2,2/2,3	1,7/1,5	6-12	18,5
Tupelo, black	3,9/4,5	2,8/2,9	6-10	9,6
Walnut, black	3,9/3,7	2,8/2,5	10-16	14,1
Yellow poplar	3,9/4,3	2,8/2,7	6-10	8,4

Tabell 2 a.

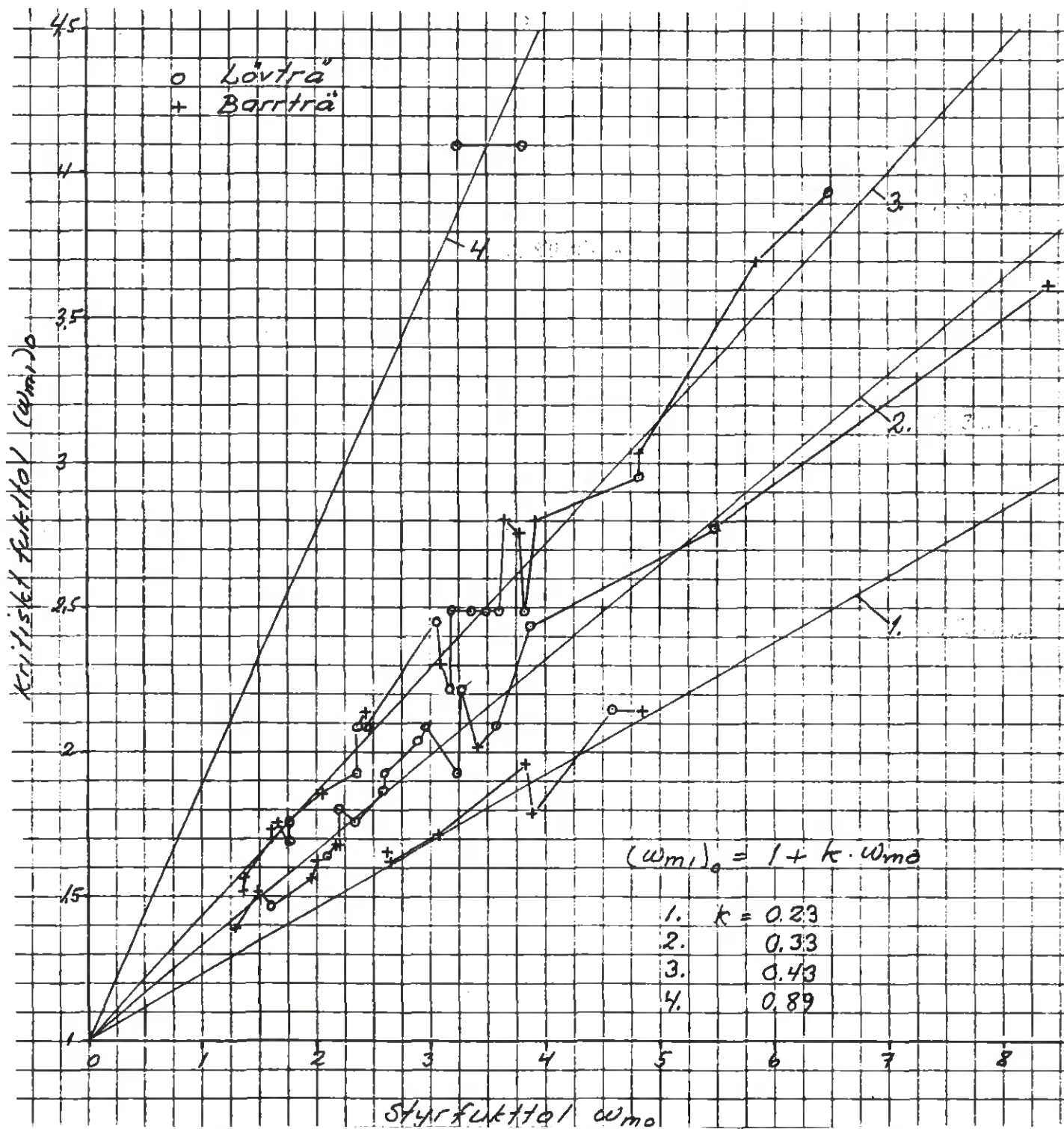
Träslag	Densitet kg/m <sup>3</sup> 1)	Råfuktalt kärna k		Styrfuktalt $w_{m0}$	Kritiskt fuktalt ( $w_{m1} \setminus O$ )		Vättemperatur t. °C		Diffusivitet tetsnivå n	
		kärna k	splint s		Grupp	Grupp	t.	Grupp		
Bald cypress	420	4,84	6,84	4,84	k	2,13	1	60-63	3	1
Cedar, Alaska	420	1,28	6,64	1,28	k	1,39	2	64-68	2	5
Cedar, E. red	440	1,32	-	1,32	k	1,51	3	48-49	1	5
Cedar, Incense	350	1,6	8,52	1,6	k	1,73	3	58	2	5
Cedar, Port Orford	400	2,0	3,92	2,0	k	1,62	2	59-65	2	4
Cedar, W. red (heavy)	310	2,32	9,96	4,81	ks	3,03	3	40-42	1	1-2
Douglas fir	450	1,48	4,6	1,48	k	1,51	2	61-62	2	5
Fir, Grand	370	3,64	5,44	3,64	k	2,80	3	52-59	3	2
Fir, Noble	350	1,36	4,6	1,36	k	1,56	3	61-65	2	5
Fir, Pacific silver	350	2,2	6,56	2,2	k	1,68	2	59-63	2	5
Fir, White	350	3,92	6,4	3,92	k	2,80	3	52-59	3	2
Hemlock, Eastern	380	3,88	4,76	3,88	k	1,79	1	61-63	2	4
Hemlock, Western	380	3,4	6,8	3,4	k	2,01	2	57-59	2	4
Larch, Western	510	2,16	4,76	2,16	k	1,68	2	50-52	2	5
Pine, Lodgepole	380	1,64	4,8	1,64	k	1,75	3	55	2	5
Pine, Ponderosa 25-50 mm	380	1,6	5,92	3,08	ks	2,30	3	47-49	2	4-6
Pine, Ponderosa 75 mm	380	1,6	5,92	1,6	k	1,70	3	53	2	4
Pine, Red	400	1,28	5,36	2,62	ks	1,65	1	62-65	2	3-4
Pine, Loblolly	470	1,32	4,4	2,41	ks	2,13	3	61-65	3	4-6
Pine, Sugar (heavy)	350	3,92	8,76	5,86	ks	3,70	3	37-38	1	3-4
Pine, W. white	360	2,48	5,92	3,83	ks	1,96	1	49-51	1	4-6
Redwood (old growth)	380	3,44	8,4	8,4	s	3,61	2	35	1	1
Spruce, Black	380	1,36	5,12	2,64	ks	1,62	1	59-60	2	4-6
Spruce, Engelm 25-50 mm	320	2,04	6,92	3,76	ks	2,75	3	46-49	2	2-4
Spruce, Engelm 75 mm	320	2,04	6,92	2,04	k	1,85	3	55	2	2
Spruce, Sitka	370	1,64	5,68	3,05	ks	1,71	1	62-63	2	4-5
Tamarack	490	1,96	-	1,96	k	1,56	2	59-62	2	5

1) Torr vikt/råvolym

Tabell 2 b.

Träslag	Kritisk psykrometerskillnad 1,5 $\theta_1$ Schema/Utvärderat		Torkningstid till 6 % fuktkvot, dygn Angiven för 25 mm virke	Beräknad för 25x150 mm virke
	25 mm	50 mm		
Bald cypress	2,8/3,0	2,2/1,8	10-20	14,2
Cedar, Alaska	2,8/3,3	2,2/1,7	4-6	5,5
Cedar, E. red	3,9/2,6	2,8/1,6	6-8	7,3
Cedar, Incense	5,6/4,9	3,9/3,0	3-6	3,7
Cedar, Port Orford	3,9/3,8	2,8/2,0	4-8	5,2
Cedar, W. red (heavy)	3,9/3,5	2,8/2,8	10-15	11,1
Douglas fir	3,9/3,7	2,8/2,1	2-4	3,0 1)
Fir, Grand	5,6/5,6	3,9/3,4	3-5	4,8 1)
Fir, Noble	5,6/4,4	2,8/2,4	3-5	3,7
Fir, Pacific silver	5,6/5,1	2,8/2,8	3-5	4,0
Fir, White	5,6/5,7	3,9/3,4	3-5	4,7 1)
Hemlock, Eastern	3,9/4,6	2,8/2,7	3-5	4,7 1)
Hemlock, Western	5,6/5,3	3,9/3,3	3-5	3,8 1)
Larch, Western	3,9/3,8	2,8/2,4	3-5	4,8 1)
Pine, Lodgepole	3,9/4,6	2,8/2,9	3-5	3,9
Pine, Ponderosa	8,3/6,9	5,6/4,8	3-6	4,8
Pine, Red	3,9/3,5	2,8/1,9	6-8	7,3
Pine, Loblolly	8,3/8,9	5,6/5,1	3-5	3,7
Pine, Sugar (heavy)	8,3/7,2	5,6/6,0	5-10	7,8
Pine, W. white	5,6/5,3	3,9/3,5	3-5	4,0 1)
Redwood (old growth)	5,6/3,4	3,9/2,8	20-24	20,5
Spruce, Black	3,9/4,3	2,8/2,5	4-6	5,1
Spruce, Engelmann	5,6/5,6	3,9/3,9	3-5	3,6 1)
Spruce, Sitka	5,6/4,6	2,8/2,7	4-7	5,4
Tamarack	2,8/4,1	2,8/2,3	3-5	3,7 1)

1) Till 10 % fuktkvot



Figur 7. Kritiskt fukttalet reducerat till virkestjocklek noll  $(w_{m1})_0$  som funktion av styrfukttalet  $w_{m0}$ .

Korrelationen mellan  $(w_{m1})_0$  och densiteten  $\rho$  är betydligt sämre,  $r = 0,50$ . Den tolerabla fuktkvotsgradienten under torkningen är således huvudsakligen beroende av den råa fuktkvoten i det växande trädet.

Den normala krympningen av de olika träslagen finns också tabellerad i Dry Kiln Operators Manual. Anmärkningsvärt nog finns det ingen korrelation ( $r \approx 0$ ) mellan denna och  $(w_{m1})_0$ . Detta tyder på att det mer är cellkonstruktionens förmåga att deformeras som bestämmer torkningsspänningarnas storlek än själva krympningen.

Våttemperaturintervallet för 25-50 mm virke är tabellerat i tabell 1a och 2a och medelvärdena inritade i figur 8 som funktion av parametern  $\rho_{max}/\rho \cdot w_{m1}$ , där den maximala lumenfria densiteten är

$$\frac{1}{\rho_{max}} = \frac{u_s}{1000} + \frac{1}{1500} \quad , \quad \rho_{max} = 1090 \text{ kg/m}^3$$

$u_s$  = fibermättnadsfuktkvoten (0,25)

1000 = vattnets densitet ( $\text{kg/m}^3$ )

1500 = cellväggens densitet ( $\text{kg/m}^3$ )

Korrelationskoefficienten för dessa båda variabler är  $r = 0,75$ . Något samband mellan våttemperatur och övriga parametrar finns ej.

Om man indelar träslagen i tre grupper, temperaturkänsliga, temperaturtåliga och övriga träslag, kan våttemperaturens beroende av parametern  $\rho_{max}/\rho \cdot w_{m1}$  skrivas

$$t_v/t_o = 1 + \rho_{max}/\rho \cdot w_{m1} \quad (29)$$

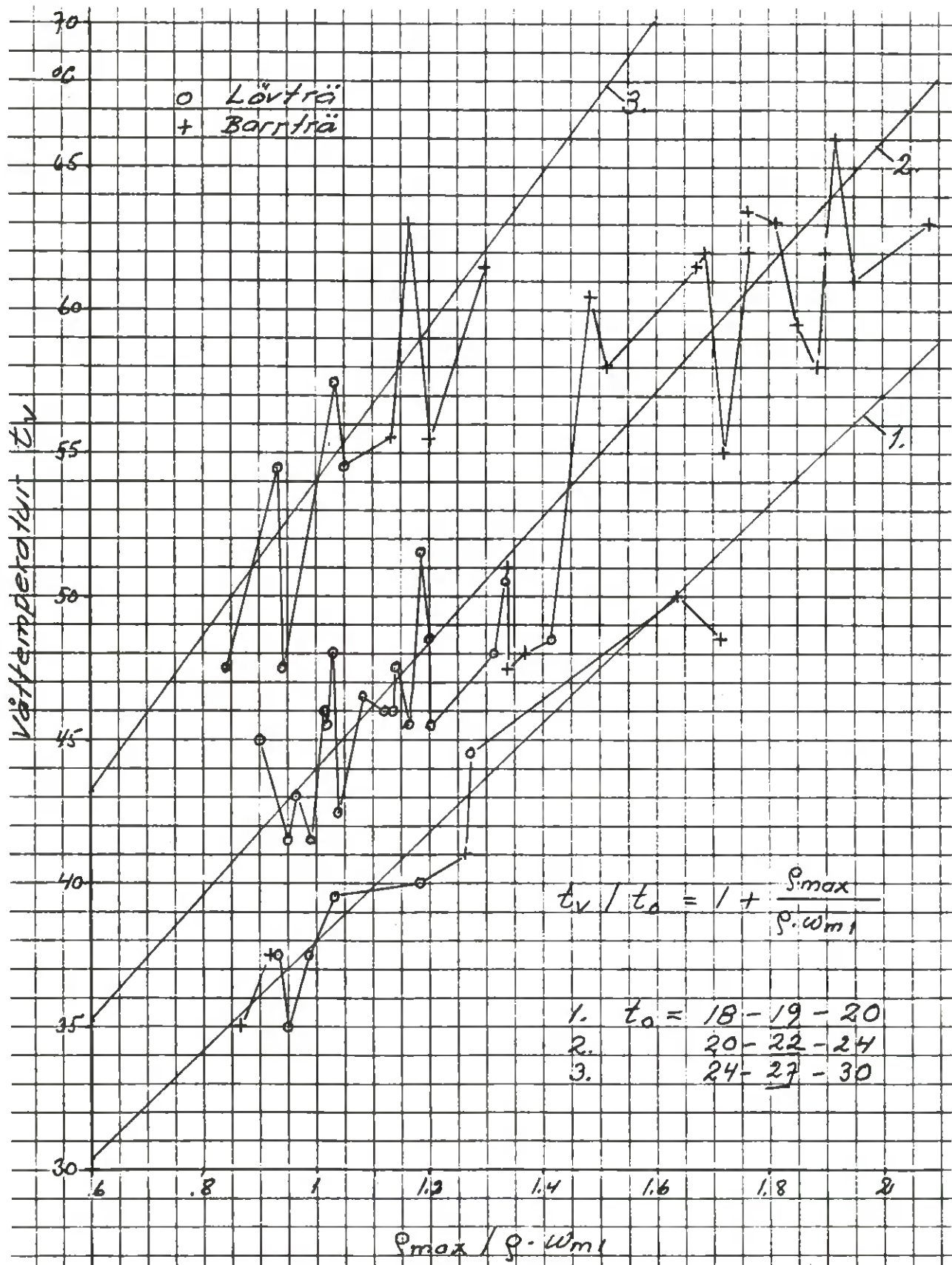
Grupp 1      $t_o = 18 - \underline{19} - 20$

2             $20 - \underline{22} - 24$

3             $24 - \underline{27} - 30$

Temperaturintervallen för vardera gruppen innehåller då i stort sett den experimentella temperaturintervallen enligt tabell 1a och 2a. Någon precis definierad våttemperatur existerar givetvis inte för ett visst träslag, däremot kan ett visst intervall anses motiverat. Intervallet är relativt starkt beroende av den vattenmängd  $\rho_{m1}$  träet innehåller per  $\text{m}^3$  vid inträdet i den hygroskopiska torkningsfasen, våttemperaturen minskar med ökad vattenmängd.

Torkningstiden har beräknats i enlighet med Appendix 1 med i rekommenderade scheman angivna värden av  $t_{max}$ . Då  $\theta > \theta_{max}$  torkar man i amerikanska scheman med konstant (maximal) psykrometerskillnad och medelfuktkvoten kan då antagas bli exponentiellt utjämnad mot den mot maximal psykrometerskillnad svarande jämviktsfuktkvoten. Denna metodik för beräkning av torkningstiden stämmer väl med verkligheten enligt nedan behandlade torkningsförsök med furu och gran.



Figur 8. Vättemperatur  $t_v$  som funktion av densitet  $\rho$  och kritiskt fuktal  $\omega_{m1}$  (medelvärden 25-50 mm virkestjocklek).

I det inledande torkningsskedet, då ytfuktkvoten ännu är större än fibermättnadsfuktkvoten och torkningen approximativt innebär avdunstning av fritt vatten vid den våta temperaturen  $t_v$ , är det osannolikt att fuktvandringen sker som diffusion med den spänningskorrigerade diffusiviteten (ingen krympning). Om man ändå formellt räknar som om detta skulle vara fallet, innebär detta, att fuktkvotsfördelningen i verkligheten inte överensstämmer med den framräknade, vilket i och för sig inte spelar någon roll, eftersom virket inte krymper i detta skede. Man får emellertid på detta sätt en kritisk torkningshastighet vid inledningen till det hygroskopiska skedet, som är anpassad till den därvid begynnande diffusionsprocessen. I det "våta" skedet är torkningshastigheten entydigt bestämd av psykrometerskillnaden och lufthastigheten och man kommer således till en korrekt kritisk torkningshastighet och en korrekt beräknad torkningstid till den tidpunkt då den hygroskopiska fasen börjar.

Det spelar därför troligen en underordnad roll för virkeskvaliteten hur torkningsschemat är beskaffat före det hygroskopiska skedet, bara man ser till, att torkningstiden blir korrekt beräknad mellan fuktkvoterna  $u_{m0}$  och  $u_{m1}$  och att den kritiska torkningshastigheten är den rätta med hänsyn till det valda värdet av  $u_{m1}$  ( $w_{m1}$ ). Detta bekräftas av att samma sprickarea har uppmätts vid torkning av 75 x 150 furu med torkningsscheman enligt lösningarna A och B ovan. Skillnaden är endast att torkningstiden blir något kortare vid tillämpning av schema B.

Sammanfattningsvis kan konstateras att utvärderingen av amerikanska torkningsscheman enligt den valda metodiken ger en tillfredsställande beskrivning av dessa scheman (figur 3-6, tabell 1b och 2b) och att därur beräknad torkningstid i de flesta fall överensstämmer med utprovade värden. Undantag utgöres av de båda lövträarterna paper birch och sycamore, för vilka den beräknade torkningstiden är ungefär dubbelt så lång som den angivna. Möjligen kan de angivna tiderna avse tidigare brädgårdstorkat virke. För några barrträarter (markerade med 1) i tabell 2b överensstämmer beräknade torkningstider med de angivna bäst om man antar torkning till 10 % slutfuktkvot i stället för 6 %. Barrträ torkas i praktiken ofta till 10 %.

## TORKNING ENLIGT MODELLERNA M1 OCH M2

Torkningsprocessen betraktas enligt ovan som diffusion av virkesfukten med fuktkvoten som en drivande potential. Fuktbalansen för två näraliggande plan vinkelrätt mot fuktströmmen ger då en differentialekvation med en för virkestorkningen intressant partikulär lösning

$$u = C \cdot e^{-\tau/\tau_k} \cdot \cos(\beta x/\delta_1) \quad (1)$$

Den är intressant av det skälet, att det randvillkor som är förknippat med denna lösning i kombination med energibalansen mellan torkluft och virkesyta ger ett torkningsschema för den hygroskopiska torkningsfasen, som är väl förenligt med empiriskt utprovade torkningsscheman, om

1. Fukttjämvikt antages råda med torkatmosfären i virkesytan (europeiska torkningsscheman).
2. Ytfuktkvoten överstiger jämviktsfuktkvoten med ett visst fuktkvotsberoende belopp  $\Delta u$  (amerikanska torkningsscheman).

Enligt (1) är fuktkvoten cosinus-formad vid alla tidpunkter  $\tau$ . En generalisering av lösningen (1) till ett verkligt begynnelsevillkor - ungefär konstant fuktkvot över virkestvärnsnittet - har ovan gett relationerna (18), (19), (20) för fuktkvoten och relationerna (21), (22), (25) för torkningsschemat (psykrometerdifferensen i torkluften). Dessa relationer ger två nya alternativa torkningsmodeller:

M1 med antagen fukttjämvikt i virkesytan (europeiska torkningsscheman).

M2 med antagandet att jämvikt inte hinner inställa sig i virkesytan (amerikanska torkningsscheman).

Modellerna ger möjlighet dels att realisera en enkel styrning av torkningen på basis av tiden i stället för den svärmätta fuktkvoten, dels att systematisera valet av torkningsschemats parametrar.

Grundförutsättningen för att modellen ska kunna användas är, att ett enligt modellen beräknat tidsschema för torkningen ger ett beräknat tidsförlopp av virkesfuktkvoten som överensstämmer med ett uppmätt förlopp.

Ett stort antal provtorkningar med furu och gran har sedan 1981 utförts i Träteks mobila virkestork och den första industriella tillämpningen gjordes 1981 vid Gruvöns sågverk. Den torkningsmodell, som därvid huvudsakligen använts är en modell, som gått under benämningen "modell 3". Den avviker obetydligt från modell M1 när det gäller torkning till skeppnings-torr.

Den ovan behandlade systematiseringen av amerikanska torkningsscheman utfördes år 1987. På basis härav och de utförda försökstorkningarna har de ursprungligen antagna diffusivitetvärdena reviderats till i enlighet med relationen (24) ovan angivna värden. Kompletta torkningsförsök, där torkningsschemat beräknats på basis av de nya diffusivitetvärdena, har ej utförts. God överensstämmelse mellan modell och verklighet verkar dock sannolik, men kontrollförsök bör komma till utförande, se Appendix 2.

De i modellerna M1 och M2 ingående beräkningsformlerna har sammanställts i Appendix 1, där även från systematiseringen av empiriska torkningsscheman erhållna riktlinjer för val av ingående parametrar sammanställts.

Några modellexempel för torkning av furu visas i figur 9-13. Vid torkning av färskt virke till skeppningstorrt användes i de 26 första försöken en modell baserad på splintveden med dess betydligt högre fuktkvot, varvid kunde konstateras /1/, att sprickbildningen i centrumvirke ökade med ökad andel splintved i torkningssatsen. Den valda styrningen på splintvedsfuktkvoten är därför troligen den mest rationella för furu och gran och har bibehållits vid de följande försöken. Splintveden torkar fortare än kärnved och vid en viss medelfuktkvot (15-18 %) är fuktkvotsskillnaden liten mellan kärna och splint. För färdigtorkning till lägre fuktkvoter har det visat sig lämpligt att för den fortsatta torkningen använda en modell, där kärna och splint blandas och diffusiviteten beräknas som ett i förhållande till kärnvedsandelen  $\mu_k$  vägt medelvärde av diffusiviteten för kärna och splint. Vid denna fortsatta torkning är alla fuktkvoter lägre än fiber-mättnadsfuktkvoten och fukt kan då även passera kärngränsen i båda riktningarna.

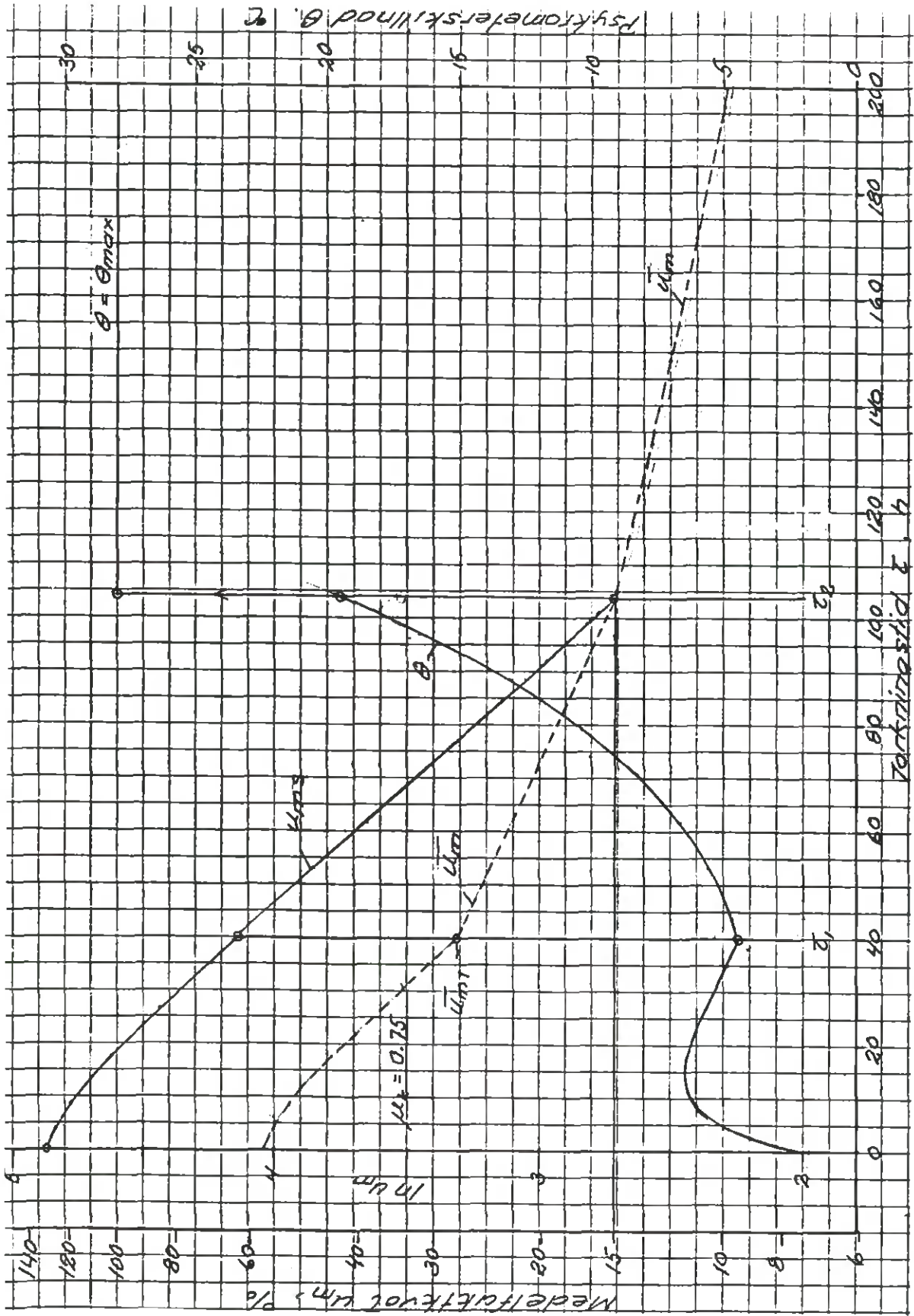
Figur 9 visar modell M1 för torkning av 50 x 150 mm furuvirke med kärnvedsandelen  $\mu_k = 0,75$  och densiteten  $\rho = 430 \text{ kg/m}^3$ . Lufthastigheten har antagits till 3 m/s och övriga data har beräknats enligt Appendix 1. Figuren visar medelfuktkvot  $u_m$  i logaritmisk skala och psykrometerskillnaden  $\theta$  som funktion av torkningstiden  $\tau$ .

Heldragen fuktkvotskurva  $u_{ms}$  är splintmodellen och  $\theta$  den däremot svarande psykrometerskillnaden. Vid tiden  $\tau_1$  har fiber-mättnadsfuktkvoten (25 %) uppnåtts i splintens ytskikt, då den hygroskopiska fasen inleds. Vid tiden  $\tau_2$  har splinten uppnått en medelfuktkvot = 15 %. Denna fuktkvot har visat sig vara kritisk från två olika synpunkter:

1. Splintmodellens  $u_{ms}$  skär den experimentellt genom vägning av virkespaketet bestämda medelfuktkvoten i samtliga försök nära denna tidpunkt  $\tau_2$ . Detta talar för att splint- och kärnmedelfuktkvoterna då är nästan lika och att det därför är lämpligt att för den fortsatta torkningen använda en blandad kärna-splint-modell med en, i beroende av kärnvedsandelen, relativt kraftigt minskad diffusivitet.
2. Enligt amerikanska undersökningar /3/ övergår spänningarna i virkesytan vid torkning av barrträ från drag- till tryckspänningar vid en medelfuktkvot på mellan 15 och 20 %. För att få överensstämmelse mellan modell och verklighet har det visat sig nödvändigt att minska diffusiviteten för  $\tau > \tau_2$ . Diffusivitetstillskottet på grund av spänningar  $\beta F_t F_\delta$  bortgår och diffusiviteten beräknas i stället för virkets temperatur och korrigeras med hänsyn till minskningen vid minskad fuktkvot.

Man får således av två orsaker en riktningsändring i modellen vid tiden  $\tau_2$ , särskilt för grövre virke (stort  $\beta F_t F_\delta$ ). För  $\tau > \tau_2$  har modellen ritats som en streckad kurva (blandning kärna-splint).

Vid tidpunkten  $\tau_2$  ökas i enlighet med amerikansk praxis psykrometerskillnaden för barrträ från modellvärdet till  $\theta_{max}$ .



Figur 9. 50 x 150 furu, Modell M1,  $\rho = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_k = 0,75$ , enligt Appendix 1.

Under sluttorkningen  $\tau > \tau_2$  är psykrometerskillnaden konstant =  $\theta_{\max}$ . Torkningskurvan är då en exponentialfunktion som går mot den mot  $\theta_{\max}$  svarande jämviktfuktkvoten  $u_e$ , d v s

$$\frac{\bar{u}_m - u_e}{\bar{u}_{m3} - u_e} = e^{-\tau/\tau_k}$$

Denna exponentialfunktion är också en lösning till diffusionsekvationen.  $\bar{u}_m$  är det vägda medelvärdet av splintens och kärnans medelfuktkvoter. Vid torkning till låga fuktkvoter blir kärnans medelfuktkvot något högre än splintens medelfuktkvot.

Torkningsmodellens medelfuktkvot följer alltså den heldragna fuktkvotkurvan till tiden  $\tau_2$  ( $u_{ms} = u_{mk} = \bar{u}_m$ ) och därefter den streckade kurvan för  $\tau > \tau_2$ .

I den inledande torkningsfasen  $\tau = 0 - \tau_1$  (splintfuktkvoten högre än fiber-mättnadsfuktkvoten i virkesytan) ger torkningsförsöken, att medelfuktkvoten kärna-splint  $u_m$  ganska nära följer ett tidsförlopp, som i det logaritmiska diagrammet erhålles genom parallellförskjutning nedåt av splintmedelfuktkvoten  $u_{ms}$  ett stycke, som svarar mot kärnvedsandelen  $\mu_k$ , d v s virkets medelfuktkvot blir

$$\bar{u}_m / u_{ms} = 1 - 0,75 \mu_k \quad (\text{furu})$$

om splintens medelfuktkvot i det otorkade virket är 130 % och kärnans medelfuktkvot är 33 % (kärnans fuktkvot är hela tiden ungefär en konstant bråkdel av splintens fuktkvot).

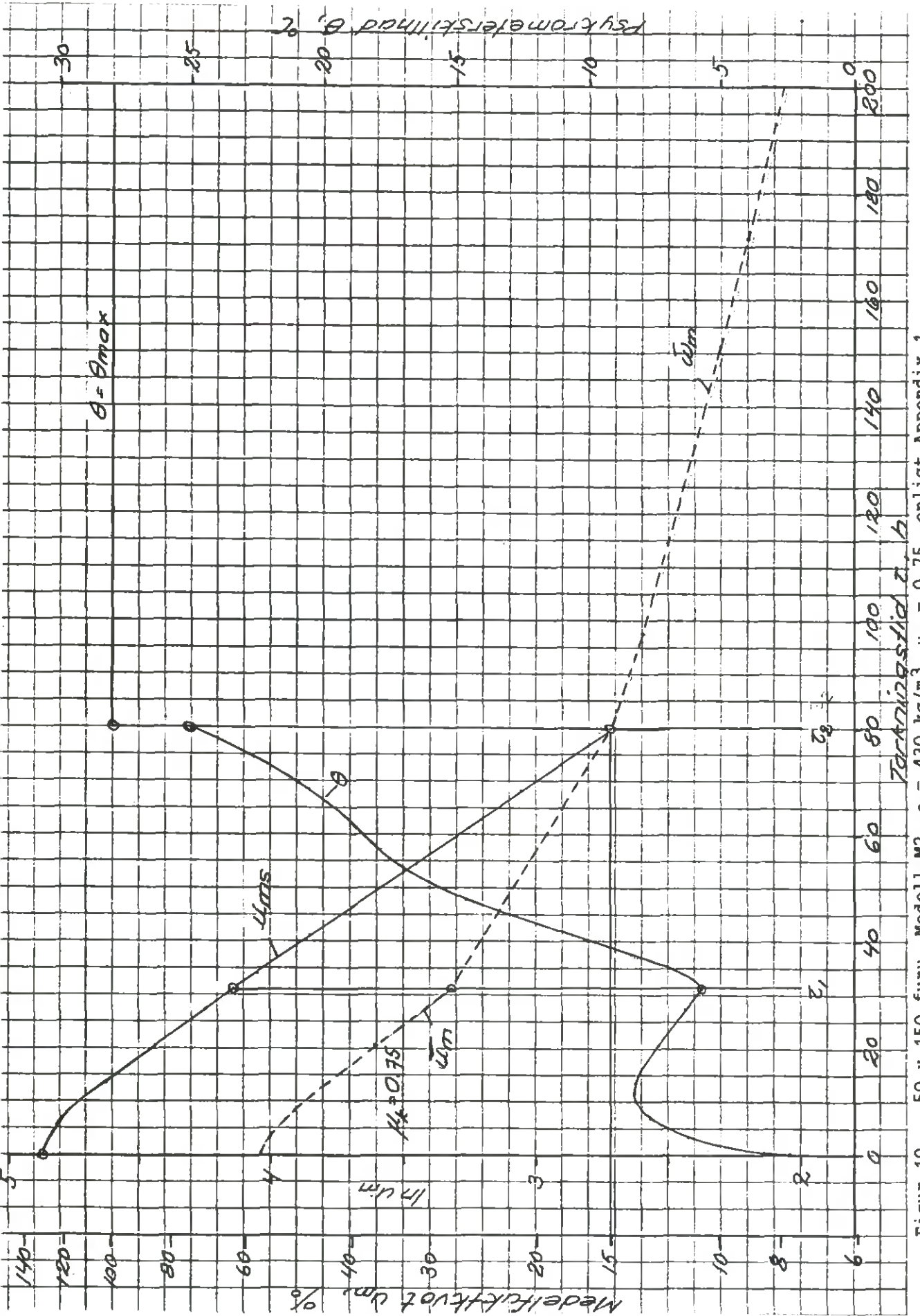
Virkets medelfuktkvot i torkningsintervallet  $\tau_1 - \tau_2$  överensstämmer enligt torkningsförsöken i stort sett med en rät förbindelselinje mellan punkterna  $(\tau_1, \bar{u}_{m1})$  och  $(\tau_2, 15)$  i det logaritmiska diagrammet. I några försök ligger den verkliga kurvan delvis något över denna linje; i några försök ligger den något under denna linje. Man kan därför uppskatta virkets medelfuktkvot i detta intervall med formeln

$$\bar{u}_m / \bar{u}_{m1} = (\bar{u}_{m1} / 15)^{-\frac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}}$$

För exempelvis torkning till en avsedd medelfuktkvot = 18 % bör denna approximativa modell användas för beräkning av torkningstiden. Slutfuktkvoten kommer eljest att understiga den avsedda med 1 å 2 fuktkvotsprocent, vilket också visat sig vara fallet vid industriell användning av enbart splintmodellen.

I figur 10 visas modell M2 för samma virkessortiment och data. Torkningsschemat får ett annorlunda utseende med en brantare stegring av  $\theta$  från tiden  $\tau_1$ .

Torkningsförsöken har gett vid handen, att modell M2 aktiverar en högre diffusivitet än modell M1. Diffusivitetsnivån ökar med en enhet, för splintved från 6 till 7 och för kärnved från 4 till 5. Detta innebär, att torkningstiden vid tillämpning av M2 endast blir cirka 77 % av torknings-



Figur 10. 50 x 150 furu, Modell M2,  $e = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_k = 0.75$ , enligt Appendix 1.

tiden vid tillämpning av modell M1. Såvitt hittills kan bedömas från försök är denna avsevärda förkortning av torkningstiden inte åtföljd av en ökad sprickbildning. Så bör också vara fallet, om ökningen i diffusivitet är reell. Man kan tänka sig, att de fria hydroxylgrupperna förblir på en högre excitationsnivå om virkesytan inte hinner närma sig jämvikt med torkatmosfären (lägre grad av tvärbinding mellan hydroxylgrupper).

Figur 11 visar modell M1 för sortimentet 25 x 100 furu med normaldensitet och kärnvedsandelen  $\mu_k = 0,20$ . Detta sortiment är känsligt för kvisturfall och modellen har därför beräknats med en våttemperatur svarande mot gruppen temperaturkänsliga träslag (i detta fall  $t_v = 37$  °C mot  $t_v = 51$  °C för sortimentet 50 x 150). Enligt tidigare redovisade försök /1/ innebär en minskad våttemperatur en ökning av sprickbildningen vid torkning med samma  $\beta$ -värde. För undvikande av "mikro-sprickor" har därför  $\beta$ -grupp 2 tillämpats ( $\beta$ -grupp 3 för 50 x 150).

Man ser av figur 11, att virkets medelfuktkvot ligger ganska nära splintmedelfuktkvoten, d v s torkning av ren splint följer splintmodellen, samt att modellens riktningsändring vid tiden  $\tau_2$  blir betydligt mindre än för sortimentet 50 x 150. Detta beror dels på den mindre kärnvedsandelen, dels på det mindre spänningstillskottet  $\beta F_t F_\theta$  till diffusiviteten.

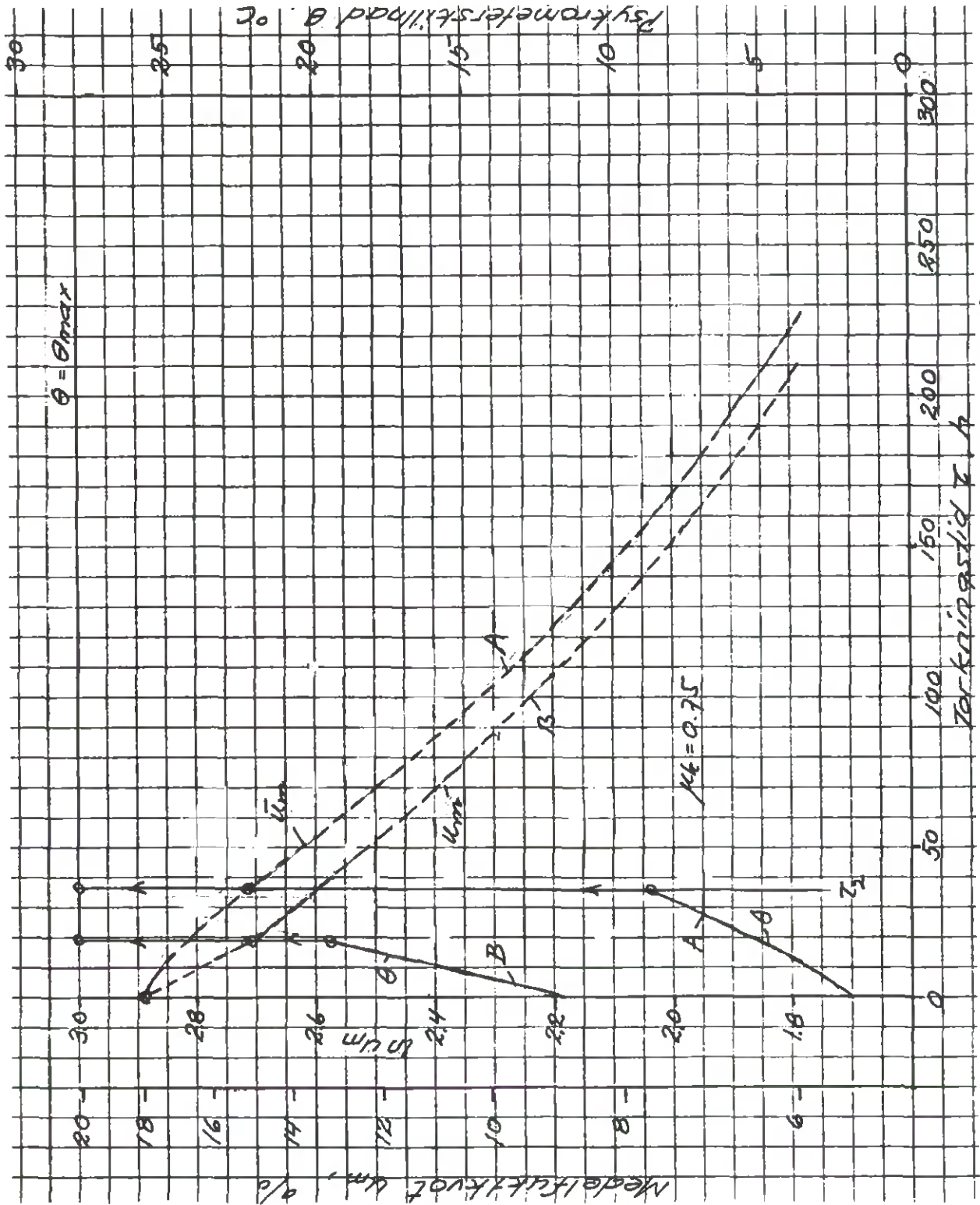
I praktiken är det relativt vanligt, att man för snickeriändamål köper skeppningstorr virke och sluttorkar detta i en kammartork. Detta innebär en ökning av den totala torkningskostnaden och en försämring av kvaliteten i den mån förtorkningen gjorts i en längdcirkulationstork. En tillämpning av modell M1 för detta fall visas i figur 12 för sortimentet 50 x 150 furu med data som ovan. Två fall har beräknats:

- A. Fuktkvotsutjämning har skett i virket mellan förtorkning och sluttorkning.
- B. Virket går till sluttorkning direkt efter förtorkningen med bibehållen fuktkvotsgradient i virket.

I fallet B överensstämmer torkningsschema och medelfuktkvot fr o m 18 % med figur 9. I fallet A är modellen beräknad för en blandning av kärna och splint under hela torkningen med utgångsfuktkvoten 18 %. Detta schema börjar med ett betydligt lägre  $\theta$ -värde än i fallet B. Skillnaden i torkningstid blir ganska liten. Detta fall har inte provats experimentellt.

Vid mindre sågverk är det inte ovanligt, att virket får förtorka utomhus till en viss grad, innan det sätts in i torken. En tillämpning av modellen för färskt virke ger då en för hård torkning i början. I figur 13 visas modell M1 med samma data som modellen i figur 9 med den skillnaden att utgångsmedelfuktkvoten minskats från cirka 57 % till cirka 33 % (splintfuktkvoten minskats från 130 % till 75 %). Som framgår av figur 9 och figur 13 minskar då den under den första torkningsfasen maximala psykrometerdifferensen från 6,4 °C till 3,7 °C. Inte heller detta fall har provats experimentellt, men det är troligt att modellen stämmer ganska bra. Huvudsvårigheten ligger i att bestämma splintens utgångsmedelfuktkvot.





Figur 12. 50 x 150 furu, Modell M1,  $u_{mo} = 18\%$ ,  $\rho = 430 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_k = 0.75$ , enligt Appendix 1.

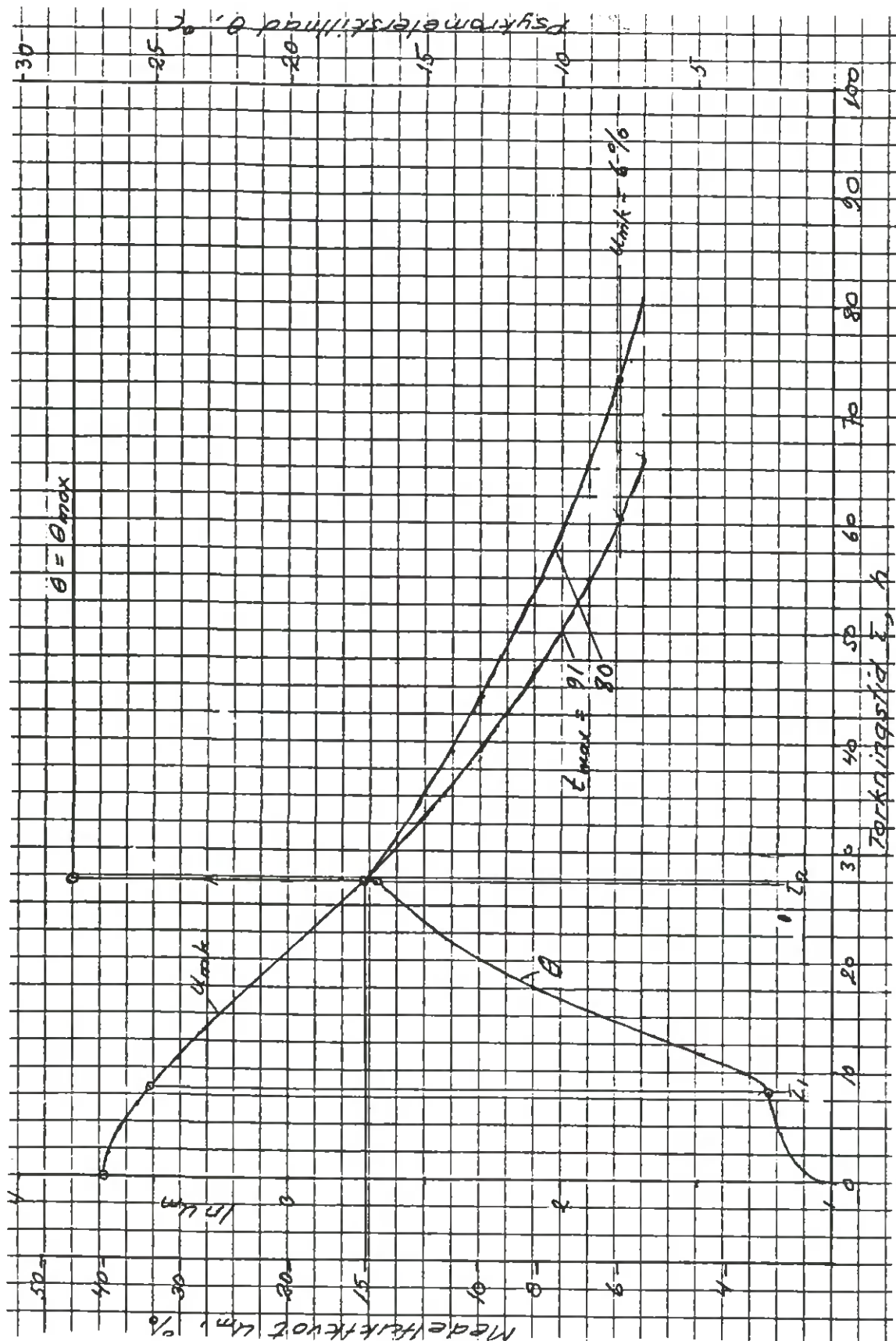


Om virket börjat spricka under förtorkningen, blir kvaliteten givetvis lidande och man får då överväga att välja en mildare  $\beta$ -grupp för torkningen, varvid torkningstiden kommer att öka.

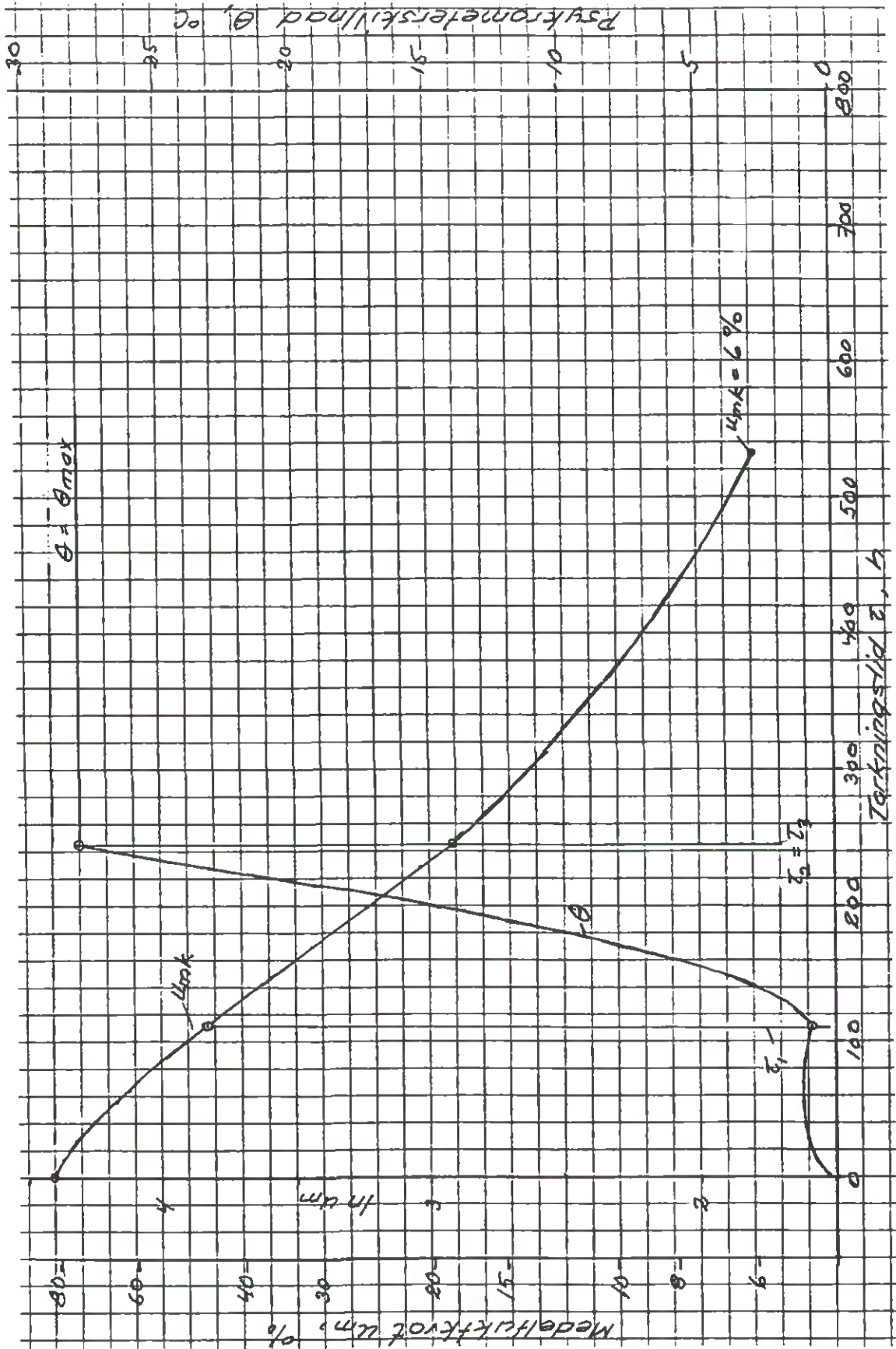
Vid torkning av barrträ enligt amerikansk systematik får man i de fall, då man styr torkningen på basis av en låg ingående kärnvedsfuktkvot, att spänningsovändningen ( $u_m = 15\%$ ) inträffar vid en psykrometerskillnad som är betydligt lägre än  $\theta_{max}$ , jfr figur 5. Man höjer trots detta psykrometerskillnaden till  $\theta_{max}$  vid denna fuktkvot. En tillämpning av modell M2 för detta fall visas i figur 14 för Incence cedar (25 x 150 mm). Om  $t_{max}$  minskas från modellvärdet 91 °C till 80 °C, ökar torkningstiden inte oväsentligt. Detta innebär en sänkt våttemperatur under sluttorkningen (torkanläggningen tål inte den högre temperaturen).

Vid torkning av lövträ får psykrometerskillnaden i modell M2 ett annorlunda förlopp jämfört med barrträ beroende på att storheten  $m$  i uttrycket för  $\Delta w$  då har ett annat värde ( $m = 0,4$  för barrträ,  $m = 0$  för lövträ). Figur 15 visar en tillämpning av modell M2 för Red oak (25 x 150 mm). För lövträ anses spänningsovändningen alltid ske ungefär då torkningsschemat uppnår  $\theta = \theta_{max}$ . Detta sker i allmänhet vid en högre medelfuktkvot (i exemplet cirka 18 %) än för barrträ (15 %). Alla lövträarter styrs konsekvent på kärnvedens fuktkvot.

De i figurerna 9-15 visade förloppen av psykrometerskillnaden  $\theta$  har alla beräknats utan hänsyn till temperaturfallet genom en virkesstapel. Om torkluftens temperatur styrs enbart på inblåsningssidan av virkespaketet eller om blåsdjupet är mycket stort vid styrning av lufttemperaturen på basis av medelvärdet på in- och utblåsningssidan, måste torkningsschemat korrigeras med hänsyn till temperaturfallet genom virket, se Appendix 1.



Figur 14. 25 x 150 Incence cedar enligt Appendix 1 och Tabell 2 a.



Figur 15. 25 x 125 Red oak enligt Appendix 1 och Tabell 1 a.

## KONDITIONERING AV VIRKET EFTER TORKNINGEN

Efter nedtorkning är fuktkvoten högre i virkets mitt än i ytskiktet och torkningsspänningar råder över virkestvärnsnittet. "Ythårdhet", d v s kvarstående deformationer i cellstrukturen genom övertöjning, ger ytterligare spänningar då fuktkvoten utjämnas över virkestvärnsnittet. Vid en efterföljande klyvning eller osymmetrisk bearbetning av virket förorsakar dessa fenomen så småningom inte önskvärda deformationer i tillverkade träprodukter.

Utöver dessa inhomogeniteter över virkestvärnsnittet uppkommer under torkningen deformationer i form av skevhet, flatböj och kantkrok, som har sin grund i en olikformig axiell anordning av virkets fibrer.

Vid en efterföljande lagring av virket sker en långsam reologisk utjämning av spänningarna, som kan ta år i anspråk. Det är emellertid relativt enkelt att i anslutning till torkningen genomföra en konditionering av virket vid hög temperatur och fukt i torken. Härigenom sker en väsentligt snabbare utjämning (några timmar till några dygn beroende på träslag, virkestjocklek, slutfuktkvot och torkningsschema). På grund av den alltid föreliggande stora variationen i olika virkesindividuers egenskaper är det dock inte möjligt - vid hittills tillämpade konditioneringsförfaranden - att undvika en spridning i den kvarvarande inhomogeniteten, men de i praktiken inträdande komplikationerna kan reduceras i väsentlig grad.

De axiella deformationerna synes kunna minskas till en viss grad genom konditionering och kan minskas ytterligare genom mekanisk belastning av virkestaplarna (cirka 1000 kg/m<sup>3</sup> stapelarea) under torkningen, som då bör ske vid relativt hög temperatur, och genom ökad strötäthet i virkespaketten. Virke från klentimmer och s k grönkvinta deformerar mera än normalt virke. Här redovisade försök hänför sig till en låg stapelhöjd, cirka 1,2 m, d v s relativt liten belastning i stapeln.

Konditioneringsmetodikerna har utprovats i USA under slutet av 1940-talet /3/, /11/. Den baseras på mätning av fuktkvoten i provplankor som antages representera torksatsen och innefattar dels en fuktkvotsutjämningsperiod, dels en därpå följande konditioneringsperiod:

1. Torka den torraste provplankan till en fuktkvot som understiger den önskade slutmedelfuktkvoten  $u_m$  med 2 fuktkvotsprocent, d v s till  $u_m - 2\%$ .
2. Då fuktkvoten enligt 1. har uppnåtts, inställes i torken en psykrometerskillnad, som svarar mot en jämviktsfuktkvot =  $u_m - 2$ .
3. Torkningsklimatet enligt 2. bibehålls tills fuktkvoten i den våtaste provplankan nått fuktkvoten  $u_m$ . Utjämningsperioden är då avslutad och medelfuktkvoten cirka 1 % lägre än  $u_m$ .
4. Därefter inställes ett konditioneringsklimat i torken. Psykrometerskillnaden ska då motsvara en jämviktsfuktkvot =  $u_m + 2$  à 3 % för barrträ och =  $u_m + 3$  à 4 % för lövträ.
5. Konditioneringen fortsätter tills man genom gaffelprov kan konstatera att ythårdheten är tillfredsställande liten.

Konditioneringen bör utföras vid en så hög temperatur som torken tillåter, helst 80-85 °C, förutsatt att basningsanordningarna och torkens täthet och värmeisolation tillåter att rätt konditioneringsklimat då kan upprätthållas.

Om konditionering av virket inte erfordras men en liten fuktkvotsspridning är väsentlig, kan utjämningsperioden 1-3 enligt ovan tillämpas separat. Standardavvikelsen blir då cirka  $s = 0,5 \%$ , förutsatt att torken kan realisera en jämn lufttemperatur och jämn lufthastighet samt att blåsdjupet inte är för stort.

Huvudsyftet med det här redovisade arbetet har varit att eliminera behovet av att styra torkningen på basis av fuktkvoten i provplankor och att kunna ersätta denna metodik med en tidsstyrning av torkningen. Detta bör då gälla även för fuktkvotsutjämnning och konditionering. Orienterande konditioneringsförsök har utförts i anslutning till försöken för utprovning av torkningsmodellerna (furuvirke), varav framgår att en tidsstyrning av konditioneringen synes vara möjlig. Fuktkvotsutjämningsperioden har inte undersökts, men torde inte utgöra något stort problem.

Följande mätningar har utförts på virket efter avslutad konditionering:

1. Den utgående medelfuktkvoten på basis av 20 st provstycken, nedtorkade i torkskåp.
2. Fuktkvotsvariationen över virkestvärnsnittet i 20 st provstycken som uppdelats i lameller enligt figur 16.
3. Tillverkning av 20 st gaffelprover enligt figur 16 och mätning av deformationen efter fuktkvotsutjämnning i gaffelproven.
4. Mätning av skevhet, flatböj och kantkrok mot plant underlag enligt figur 17 för allt i torksatsen ingående virke (98-126 st virkesstycken). Mätning på full virkeslängd och omräkning till 3 m längd enligt nedan.

Data från försök med konditionering och medelvärden av uppmätta värden på ythårdhetsmättet  $c_y$  (vid försöken efter fuktutjämnning till cirka 11 % fuktkvot) och fuktgradientmättet  $c_u$  har införts i tabell 3. Följande samband har härletts ur dessa försök:

$$\frac{a'_{\text{kond}} \cdot \tau_{\text{kond}}}{\delta_1^2} \cdot (1 - F_{t_{\text{max}}}) = C_k \cdot \frac{\text{kond}}{\theta_{\text{max}}} \cdot \frac{2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \frac{1}{3600} \quad (30)$$

$C_k$  = ythårdhetsberoende faktor (-)

$\tau_{\text{kond}}$  = konditioneringstiden (h)

$\delta_1$  = halva virkestjockleken (m)

$\delta_2$  = halva virkesbredden (m)

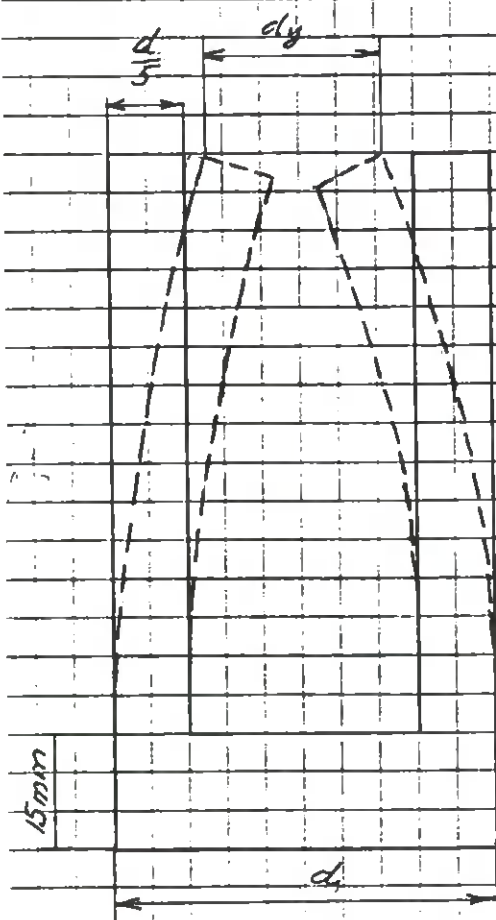
$\theta_{\text{kond}}$  = psykrometerskillnad under konditioneringen (°C)

$\theta_{\text{max}}$  = psykrometerskillnad i torkningens slutfas (°C)

	85 mm		
		3.	
		4.	
1.		5.	2.
		6.	
		7.	
		8.	

Mätt på fuktkvotsgradienter:

$$c_u = \frac{\text{Medelv. av fuktkvoterna i lamellerna 5, 6}}{\text{Medelv. av fuktkvoterna i lamellerna 3, 8}}$$



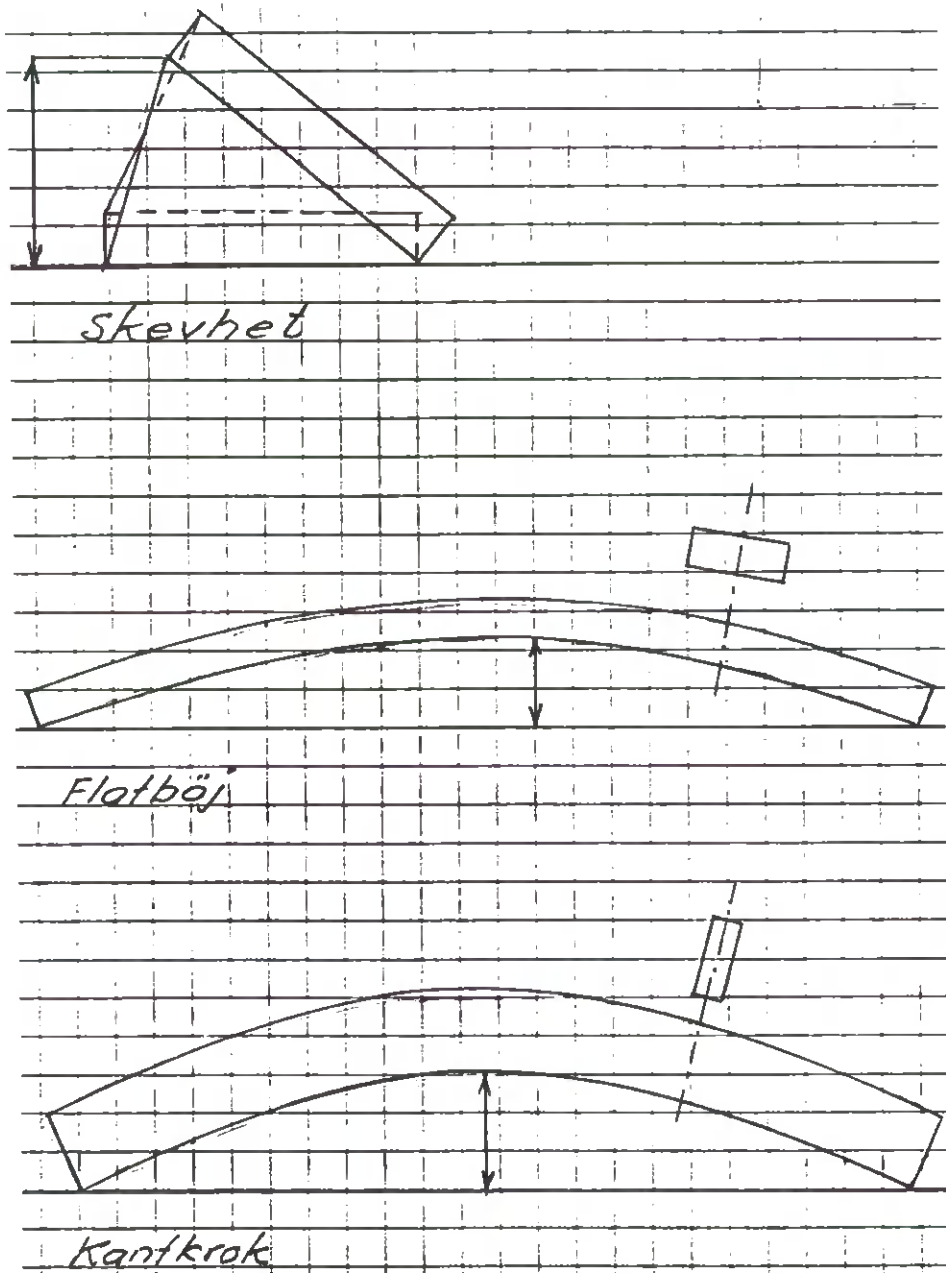
Mätt på ythården:

$$c_y = d_y / d$$

efter fuktkvotsutjämnning

skivans tjocklek = 30 mm

Figur 16. Provtagning för bestämning av fuktkvotsgradient och ythårdhet.



Figur 17. Mätning av axiella deformationer.

Tabell 3. Sammanställning av data från konditioneringsförsök.

Försök	Sortiment	Torknings- modell	kg/m <sup>3</sup>	$\mu_k$	$u_m$ %	s	$t_v$ °C	$\theta_{kond}$ °C	$\theta_{max}$ °C	$t_{max}$ °C	$t_{kond}$	$c_y$	$c_u$	$c_k$
F16	50x150 F	M1	424	.72	11,1	0,69	49	6,6	29	68	16	0,77	1,29	0,144
F27	- " -	M1	423	.78	8,8	0,66	55	9	25	69	33,4	0,84	1,23	0,165
F28	- " -	Mspec	414	.70	10,6	0,90	50	13,5	14	64	35	0,56	1,20	0,055
F29	- " -	Mspec	417	.70	10,0	0,44	50	13,5	14	64	35	0,49	1,25	0,053
F30	- " -	M1	414	.72	8,8	1,05	50	10	25	68	37,5	0,81	1,30	0,165
F31	63x150 F	M1	423	.75	8,85	0,92	50	9,5	25	68	54,4	0,91	1,29	0,163
F43	- " -	M1	429	.68	10,9	1,2	50	7	28	68	25,5	0,78	1,37	0,140
F44	- " -	M1	411	.66	9,5	0,79	50	7,5	28	68	35	0,90	1,20	0,170
F46	- " -	M2	439	.67	7,7	0,67	50	10	28	68	28	0,70	1,16	0,104
F47	- " -	M2	445	.64	7,7	0,88	50	10	28	68	28	0,62	1,28	0,105
F59	25x100 F	M2	438	.17	7,1	0,44	38	8	28	66	7	0,95	-	0,189
F60	75x150 F	M2	436	.77	14,8	1,23	50	-	-	68	0	0,44	1,64	0
F61	50x150 F	M2	418	.64	8,1	0,40	50	8	28	68	23,2	0,81	1,00	0,180
F62	63x150 F	M2	425	.77	7,55	0,68	50	8	28	68	41	0,91	0,99	0,183
F63	19x 75 F	M2	447	.13	7,6	0,29	38	8	28	66	6	1,17	-	0,203
F64	- " -	M2	452	.13	6,1	0,62	38	18	28	66	1,13	0,40	-	0,018

- $a'_{\text{kond}}$  = diffusiviteten under konditionering ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $t_{\text{max}}$  = torr temperatur under konditionering ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $1-F_{t_{\text{max}}}$  = reologisk krypningsfaktor, jfr (24), svarande mot elastiskt material vid  $t_{\text{max}} = 0^{\circ}\text{C}$ ,  $1-F_{t_{\text{max}}} = 0,0005$  och begynnande "mikroexotermisk" sönderdelning vid  $t = 140^{\circ}\text{C}$ ,  $1-F_{t_{\text{max}}} = 0,9993$ .

Diffusiviteten beräknas i analogi med (24), dock med insatt torrtemperatur i stället för våt och med hänsynstagande till diffusivitetsens beroende av fuktkvoten, som har tagits enligt figur 2 (approximativt parabolisk variation med fuktkvoten).

$$a'_{\text{kond}} = \frac{140}{\rho} [\mu_k e^{0,26n_k} + (1 - \mu_k) e^{0,26n_s}] \cdot e^{\frac{t_{\text{max}}}{33,4}} [1 - (1 - \frac{u_m}{25})^2] \quad (31)$$

- $\rho$  = densiteten ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\mu_k$  = kärnvedsandelen (-)  
 $n_k$  = diffusivitetnivån för kärnveden  
 $n_s$  = " " splintveden  
 $t_{\text{max}}$  = torr temperatur under konditioneringen ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $u_m$  = slutmedelfuktkvot (%)

Diffusivitetnivån  $n$  ökar en enhet vid torkning enligt modell M2 i jämförelse med torkning enligt modell M1 (jfr Appendix 1). Denna ökning kvarstår även under konditioneringen och ger därmed kortare konditioneringstid om torkningen skett enligt M2.

Faktorn  $C_k$  i (30) är en funktion av ur långt konditioneringen drivits,  $d$  v s hur effektivt ythårdheten eliminerats. Ur försöksdata beräknade värden av  $C_k$  har införts i tabell 3. Figur 18 visar förloppet av  $C_k$  vid olika vid försöken uppnådda värden på ythårdhetsmättet  $C_y$ . Ett paraboliskt förlopp

$$C_k = 0,20 + 0,32 (1,2 - C_y)^2 \quad (32)$$

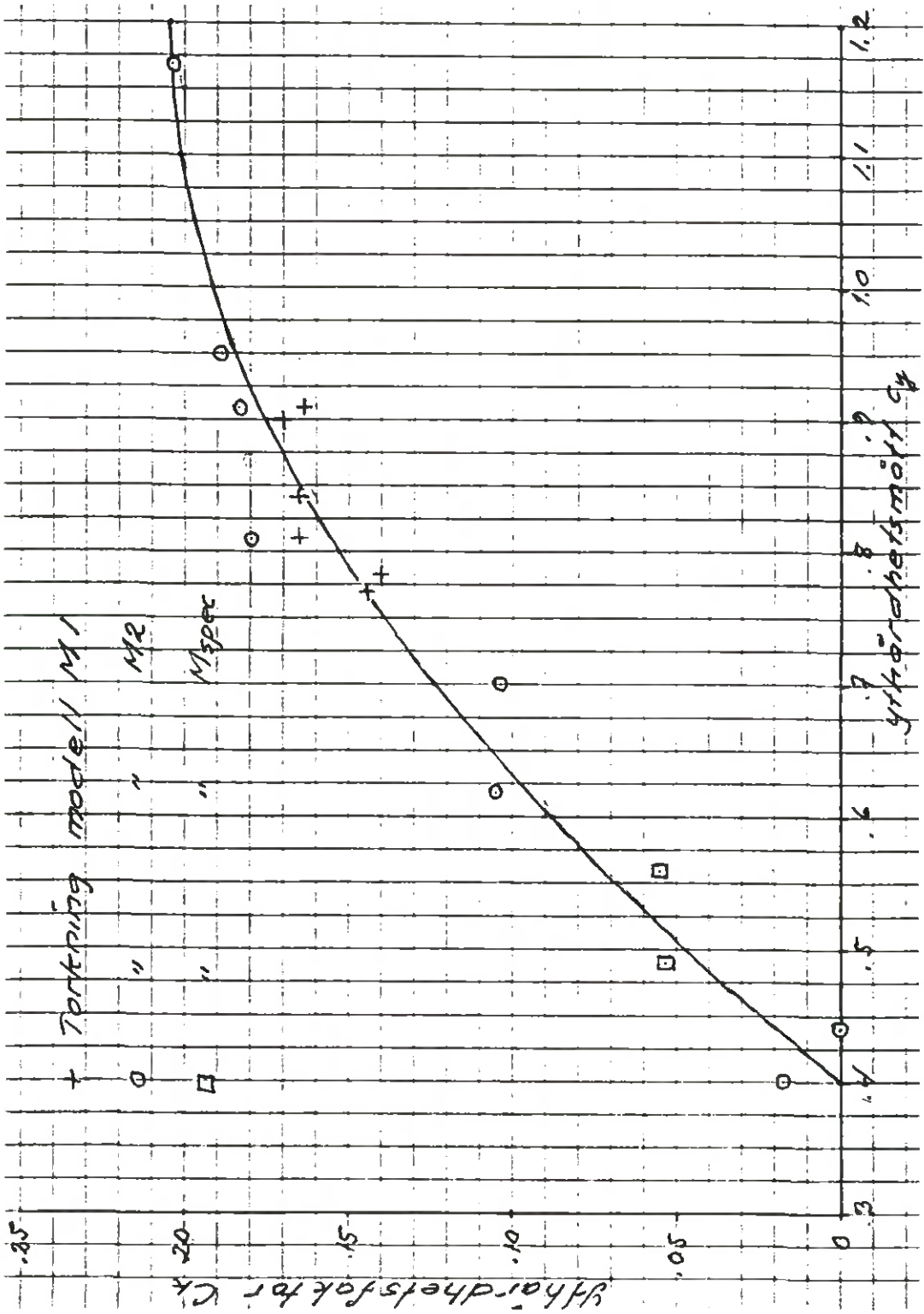
ger en tillfredsställande hög korrelationskoefficient  $r = 0,978$ .

Ythårdheten  $C_y = 0,4$  motsvarar konditioneringstiden  $t_{\text{kond}} = 0$  vid torkning enligt de använda modellerna och  $C_y = 1,2$  är ungefär den maximalt i genomsnitt uppnåbara omvända ythårdheten (utåtgående gafflar).

Man kan således ur (30) beräkna erforderlig konditioneringstid vid olika valda värden på acceptabel ythårdhet. Enligt TRADAs klassificering betecknas

- $C_y = 1$  - 0,9 inga deformationsfel i produkten  
 $C_y = 0,9$  - 0,8 lätta deformationsfel i produkten  
 $C_y = 0,8$  - 0,6 måttliga deformationsfel i produkten  
 $C_y < 0,6$  svåra deformationsfel i produkten  
 $C_y > 1$  för hårt konditionerat

Utan konditionering ( $C_y = 0,4$ ) får man således svåra deformationsfel.



Figur 18. Faktorn  $C_k$  utvärderad enligt (32).

Fuktgradientens utjämning under konditioneringen framgår av figur 19 enligt data i tabell 3. Utjämningen sker i huvudsak linjärt med försvinnande ythårdhet (ökande  $C_y$ ). Dock har torkningsschemat ett relativt stort inflytande på detta förlopp. Den vid torkning enligt modell M2 aktiverade högre diffusiviteten, som enligt ovan kvarstår under konditionering, ger fuktutjämning redan vid  $C_y = 0,8$  medan fuktutjämning efter torkning enligt modell M1 inträder först vid för lång konditioneringstid (omvänd ythårdhet). Torkning enligt modell  $M_{spec}$  (inbyggd konditionering) ger betydligt mindre gradient under torkningen men trots detta svår ythårdhet. En utjämning tar orimligt lång tid.

I tabell 4 har sammanställts medelvärdena för de enligt figur 17 mätta axiella deformationerna för de försök, där sådana mätningar utfördes. Mätning utfördes vid full längd av plankorna. Dessa värden har reducerats till en enhetlig virkeslängd av 3 m, varvid de mätta måtten reducerats i proportionen

$3/L$  för kantkrok ( $k_s$ )

$(3/L)^2$  för flatböj ( $k_f$ )

$(3/L)^2$  för kantkrok ( $k_k$ )

där  $L$  (m) är respektive plankas längd. Deformationerna i tabell 4 är uttryckta i mm/3 m.

De tre deformationerna är inte oberoende av varandra. Av geometriska skäl måste exempelvis en plank med stor flatböj  $k_f$  förorsaka en mindre skevhet  $k_s$  än om samma vridande moment hade varit förhanden utan flatböj. Det är inte klarlagt vilket funktionssammanhang  $f(k_s, k_f, k_k) = 0$  som är rådande. Som jämförelsemått vid olika försök har godtyckligt valts summan  $k_{tot} = k_s + k_f + k_k$ . Denna storhet är inte invariant för olika referenslängder och därför bristfällig.

Totaldeformationen  $k_{tot}$  har korrigerats för olika slutfuktkvoter  $u_m$  vid försöken och korrigerats till en jämförelsefuktkvot av 10 %, varvid antagits, att deformationerna är proportionella mot

$$1 - \frac{u_m}{25}$$

vilket torde vara en rimlig approximation. Den i tabell 4 införda storheten  $(k_{tot})_{u=10}$  är beräknad på detta sätt.

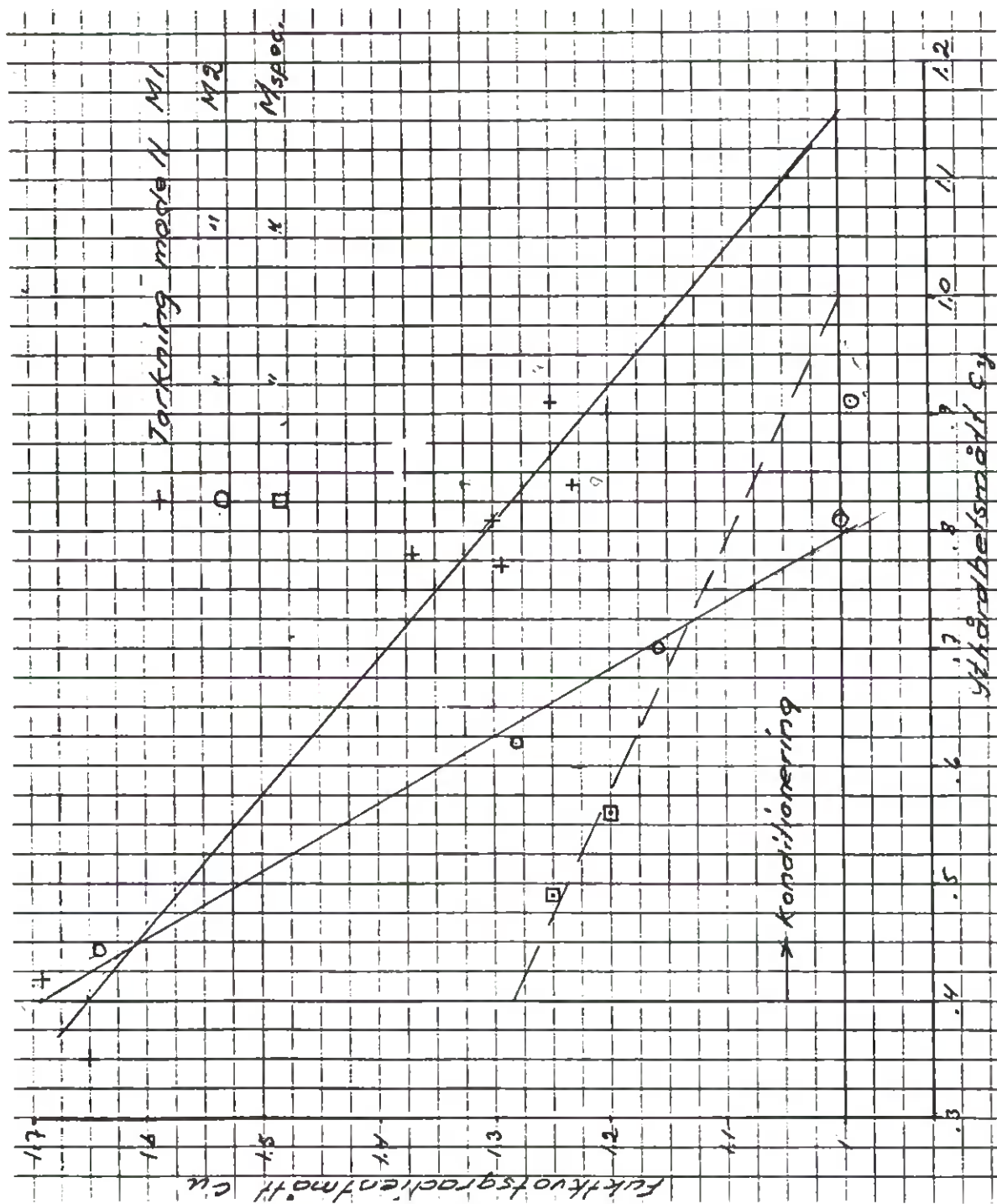
Det är av stort intresse att undersöka i vad mån de axiella deformationerna påverkas av konditioneringen. I figur 20 har  $(k_{tot})_{u=10}$  inprickats som funktion av ythårdhetsmättet  $C_y$  ("graden av konditionering"). Det visar sig, att två grupper av försöksmaterial synes föreligga, vilkas deformationer är signifikant skilda från varandra med riskfaktorn  $p < 0,1$  %.

Ett försöksvärde (F27) ligger något under den för grupp 2 gällande kurvan på grund av en högre våttemperatur under torkningen (55 °C mot 50 °C vid övriga försök). Följande ansatser ger extremt hög korrelationskoefficient ( $r = 0,9999$  respektive  $0,9994$ ) med försöksvärdena:

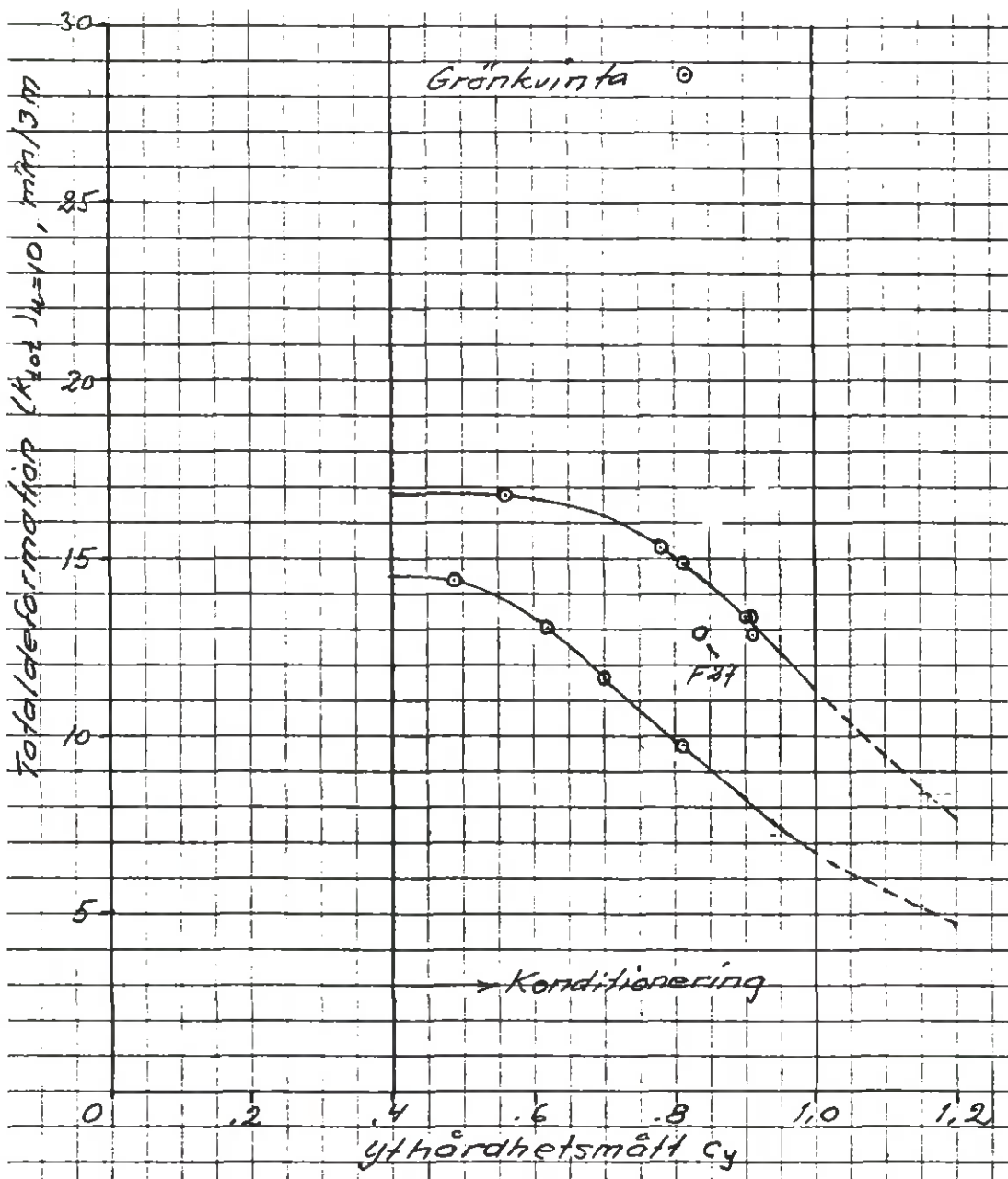
Tabell 4. Medelvärden av axiella deformationer.

Försök	$t_v$ °C	$k_s$	$k_f$ - mm/3 m -	$k_k$	$u_m$ %	$(k_{tot})_{u=10}$ mm/3 m	$C_y$
F 9 x)	50	24,1	3,0	1,5	10,0	28,6	0,82
F27	55	8,58	2,13	3,28	8,8	12,95	0,84
F28	50	10,81	1,52	3,77	10,6	16,77	0,56
F29	50	8,27	2,54	3,59	10,0	14,40	0,49
F30	50	7,62	1,26	1,67	8,8	9,77	0,81
F31	50	9,09	2,95	1,78	8,85	12,84	0,91
F43	50	6,21	4,76	3,42	10,9	15,31	0,78
F44	50	7,78	3,18	2,89	9,5	13,40	0,90
F46	50	9,39	1,84	2,08	7,7	11,54	0,70
F47	50	9,42	2,88	2,69	7,7	13,00	0,62
F61	50	12,37	2,28	2,06	8,1	14,83	0,81
F62	50	11,39	1,96	2,11	7,55	13,29	0,91

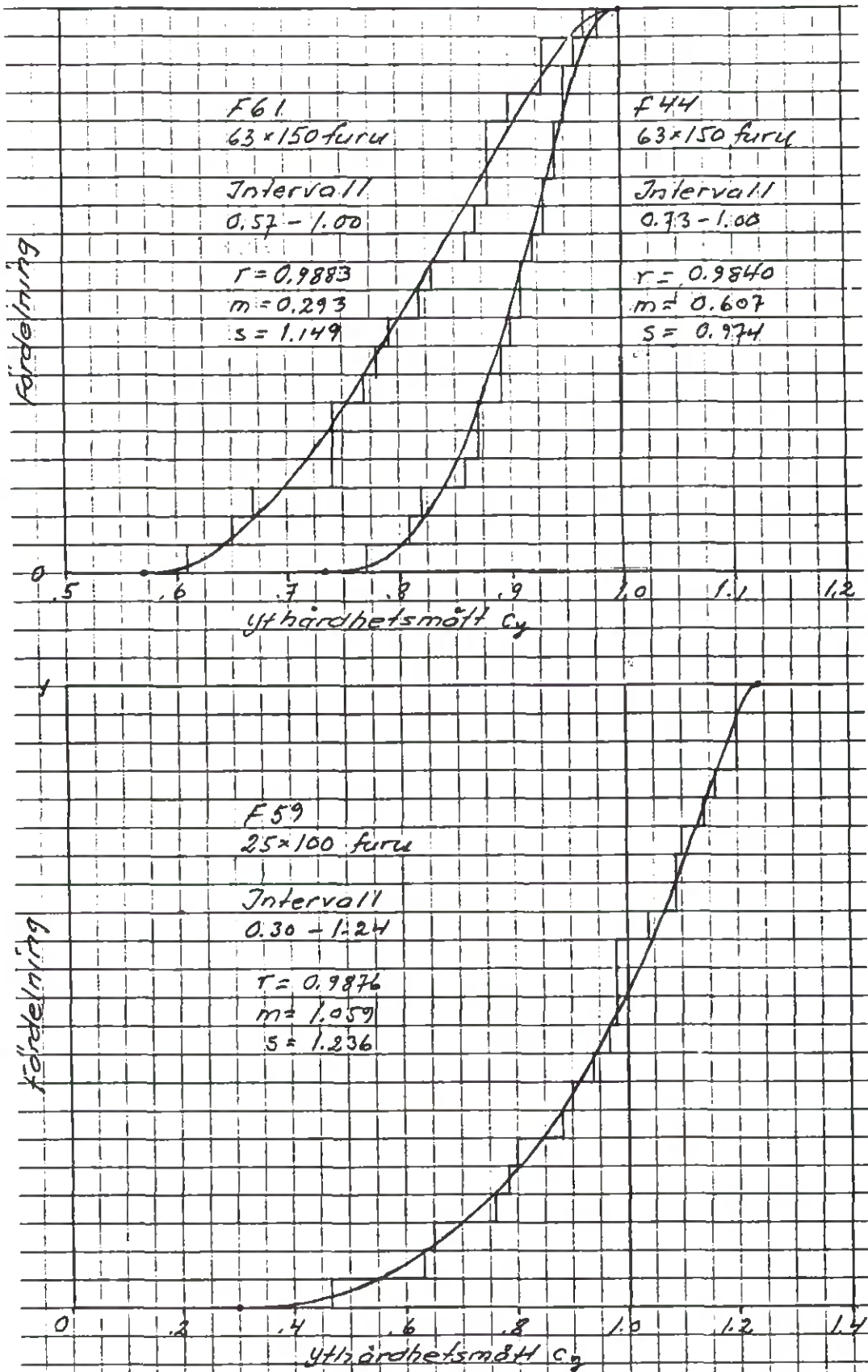
x) 63 x 125 grönkvinta



Figur 19. Sammanhang mellan fuktgradient och ythårdhet.



Figur 20. Den totala axiella deformationens reduktion genom konditionering vid 68 °C torr temperatur.



Figur 21. Exempel på fördelningar av ythårhetsmättet  $C_y$ .

$$\text{Grupp 1} \quad (k_{\text{tot}})_{u=10} = 14.5 \cdot \Phi\left(-\frac{\ln(C_y - 0.4) + 0.56}{0.77}\right)$$

$$\text{Grupp 2} \quad (k_{\text{tot}})_{u=10} = 16.8 \cdot \Phi\left(-\frac{\ln(C_y - 0.4) + 0.28}{0.51}\right)$$

$\Phi$  = normalfördelningsfunktionen

Deformationen minskas till hälften vid  $C_y = 0,97$  för grupp 1 och vid  $C_y = 1,16$  för grupp 2 (omvänd ythårdhet). Om gruppindelningen slopas, får man dock inget samband mellan deformation och ythårdhet.

Ett försök (F9) utfördes med grönkvinta, som visar ungefär dubbelt så stor deformation som övrigt material.

De ovan undersökta parametrarna hänför sig alla till det aritmetiska medelvärdet av respektive storhet. Som nämnts är spridningen också av betydelse. Den fördelningsfunktion som karakteriserar spridningen är i samtliga fall av den "biologiska" typen, d v s en logaritmisk normalfördelning mellan ett undre och ett övre gränsvärde. Detta innebär att storheten

$$\ln \frac{x - x_0}{x_1 - x}$$

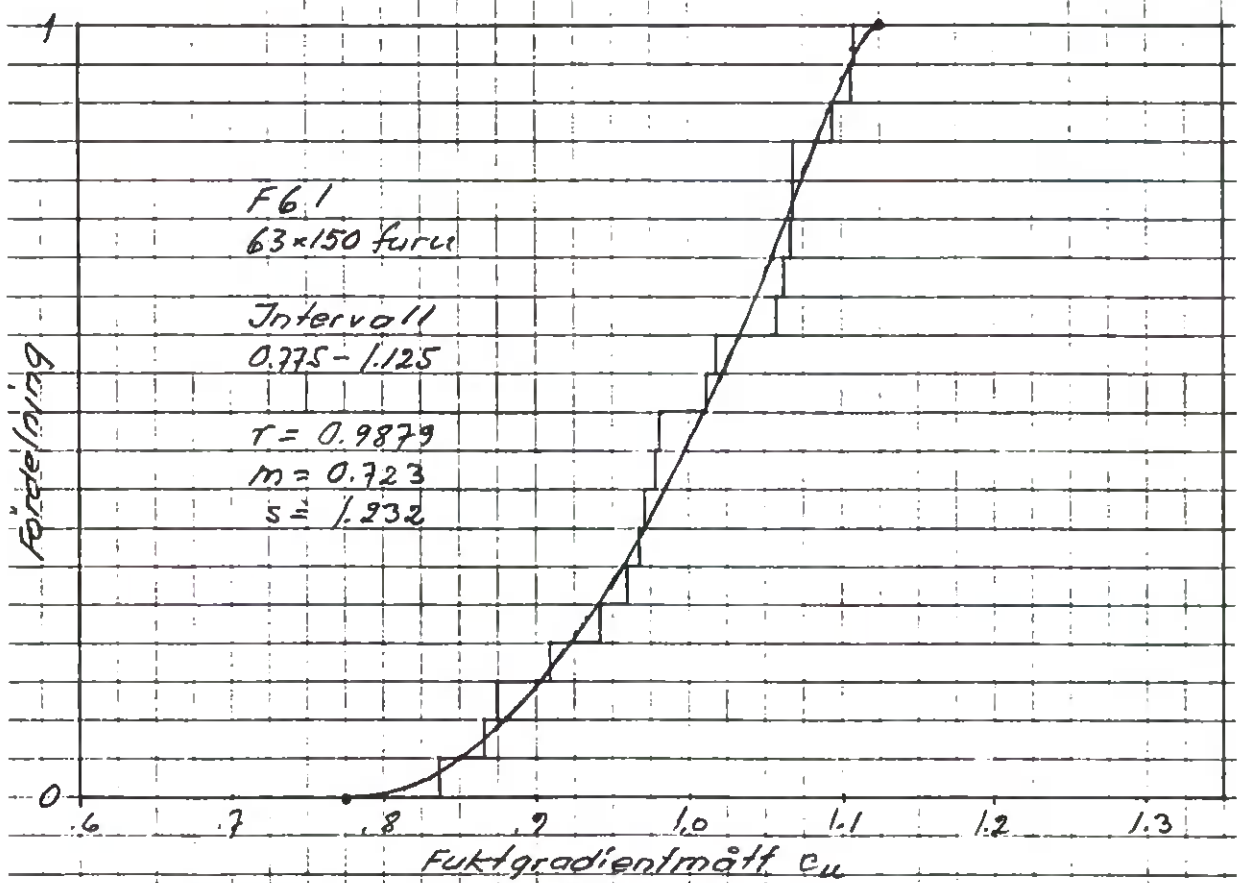
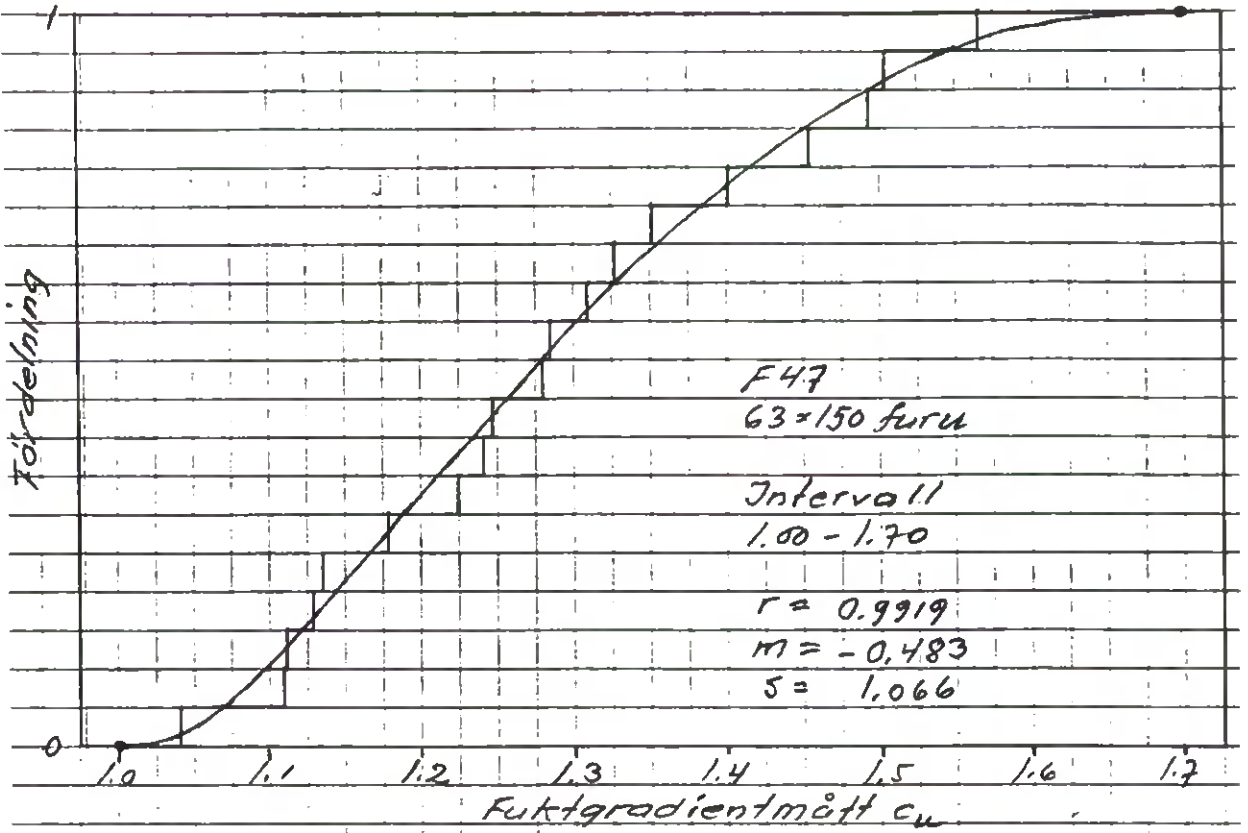
är normalfördelad inom sitt definitionsområde mellan  $x_0$  och  $x_1$ . En sådan fördelning är troligen generellt gällande för träets alla egenskaper. Vid liten spridning  $s$  och ett mot medelvärdet  $m$  svarande  $x$ -värde, som inte ligger alltför nära något av gränsvärdena  $x_1$  och  $x_2$  skiljer sig fördelningen obetydligt från en linjär normalfördelning.

Figur 21 visar några fördelningar av ythårdhetsparametern  $C_y$ . Den översta figuren gäller centrumvirke. Bägge fördelningarnas övre gränsvärde är  $C_y = 1$  (ingen ythårdhet). Båda dessa fördelningar är tillfredsställande enligt TRADAs klassificering. Den undre figuren visar fördelningen av  $C_y$  för sidvirke. Denna fördelning är otillfredsställande och visar en variation i hela området mellan svår ythårdhet och svår omvänd ythårdhet. Den konventionella metodiken för konditionering synes därför vara tvivelaktig när det gäller bräder av sidvirke. Fördelningens övre gränsvärde är inte tillräckligt stabilt.

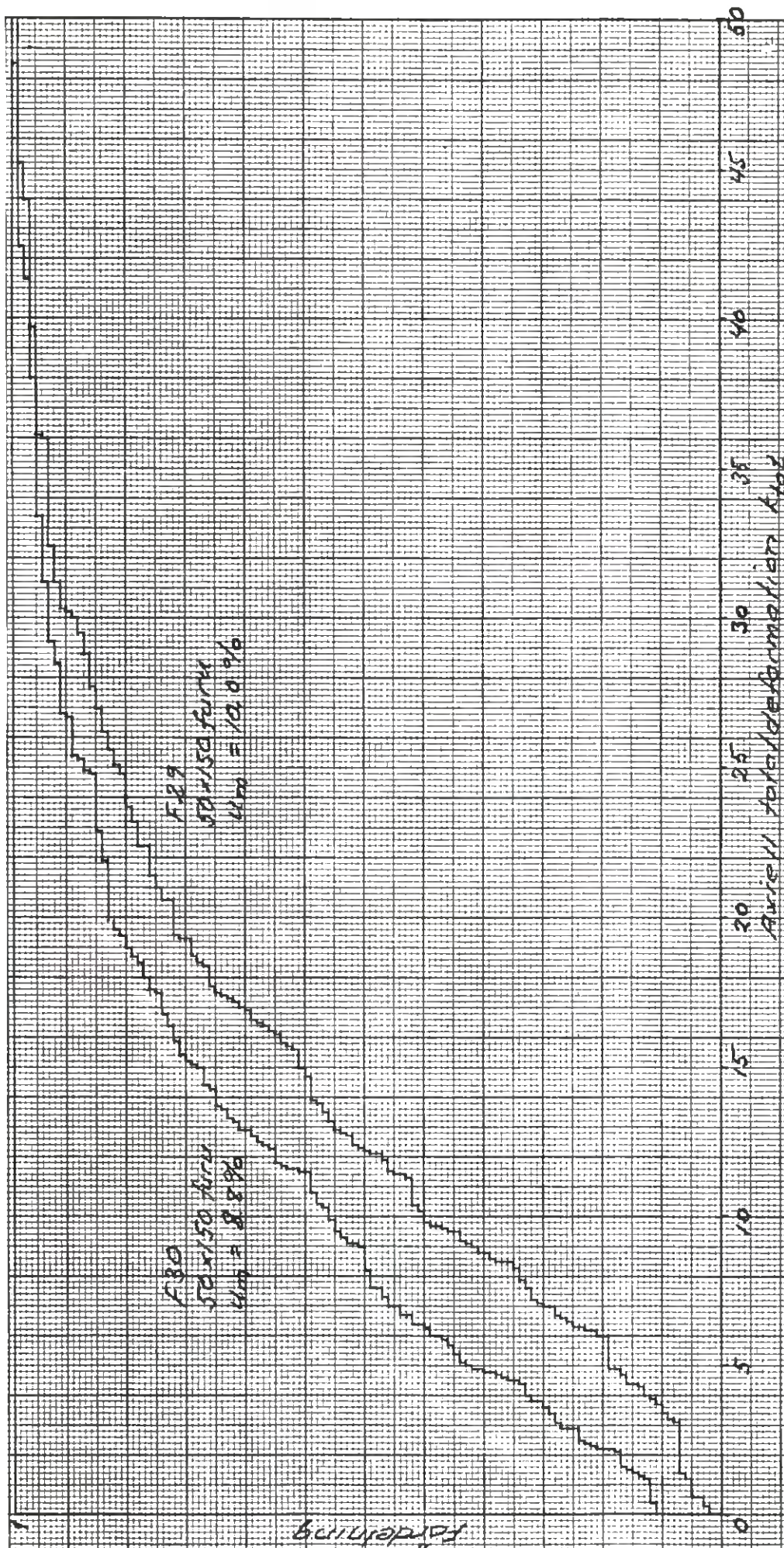
Figur 22 visar ett par exempel på fördelningen av fuktgradientmättet  $C_u$ , båda efter torkning enligt modell M2. Den övre fördelningen svarar mot en ofullständig konditionering ( $C_y = 0,62$ ) medan den undre fördelningen vid  $C_y = 0,81$  visar en ganska liten spridning kring medelvärdet ( $C_y = 1,0$ ).

I figur 23 har inritats två fördelningar av den axiella totaldeformationen  $k_{\text{tot}}$  (mm/3 m). Fördelningarna har samma karaktär som sprickarea-fördelningen /1/ med en utpräglad "svans" mot stora deformationer.

Sammanfattningsvis kan konstateras, att centrumvirke av furu låter sig konditioneras relativt tillfredsställande, varvid bästa fuktkvotsutjämning uppnås efter torkning enligt modell M2. Konditioneringstiden låter sig sannolikt tillfredsställande beräknas enligt (30). Konditionering av bräder av sidvirke är problematisk.



Figur 22. Exempel på fördelning av fuktgradientmättet  $c_u$ .

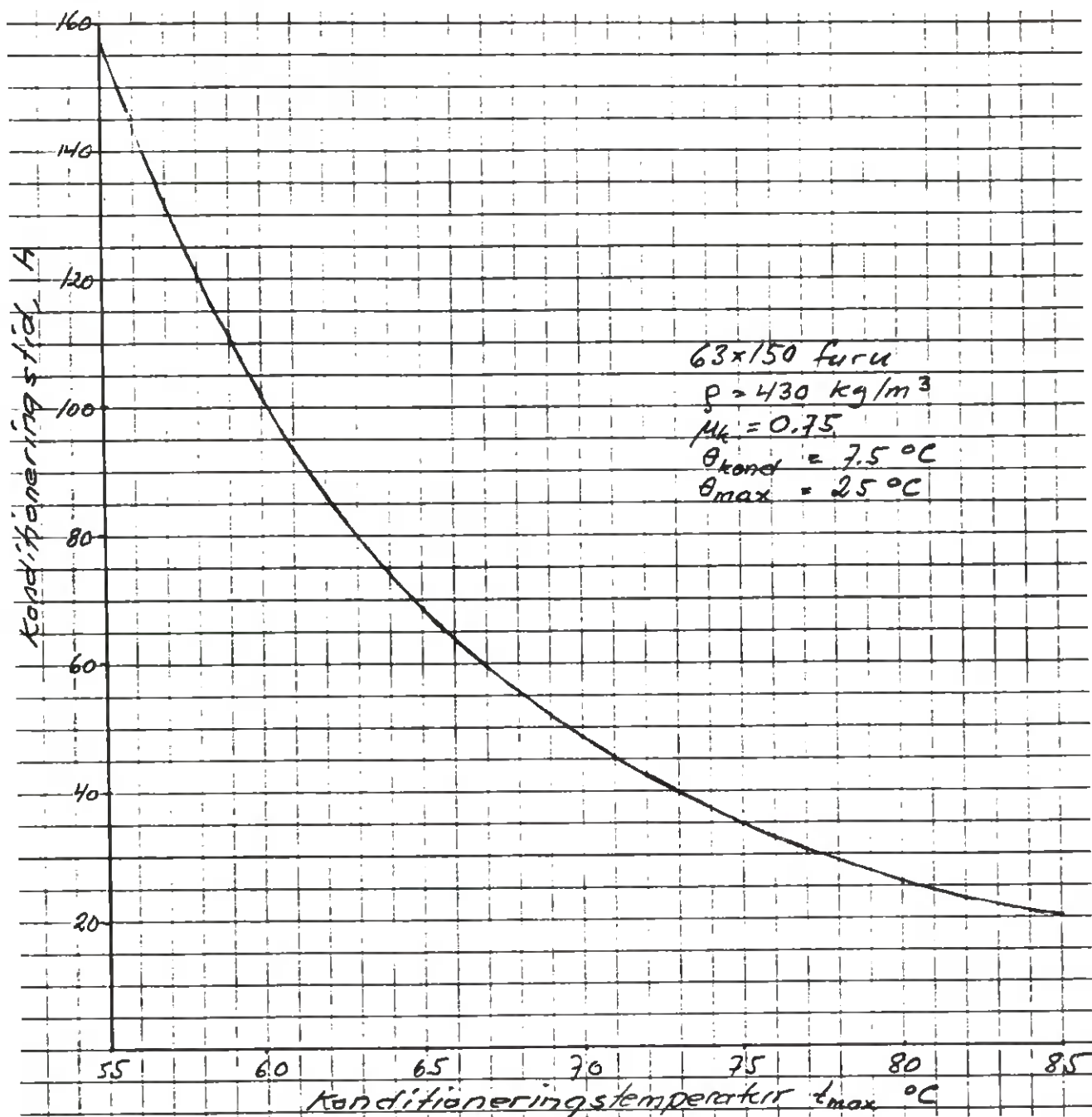


Figur 23. Exempel på fördelning av den axiella totaldeformationen  $K_{tot}$ , mm/3 m.

Tidsvinsten genom konditionering vid högsta möjliga temperatur synes vara avsevärd. Figur 24 visar erforderlig konditioneringstid för 63 x 150 furu- virke enligt (30). Konditioneringstiden blir cirka 8 ggr längre vid 55 °C än vid 85 °C. Experimentell verifiering av krypningsfaktorn  $1-F_{tmax}$  är dock ännu bristfällig.

Ovanstående resultat har tagits fram vid försök, som primärt varit inriktade på att utvidga torkningsmodellen till lägre fuktkvotsnivåer än skeppningstorrt. Försöken har därvid blivit av en relativt tillfällig natur vad avser konditioneringen. Man kan förvänta sig, att en mer systematiskt upplagd försökserie med avseende på konditioneringen förutom en önskvärd kontroll av här framtagna resultat även ska kunna ge underlag för en förbättrad konditioneringsteknik.

Troligen sker en viss förbättring i spridningen om konditioneringen föregås av en fuktutjämningsperiod. Härutöver kan man med dagens möjligheter till precisionsstyrning av torkningsklimatet tänka sig ett visst med tiden varierande konditioneringsschema (i stället för konstant psykrometerskillnad), som slutar med en psykrometerskillnad, som motsvarar den önskade slutfuktkvoten som jämviktsfuktkvot. Av speciellt intresse vore att studera, vilka möjligheter som finns att ytterligare reducera de axiella deformationerna. Ovannämnda funktionssamband  $f(k_s, k_f, k_k) = 0$  bör därvid härledas och en för referenslängden  $L$  invariant deformationsparameter definieras.



Figur 24. Beräknad konditioneringstid till ythårheten  $C_y = 1$  vid slutfuktkvoten  $u_m = 8 \%$  för olika konditioneringstemperaturer  $t_{\text{max}}$ .

## APPENDIX 1

Formelsammanställning för torkningsmodellerna M1 och M2 med konditionering. Metodik för val av torkningsparametrar.

Beteckningar

$u$	=	Fuktkvot (kg/kg)
$w$	=	$u/0,25$ = Fukttal (-)
$w_m$	=	Medelfukttal (-)
$w_{mok}^*$	=	Medelfukttal i nyavverkat virke, kärnved (-)
$w_{mos}^*$	=	Medelfukttal i nyavverkat virke, splintved (-)
$w_s$	=	Ytfukttal (-)
$(\partial w/\partial y)_s$	=	Fukttalsgradient i virkesytan (-)
$w_e$	=	Jämviktsfukttal (-)
$\tau$	=	Torkningstid (h)
$\tau_k$	=	Karakteristisk torkningstid (h)
$\tau_1$	=	Tid då $w_s = 1$ (h)
$\tau_2$	=	Tid då spänningsovändning sker i ytan (h)
$\beta$	=	Intensitetsparameter (rad.)
$\delta_1$	=	Halva nominella virkestjockleken (m)
$\delta_2$	=	Halva nominella virkesbredden (m)
$\rho$	=	Träets densitet (kg torrsvikt/m <sup>3</sup> rå volym)
$t_v$	=	Våttemperatur (°C)
$\theta$	=	$t-t_v$ = psykrometerskillnad (°C)
$\theta_k$	=	Karakteristisk psykrometerskillnad (°C)
$\theta_{max}$	=	Konstant i torkningens slutskede (°C)
$a^1$	=	Diffusivitet (m <sup>2</sup> /s)
$n$	=	Diffusivitetsnivå (-)
$\mu_k$	=	Kärnvedsandel (-)
$r$	=	Vattens ångbildningsvärme (J/kg)
$\alpha$	=	Värmeövergångstal (W/m <sup>2</sup> , °C)
$v$	=	Lufthastighet i strömlanrummen (m/s)
$d_s$	=	Strötjocklek (mm)
$L$	=	Blåsdjup genom virkesstaplarna (m)

Beteckningar (forts.)

$\tau_{\text{kond}}$	=	Konditioneringstid (h)
$a_{\text{kond}}^1$	=	Diffusivitet under konditionering (m <sup>2</sup> /s)
$u_m^*$	=	Önskad slutfuktkvot (%)
$t_{\text{kond}}$	=	Torr temperatur under konditionering (°C)
$\theta_{\text{kond}}$	=	Psykrometerskillnad under konditionering (°C)

Val av intensitetsparameter  $\beta$ 

Styrning kan ske alternativt på kärnans fuktkvot, på splintens fuktkvot eller på ett vägt medelvärde kärna-splint. För furu och gran styrs klimatet på splintens fuktkvot till tiden  $\tau_2$ .  $w_{m0}^*$  är det genomsnittliga fukttalet i nyavverkat timmer för kärnan, splinten respektive kärna-splint beroende på vilket man styr efter. För amerikanska träslag, se tabell 1a och 2a.

Först beräknas  $\beta$ -värdet för virkestjockleken noll:

$$\left(\frac{\text{tg}\beta}{\beta}\right)_0 = 1 + k \cdot w_{m0}^* \quad \begin{array}{ll} \beta\text{-grupp 1} & k = 0,23 \\ 2 & 0,33 \\ 3 & 0,43 \\ 4 & 0,89 \end{array}$$

Furu  $w_{m0}^* = 5,2$  ( $u_{m0}^* = 130$  %)

$\beta$ -grupp 3,  $(\text{tg}\beta/\beta)_0 = 3,236$

o

Gran  $w_{m0}^* = 6,0$  ( $u_{m0}^* = 150$  %)

$\beta$ -grupp 3,  $(\text{tg}\beta/\beta)_0 = 3,580$

För torkning av sidvirke av furu, där risk för kvisturfall föreligger, använd  $\beta$ -grupp 2:

$$(\text{tg}\beta/\beta)_0 = 2,716$$

För olika nominella virkestjocklekar  $\delta_1$  (m) erhålles det  $\beta$ -värde, som ska användas för torkningsschemat enligt

$$\left(\frac{\text{tg}\beta}{\beta}\right)_{\delta_1} = 1 + \left[\left(\frac{\text{tg}\beta}{\beta}\right)_0 - 1\right] \cdot e^{-\left(\frac{\delta_1}{0,055}\right)^2}$$

Val av våttemperatur  $t_v$

$$\frac{t_v}{t_o} = 1 + \frac{1090}{e} / \left(\frac{\text{tg}\beta}{\beta}\right)_{\delta_1}$$

$t_v$ -grupp 1	$t_o = 18 - \underline{19} - 20$
2	20 - <u>22</u> - 24
3	24 - <u>27</u> - 30

För amerikanska träslag, se tabell 1a och 2a. För furu och gran  $t_v$ -grupp 3. För torkning av sidvirke av furu, där risk för kvisturfall föreligger, använd  $t_v$ -grupp 1.

Torkningsmodeller M1 och M2

$$w_m = w_{m0} \sum_{v=1}^3 C_v \cdot \frac{\sin\beta v}{\beta v} e^{-v^2 \frac{r}{r_k}}$$

$$w_s = w_{m0} \sum_{v=1}^3 C_v \cdot \cos\beta v e^{-v^2 \frac{r}{r_k}}$$

$$-\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_s = w_{m0} \sum_{v=1}^3 C_v \cdot v\beta \sin v\beta \cdot e^{-v^2 \frac{r}{r_k}}$$

$$\theta = \theta_k \left(-\frac{\partial w}{\partial y}\right)_s \quad \text{för } w_s \geq 1$$

$$\theta = \theta_k \left(-\frac{\partial w}{\partial y}\right)_s + 5\left(\frac{1}{w_s - \Delta_w} - 1\right) \quad \text{för } w_s < 1$$

(A)

$$C_3 = \frac{3}{4} \frac{2 + \cos\beta - \frac{\beta}{\sin\beta} (1 + 2 \cos\beta)}{(1 - \cos\beta) \cdot \sin^2\beta}$$

$$C_2 = -\frac{1 + 4C_3 \cos\beta (1 + \cos\beta)}{1 + 2 \cos\beta}$$

$$C_1 = 1 - C_2 - C_3$$

$$r_k = \frac{1}{a} \left(\frac{\delta_1}{\beta}\right)^2 \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \frac{1}{3600}$$

$$\beta = (\beta)_{\delta_1}$$

$$\theta_k = \frac{0,25 \frac{a}{\alpha \delta_1} \text{ gr}}{\alpha \delta_1}, \quad r = 2,4 \cdot 10^6, \quad \alpha = 8 \cdot v^{0,67}$$

$$\underline{M1}: \quad \Delta w = 0$$

$$\underline{M2}: \quad \Delta w = \frac{1 - e^{-9(\text{tg}\beta/\beta - 1)^3}}{16 w_s (1 - w_s)} \cdot e^{-\frac{1}{1,28} (\ln \frac{w_s}{1-w_s} - m)^2}$$

$$m = 0 \text{ för lövträ}$$

$$m = 0,4 \text{ för barrträ}$$

Vid torkning av virke från nyavverkat timmer är  $w_{m0} = w_{m0}^*$ . Vid vattenlagrat respektive förtorkat virke är  $w_{m0} > w_{m0}^*$ .

Diffusiviteten  $a^1$  beräknas enligt sambandet

$$a^1 = \frac{140}{e} \cdot F_w \cdot F_{\mu_k} \cdot e^{\beta F_t F_\delta + t/33,4} \cdot 10^{-10}$$

$$F_t = \theta \left( \frac{70,6 - t}{21,6} \right), \quad \theta(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-x^2/2} dx$$

$$F_\delta = \theta \left( 2,4 \left( 1 - \frac{0,015}{\delta_1} \right) \right)$$

$$F_{\mu_k} = \mu_k e^{0,26n_k} + (1 - \mu_k) e^{0,26n_s}$$

$$F_w = 1 - (1 - w_m)^2$$

$$t_{\text{trä}} = t_{\text{max}} - \theta_{\text{max}} (w_{m2} - w_e), \quad w_e = \frac{1}{1 + \theta_{\text{max}}/5}$$

Diffusivitetsnivån  $n$  för amerikanska träslag se tabell 1a och 2a. För furu och gran:

Modell	M1	M2
Splintved $n_s =$	6	7
Kärnved $n_k =$	4	5

Den tidpunkt då virkesytan når fibermättnadsfuktkvoten ( $w_s = 1$ ) betecknas med  $\tau_1$  och den tidpunkt, då spänningsovändning antages ske i virkesytan, betecknas med  $\tau_2$ . För barrträ antages generellt att medelfuktkvoten då är  $w_{m2} = 0,6$  ( $u_m = 215\%$ ). För lövträ antages att  $\tau_2$  inträffar då  $\theta$  når  $\theta_{\text{max}} = 28$  °C enligt modellen (A).

För  $\tau < \tau_2$  sätts  $t = t_v$ ,  $F_w = 1$  i formeln för  $a^1$ . För  $\tau > \tau_2$  sätts  $\beta F_t F_\delta = 0$ ,  $t = t_{\text{trä}}$  och  $F_w = 1 - (1 - w_{m2})^2$ .  $F_{\mu_k}$  beräknas i beroende av om kärnved ( $\mu_k = 1$ ), splintved ( $\mu_k = 0$ ) eller medelvärde avses. Lövträ och många barrträarter styrs på kärnvedens fuktkvot ( $\mu_k = 1$ ). Svensk furu och gran styrs på splintvedens fuktkvot ( $\mu_k = 0$ ) inom giltighetsområdet för modellen (A).

Modellen (A) gäller tills tiden  $\tau_2$  uppnåtts. Vid denna tidpunkt är alltså psykrometerskillnaden för lövträ  $\theta_{\max} = 28$  °C, som sedan bibehålles konstant till torkningens slut. Psykrometerskillnaden för barrträ ökas vid tiden  $\tau_2$  från det värde modellen ger till  $\theta_{\max} = 28$  °C och bibehålles konstant till torkningens slut.

Under sluttorkningsperioden med  $\theta = \theta_{\max}$  gäller följande modell för fukt-kvotens tidsberoende

$$\tau = \tau_2 + \tau_k \cdot \ln \frac{\omega_{m2} - \omega_e}{\omega_m - \omega_e} \quad (B)$$

$\omega_{m2}$  är medelfukttalet vid  $\tau = \tau_2$ ,  $\omega_e$  är jämviktsfukttalet vid  $\theta = \theta_{\max}$ , och  $\tau_k$  beräknas med a enligt ovan.

För furu och gran är enligt torkningsförsöken kärnans och splintens fukt-kvoter ungefär lika vid tiden  $\tau_2$ . För den fortsatta torkningen beräknas lämpligen medelfuktkvoten kärna-splint (med motsvarande värde på  $F_{\mu_k}$ ) enligt (B).

I tidsintervallet  $0 - \tau_2$  kan för furu och gran, som då styrs på splint-vedens fuktkvot enligt modell (A), tidsförloppet för medelfuktkvoten kärna-splint  $\omega_m$  enligt torkningsförsöken uppskattas på följande sätt.

I tidsintervallet  $0 < \tau < \tau_1$  är

$$\frac{\bar{\omega}_m}{\omega_{ms}} = \frac{\mu_k \cdot u_{mo,k}^* + (1 - \mu_k) \cdot u_{mo,s}^*}{u_{mo,s}^*}$$

Furu  $u_{mo,k}^* = 33, u_{mo,s}^* = 130, u_{mo,k}^*/u_{mo,s}^* = 0,254$

Gran  $38 \quad 150 \quad 0,253$

eller för båda träslagen

$$\frac{\bar{\omega}_m}{\omega_{ms}} = 1 - 0,75 \cdot \mu_k$$

I tidsintervallet  $\tau_1 < \tau < \tau_2$  är

$$\tau = \tau_1 + (\tau_2 - \tau_1) \frac{\ln(\bar{\omega}_{m1}/\bar{\omega}_m)}{\ln(\bar{\omega}_{m1}/0,6)}$$

där  $\bar{\omega}_{m1} = \omega_{m1s} (1 - 0,75 \mu_k)$

### Torkanläggningens inverkan på torkningsschemat

Lufthastigheten  $v$  i strömmellanrummen inverkar genom värmeövergångstalet  $\alpha$  på den karakteristiska psykrometerskillnaden  $\theta_k$ . Lufthastigheten bör mätas separat för olika virkestjocklekar.

Det ovan angivna värdet av  $\theta_k$  måste korrigeras för torkluftens temperaturfall genom virkestaplarna. Korrigerat värde  $\theta_k$  kan uppskattas enligt följande, varvid förutsättes, att reversering av cirkulationsluften alltid tillämpas.

1. Om styrning av torkluftens temperatur sker endast på inblåsningssidan av staplarna

$$\theta_k^1/\theta_k = \frac{\gamma \cdot L}{1 - e^{-\gamma \cdot L}}$$

2. Om styrning sker på medelvärdet vid in- och utströmning

$$\theta_k^1/\theta_k = \frac{\gamma \cdot L}{2} \cdot \frac{1 + e^{-\gamma L}}{1 - e^{-\gamma L}}$$

3. Om styrning sker av temperaturen vid halva blåsdjupet

$$\theta_k^1/\theta_k = \frac{\gamma L \cdot e^{-\gamma L/2}}{1 - e^{-\gamma L}}$$

$$\gamma = \frac{16}{d_s} \cdot v^{-0,33} \cdot (1 - 0,75\mu_k)$$

$L$  = blåsdjup (m)

$d_s$  = strötjocklek (mm)

$v$  = lufthastighet (m/s)

Torkluftens temperaturolikformighet = förhållandet mellan medelvärdet vid in- och utströmning och vid stapelmitt (påverkar utgående fuktkvotsspridningen) är

$$\frac{1}{2} \cdot e^{\frac{\gamma L}{2}} (1 + e^{-\gamma L})$$

Olikformigheten ökar med ökat blåsdjup, minskad lufthastighet, minskad strötjocklek och minskad kärnvedsandel.

Erforderliga parametrar som ingår i modellen

1. Den genomsnittliga råfuktkvoten  $u_m^*$  för träslaget ifråga, som bestämmer intensitetsparametern  $\beta$ .
2. Den ingående medelfuktkvoten  $u_{m0}$  om virket är vattenlagrat eller förtorkat.
3. Den genomsnittliga densiteten  $\rho$  för torkningssatsen.
4. Kärnvedsandelen  $\mu_k$ .
5. Virkets nominella tjocklek och bredd.
6. Lufthastigheten  $v$  i strömellanrummen för virkestjockleken ifråga (uppmätt värde).
7. Torkanläggningens blåsdjup  $L$  (sammanlagda djupet av virkesstaplarna i cirkulationsluftens riktning).
8. Strötjockleken.

Konditionering

$$\text{Önskad slutfuktkvot} = u_m^* \quad (\%)$$

$$\text{Fuktkvot efter torkning} = u_m^* - 1 \quad (\%)$$

$$\text{Jämviktfuktkvot i konditioneringsklimatet} = u_m^* + \Delta u \quad (\%)$$

$$\Delta u = 2 \text{ à } 3 \quad \% \text{ för barrträ}$$

$$\Delta u = 3 \text{ à } 4 \quad \% \text{ för lövträ}$$

Psykrometerskillnad under konditioneringen

$$\theta_{\text{kond}} = 5 \left( \frac{25}{u_m^* + \Delta u} - 1 \right) \quad (^\circ\text{C})$$

$$\text{Torr temperatur under konditioneringen} = t_{\text{kond}} \quad (^\circ\text{C})$$

Erforderlig konditioneringstid  $\tau_{\text{kond}}$  (h) erhålles ur

$$\frac{a_{\text{kond}}^1 \cdot \tau_{\text{kond}}}{\delta_1^2} (1 - F_{t_{\text{kond}}}) = 0.18 \cdot \frac{\theta_{\text{kond}}}{\theta_{\text{max}}} \cdot \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \frac{1}{3600}$$

$$a_{\text{kond}}^1 = \frac{140}{P} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{u_m^*}{25} \right)^2 \right] \cdot F_{\mu_k} \cdot e^{t_{\text{kond}}/33,4} \cdot 10^{-10}$$

$$F_{t_{\text{kond}}} = \emptyset \left( \frac{70,6 - t_{\text{kond}}}{21,6} \right)$$

$\emptyset_{\text{max}}$  = Psykrometerskillnad vid slutet av torkningen.

Beräkningsexempel

50 x 150 Furu	$(\text{tg}\beta/\beta)_0 = 3,236$
e = 430	
$\mu_k = 0,7$	
$u_{mo}^* = 130$	$(x\text{tg}\beta/\beta)_{\delta 1} = 1 + 2,236 e^{-\left(\frac{0,025}{0,055}\right)^2} = 2,819$
v = 3	
modell M1	$\beta = 1,305$
	$t_v = 27\left(1 + \frac{1090}{430}/2,819\right) = 51$
	$F_{t_v} = 0,1879 \quad F_{\delta} = 0,8315 \quad \beta F_{t_v} F_{\delta} = 0,8875$
	$C_3 = 0,2181$
	$C_2 = -0,8453$
	$C_1 = 1,6272$
	$w_{mo} = 5,2 \quad \alpha = 8 \cdot 3^{0,67} = 16,7$

$\tau = 0 - \tau_2$  splint.

$$a'_s = \frac{140}{430} e^{6,026 + 0,8875 + 51/33,4} \cdot 10^{-10} = 17,33 \cdot 10^{-10}$$

$$\theta_k = \frac{0,25 \cdot 17,33 \cdot 10^{-10} \cdot 430 \cdot 2,4 \cdot 10^6}{0,025 \cdot 16,7} = 1,071$$

	$\tau/t_k$	$w_s$	$w_m$	$-(\partial w/\partial y)_s \cdot \theta_k$	$\theta$
	0	5,2	5,2	1,861	1,86
	0,1		5,0063	4,799	4,80
	0,2		4,7051	5,995	6,00
	0,4		4,0158	6,301	6,30
	0,6		3,3551	5,682	5,68
	0,8		2,7761	4,871	4,87
$\tau_1$	0,9053	1,0000	2,5072	4,447	4,45
	1,0	0,8870	2,2800	4,083	4,72
	1,2	0,7006	1,8773	3,386	5,52
	1,4	0,5621	1,5396	2,791	6,69
	1,6	0,4550	1,2617	2,293	8,28
	1,8	0,3702	1,0335	1,882	10,39
	2,0	0,3021	0,8464	1,542	13,09
	2,2	0,2468	0,6931	1,263	16,52
$\tau_2$	2,3443	0,2135	0,6000	1,094	19,51

$$\tau_k = \frac{1}{17,33 \cdot 10^{-10}} \left(\frac{0,025}{1,305}\right)^2 \cdot \frac{150}{200} \cdot \frac{1}{3600} = 44,12$$

$$\tau_1 = 39,94$$

$$\tau_2 = 103,43$$

$\tau > \tau_2$     Kärna-splint     $\theta = \theta_{\max} = 28$

$t = t_{\max}$

$t_{\text{trä}} = t_{\max} - 28 (0,6 - 0,152) = t_{\max} - 12,54$

$a'_{\text{ks}} = \frac{140}{430} [1 - (1-0,6)^2] \cdot (0,7e^{4 \cdot 0,26} + 0,3e^{6 \cdot 0,26}) e^{t_{\text{trä}}/33,4} \cdot 10^{-10}$   
 $= 0,9321 \cdot e^{t_{\text{trä}}/33,4} \cdot 10^{-10}$

1.  $t_{\max} = 51 + 28 = 79$  (oförändrat  $t_v$  under sluttorkningen)

$t_{\text{trä}} = 79 - 28 (0,6 - 0,152) = 66,46$

$a'_{\text{ks}} = 0,9321 e^{66,46/33,4} \cdot 10^{-10} = 6,82 \cdot 10^{-10}$

$\tau_k = \frac{1}{6,82 \cdot 10^{-10}} \cdot \left(\frac{0,025}{1,305}\right)^2 \cdot \frac{150}{200} \cdot \frac{1}{3600} = 112,1$

2.  $t_{\max} = 69$  (torkanläggningen tål inte högre temperatur)

$t_{\text{trä}} = 56,46$

$a'_{\text{ks}} = 5,05 \cdot 10^{-10}$

$\tau_k = 151,4$

$\tau = 103,43 + \tau_k \cdot \ln \frac{0,6 - 0,152}{\bar{w}_m - 0,152}$

$\bar{u}_m$	$\bar{w}_m$	1.	2.
		$\tau$	$\tau$
14	0,56	113,9	117,6
13	0,52	125,5	133,2
12	0,48	138,4	150,6
11	0,44	153,0	170,3
10	0,40	169,7	193,0
9	0,36	189,4	219,6
8	0,32	213,4	251,9
7	0,28	243,9	293,1

Den lägre temperaturen ger ca 2 dygn längre torkningstid till fuktkvoten 7 %.

$$\underline{\tau = 0 - \tau_1} \quad \text{Kärna-splint}$$

$$\bar{w}_m / w_{ms} = 1 - 0,75 \cdot 0,7 = 0,475$$

$$\bar{w}_{m0} = 0,475 \cdot 5,2 = 2,47, \quad \ln \bar{u}_{m0} = 4,123$$

$$\bar{w}_{m1} = 0,475 \cdot 2,5072 = 1,191, \quad \ln \bar{u}_{m1} = 3,394$$

$$\underline{\tau = \tau_1 - \tau_2} \quad \text{Kärna-splint}$$

$$\tau = \tau_1 + (\tau_2 - \tau_1) \cdot \frac{\ln(\bar{w}_{m1} / \bar{w}_m)}{\ln(\bar{w}_{m1} / 0,6)}$$

$$= 39,94 + \frac{63,55}{0,6856} \cdot \ln(1,191 / \bar{w}_m)$$

$$\bar{u}_m = 18, \quad \bar{w}_m = 0,72, \quad \tau = 86,5$$

Beräkningsexemplet åskådliggöres i fig. A1.



## APPENDIX 2

## PRÖVNING AV MODELLERNA M1 OCH M2 GENOM JÄMFÖRELSE MED TORKNINGSFÖRSÖK MED FURU. FÖRSLAG TILL KOMPLETTERANDE FÖRSÖKSTORKNINGAR

Provtorkningar

I figurerna A2 - A14 har medelfuktkvoter, bestämda genom vägning av virkespaketet i den mobila försökstorken, lagts in i  $\ln u_m - \tau$ -diagram, varvid utvärderade fuktkvoter utgörs av svarta punkter i diagrammen. Motsvarande modellvärden har ritats som heldragna (splintmodell) respektive streckade (kärna-splint-modell) tidsförlopp.

För samtliga försök gäller att torkningsschemat beräknats på basis av de preliminära diffusivitetensvärdena, medan modellen lagts in med de definitiva värdena, vilket ger en viss osäkerhet i bedömningen av fuktkvotsmodellens tillförlitlighet. För att prova hur stort fel som därvid begås, gjordes en kontrollsökning för försök F16, figur A2. Med det på basis av preliminär diffusivitet beräknade torkningsschemat som randvillkor beräknades fuktkvotsförloppet på basis av definitiv diffusivitet ( $a^1 = 15,82 \cdot 10^{-10}$  respektive  $17,58 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) med hjälp av en motsvarande datorlösning på samma sätt som använts i /10/. Det så beräknade fuktkvotsförloppet är i figur A2 inlagt som en streck-prickad linje nära intill den inritade modellen i tidsintervallet  $\tau_1 - \tau_2$ . Skillnaden i fuktkvotsförlopp till följd av en mindre ändring av torkningsschemat är oväsentlig.

I de försök, där modell M2 använts (figur A10 - A14), blir felet något större, emedan diffusivitetsnivån  $n$  visade sig öka med en enhet vid torkning enligt denna modell.

En jämförelse av det verkliga fuktkvotsförloppet med det i enlighet med Appendix 1 inlagda modellförloppet visar tillfredsställande överensstämmelse för de försök, där modell M1 (modell 3) använts (figur A2, A5, A7, A8). Figur A2 visar, att fuktkvotsförloppet närmar sig splintmodellen vid låg kärnvedsandel  $\mu_k$ . Försökstorkens våganordning har inte alltid fungerat tillfredsställande, vilket kan förklara en del av avvikelserna.

Avsikten med försök F28, figur A6, var att undersöka, om en mildare torkning än vad modell M1 föreskriver efter tiden  $\tau_1$  skulle kunna få konsekvensen mindre ythårdhet efter torkningen ("inbyggd konditionering"). Så blev dock inte fallet. Den modell som användes i detta försök var en modifierad modell 3, där fuktkvoten asymptotiskt närmar sig ett jämviktsvärde  $u_m = 6\%$  i stället för  $u_m = 0$ . Även i detta fall skär splintmodellen den experimentella fuktkvotskurvan vid tiden  $\tau_2$ , varefter fuktkvoten följer en kärna-splint-modell med spänningsfaktorn  $\beta F_t F_\delta = 0$ .

Försöken figur A10 - A14 utfördes enligt modell M2, varvid dock torkningsschemat beräknades med preliminära diffusivitetensvärden, varför de korrekta modellförloppen ligger något högre än inritade modellförlopp. Överensstämmelsen med de mätta fuktkvotsförloppen är tillfredsställande även för denna modell vid såväl låg som hög kärnvedsandel. I tidsintervallet  $0 - \tau_1$  har modellen inritats på basis av de preliminära diffusivitetensvärdena (förloppet enbart bestämt av värmeövergången till virkesytan).

I försök F60, figur A11, torkades 75 x 150 furu till 15 % fuktkvot, varvid sprickarean uppmättes till 2,75 % (reducerad till normaldensitet). Detta värde överensstämmer med det värde som erhålles vid torkning med modell M1 /1/ med samma  $\beta$ -värde och våttemperatur trots den cirka 40 h kortare torkningstiden. Kontrollförsök bör utföras med modellen beräknad med definitiva diffusivitetvärden under hela torkningen (något hårdare torkning, särskilt i intervallet  $0 - \tau_1$ ).

I försök F46, figur A9, användes ett preliminärt värde  $\Delta w_{\text{prel}}$  på fuktalsöverskottet, som var lägre än det definitiva värdet  $\Delta w_{\text{us}}$  (systematiseringen av amerikanska torkningsscheman ej färdig). Man ser av figuren, att ökningen av diffusivitetsnivån från  $n = 6$  till  $n = 7$  (splinten) då inträffade på ett senare stadium i torkningen, vid tiden  $\tau_1$  i stället för  $\tau_1$ .

Sammanfattningsvis kan konstateras, att överensstämmelsen mellan i enlighet med Appendix 1 beräknade förlopp av fuktkvoten och uppmätta förlopp preliminärt synes tillfredsställande för såväl modell M1 som modell M2. Dock bör kontrollförsök utföras med konsekvent användande av de definitiva diffusivitetvärdena och modellerna utformade enligt Appendix 1.

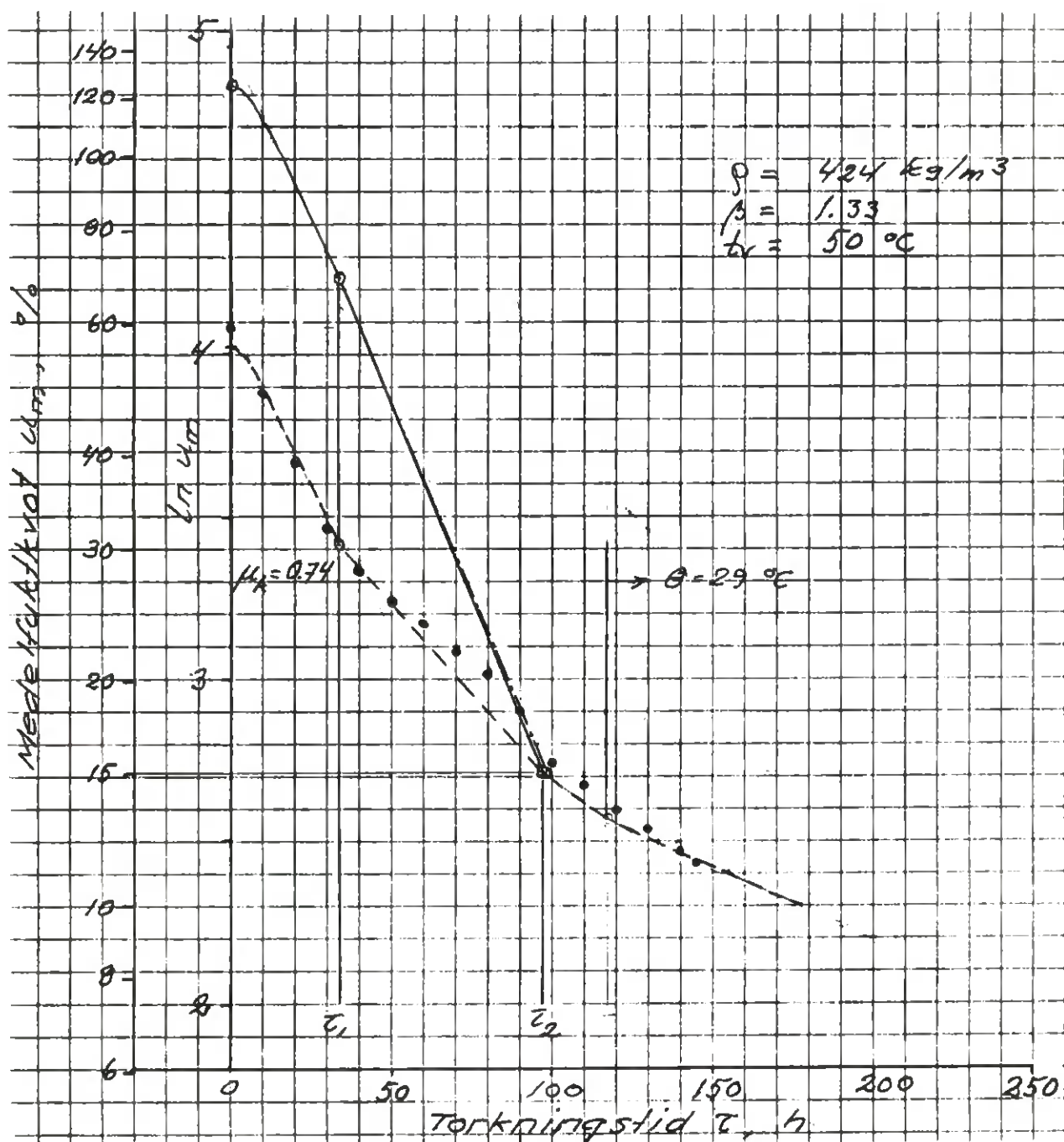
Torkningsförsök med andra träslag än furu och gran har ej utförts.

### Kontrollförsök

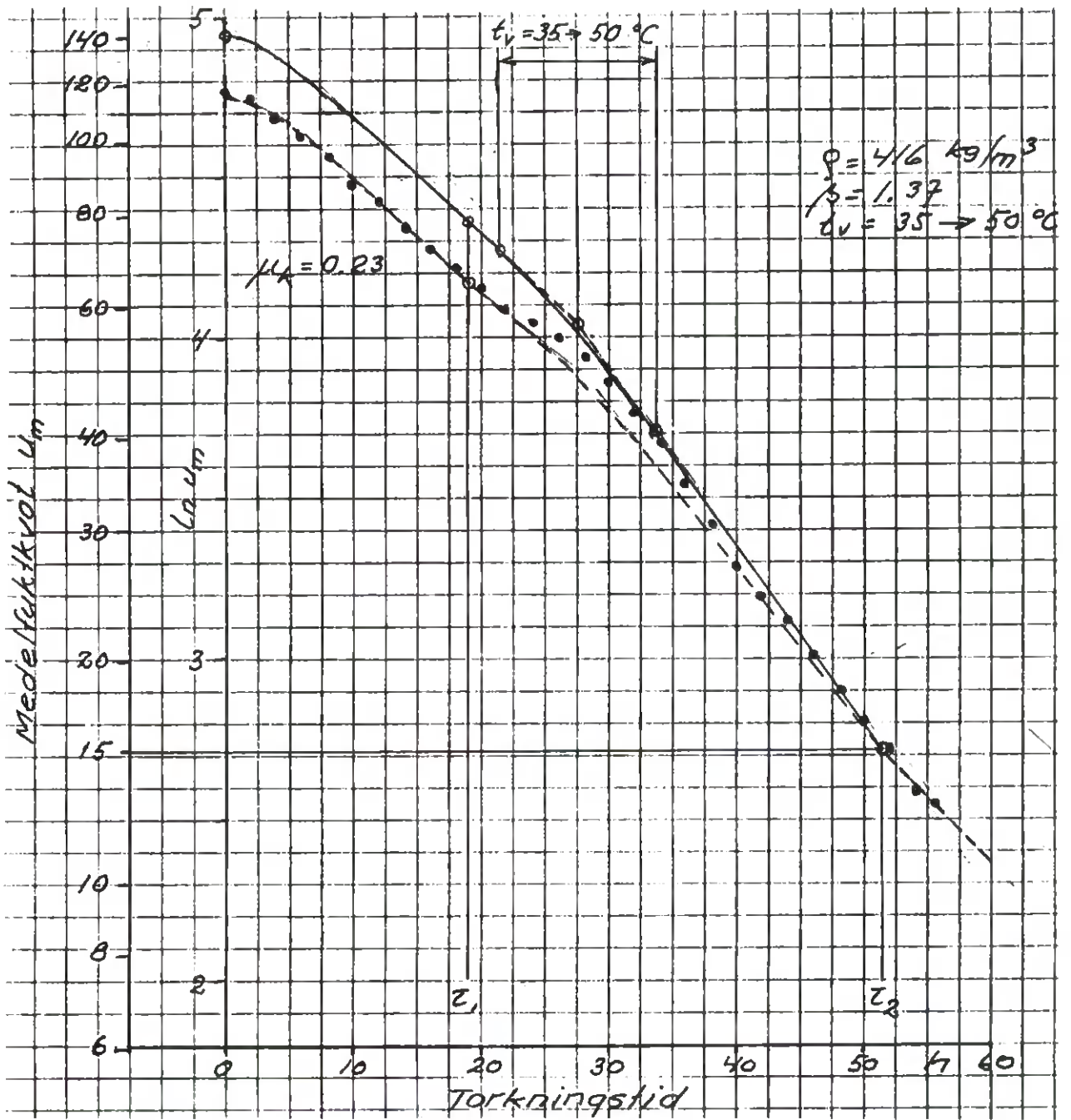
Följande kontrollförsök får anses önskvärda, varvid torkningsschema och fuktkvotsförlopp konsekvent beräknas i enlighet med Appendix 1.

1. Modell M2
  - a) 25 x 100 furu, torkas till 7 % fuktkvot
  - b) 50 x 150    "-                    - " -
  - c) 63 x 150    "-                    - " -
2. Jämförande försök, modellerna M1 och M2, med mätning av sprickarean  
75 x 150 furu torkas till 15 % fuktkvot. Minst två försök med vardera modellen
3. Torkning av 50 x 150 furu till 7 % fuktkvot med ingående medelfuktkvoten
  - a) cirka 18 %
  - b) cirka 30-35 %

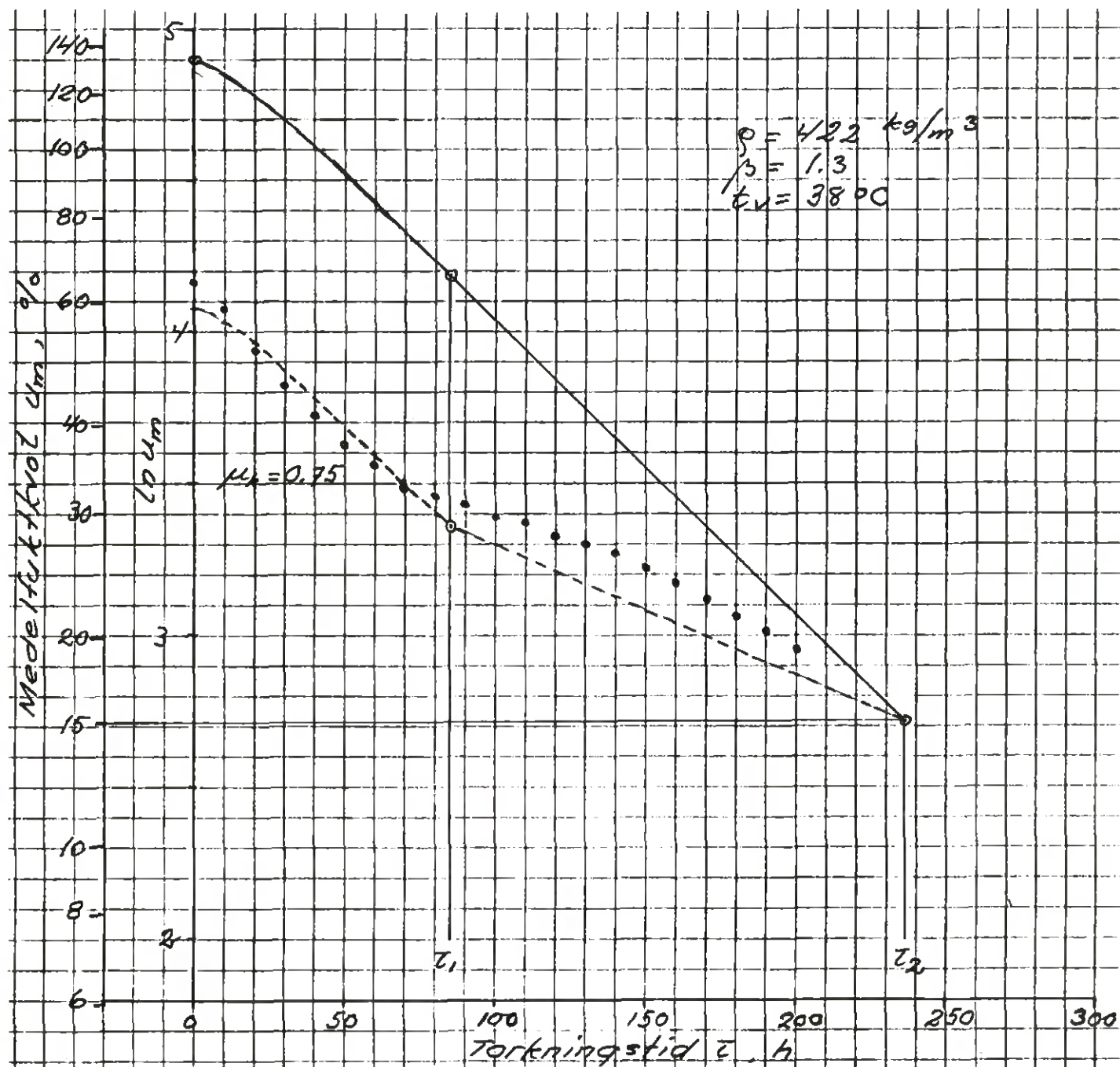
Torkningssatserna utgörs av virke från nyavverkat timmer och medeldensiteten för varje sats bör bestämmas innan torkningsschemat beräknas.



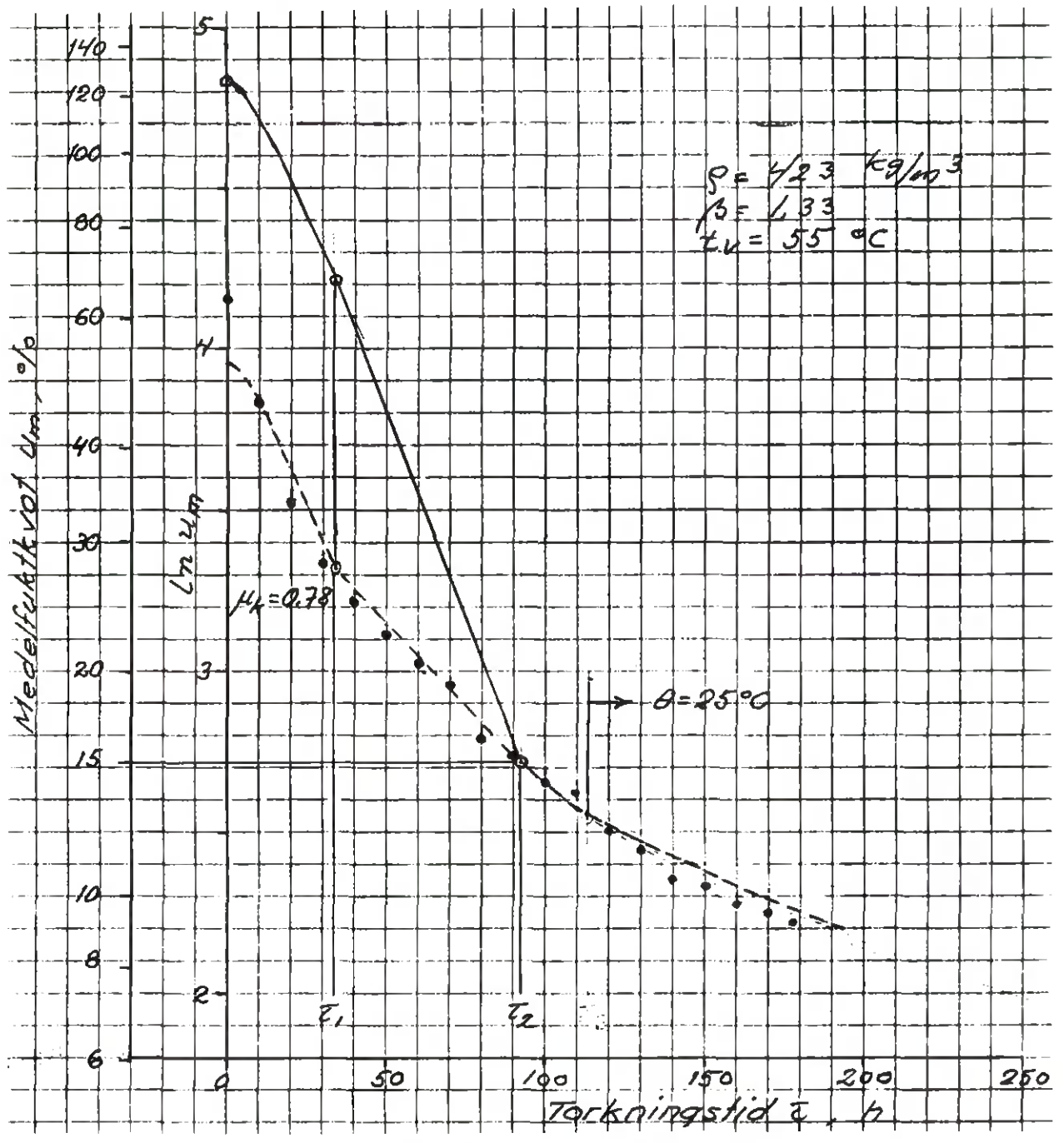
Figur A2. Försök F16, 50 x 150 furu.



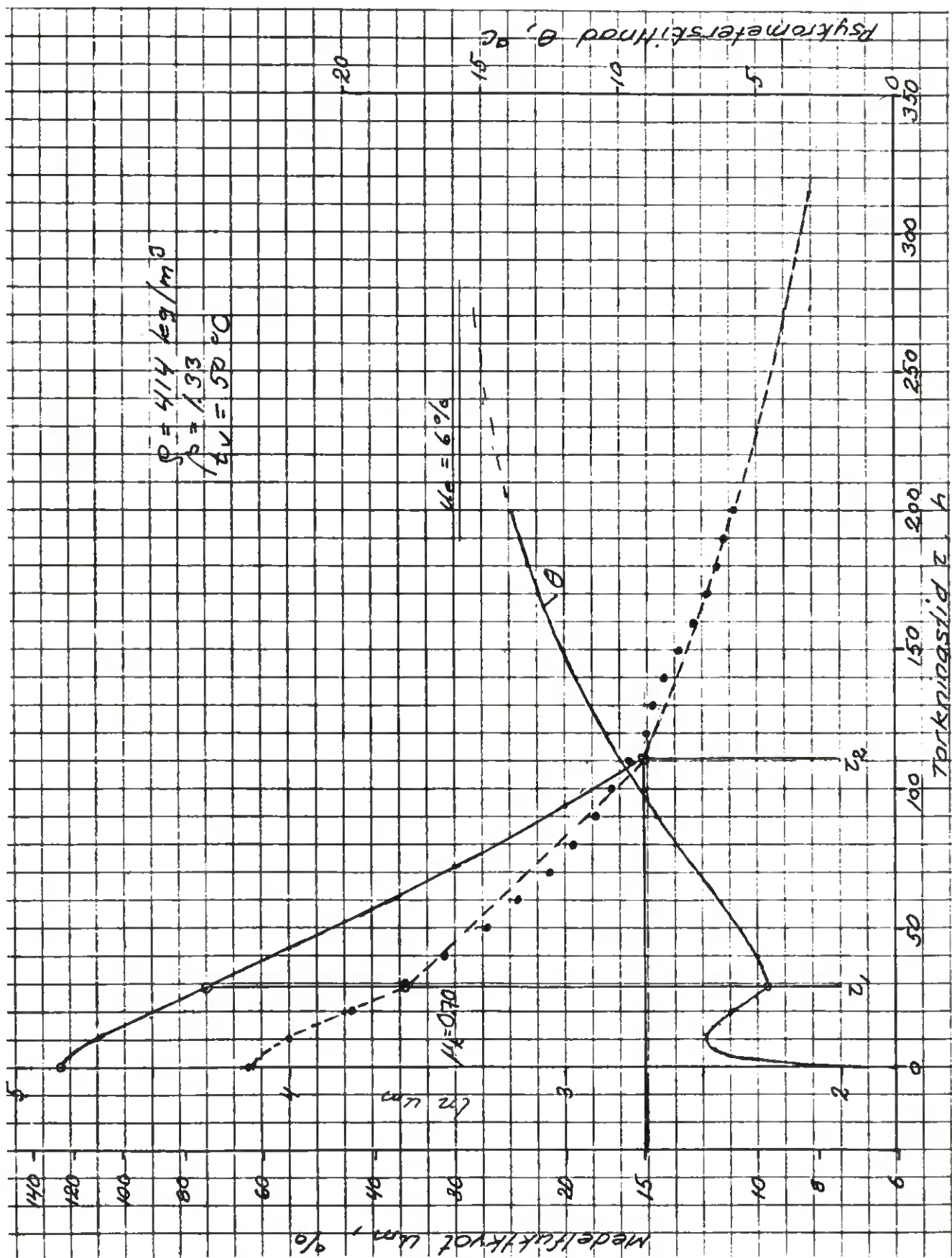
Figur A3. Försök F19, (22-25) x 125 furu.



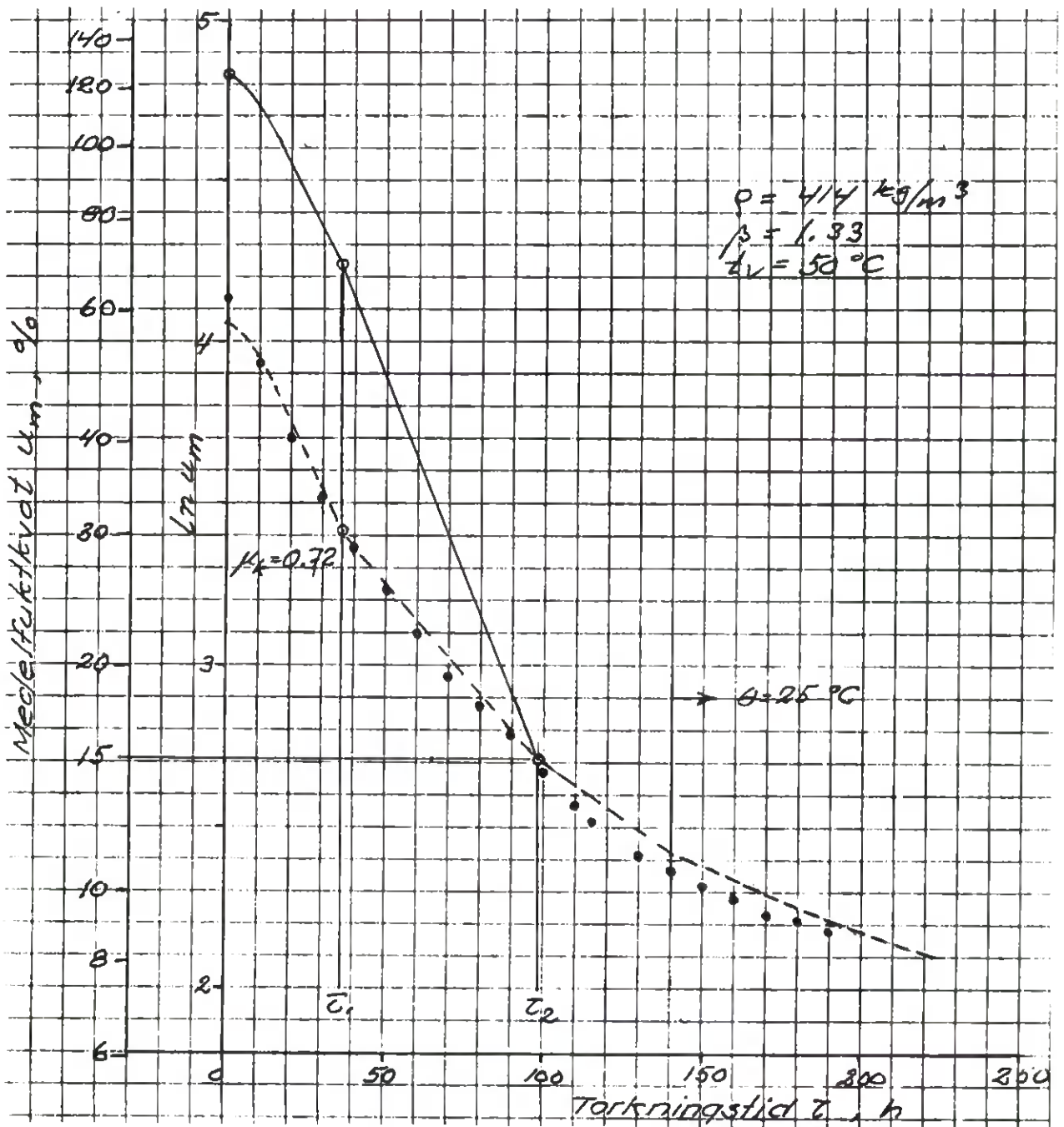
Figur A4. Försök F26, 75 x 150 furu.



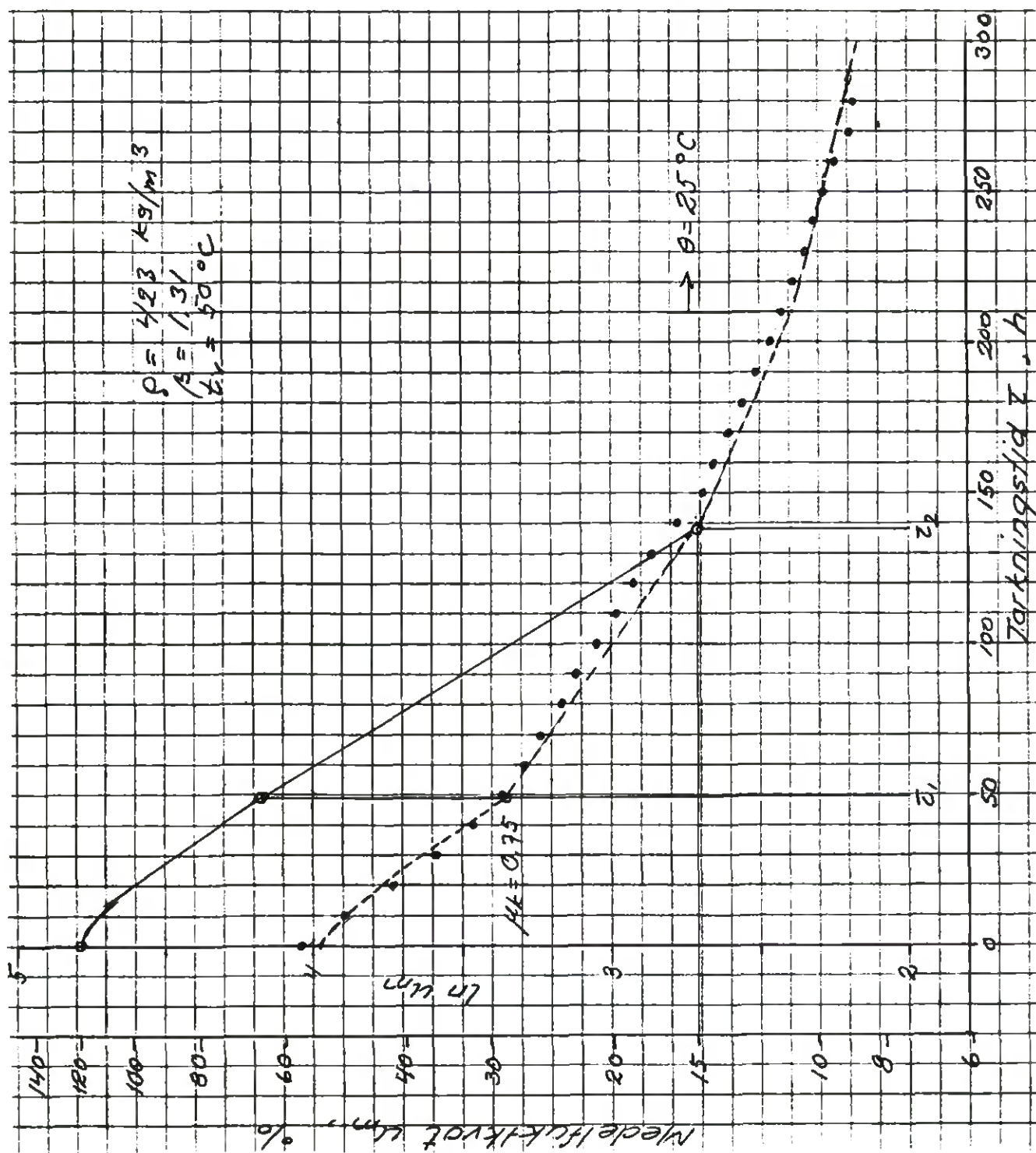
Figur A5. Försök F27, 50 x 150 furu



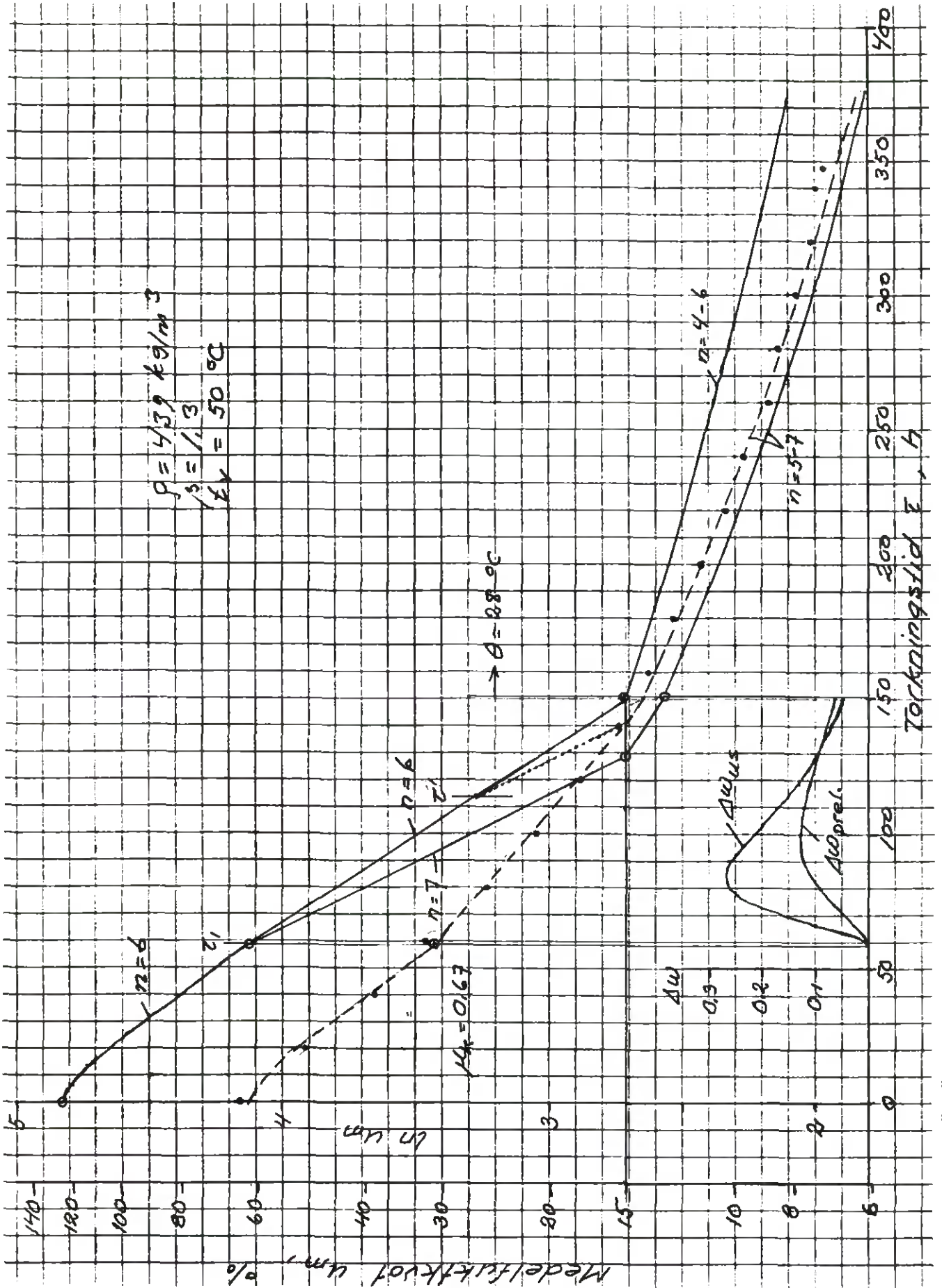
Figur A6. Försök F28, 50 x 150 furu.



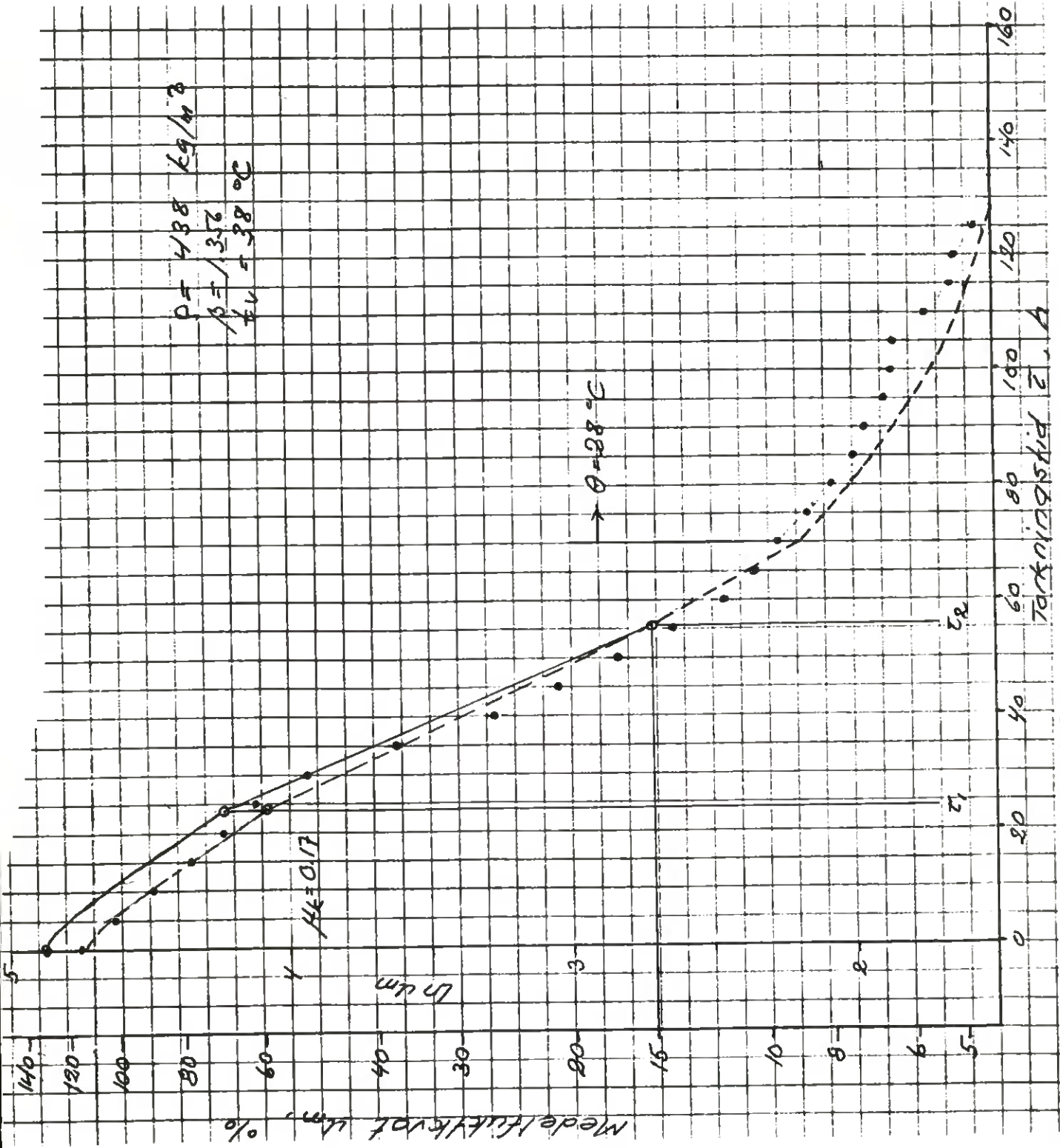
Figur A7. Försök F30, 50 x 150 furu.



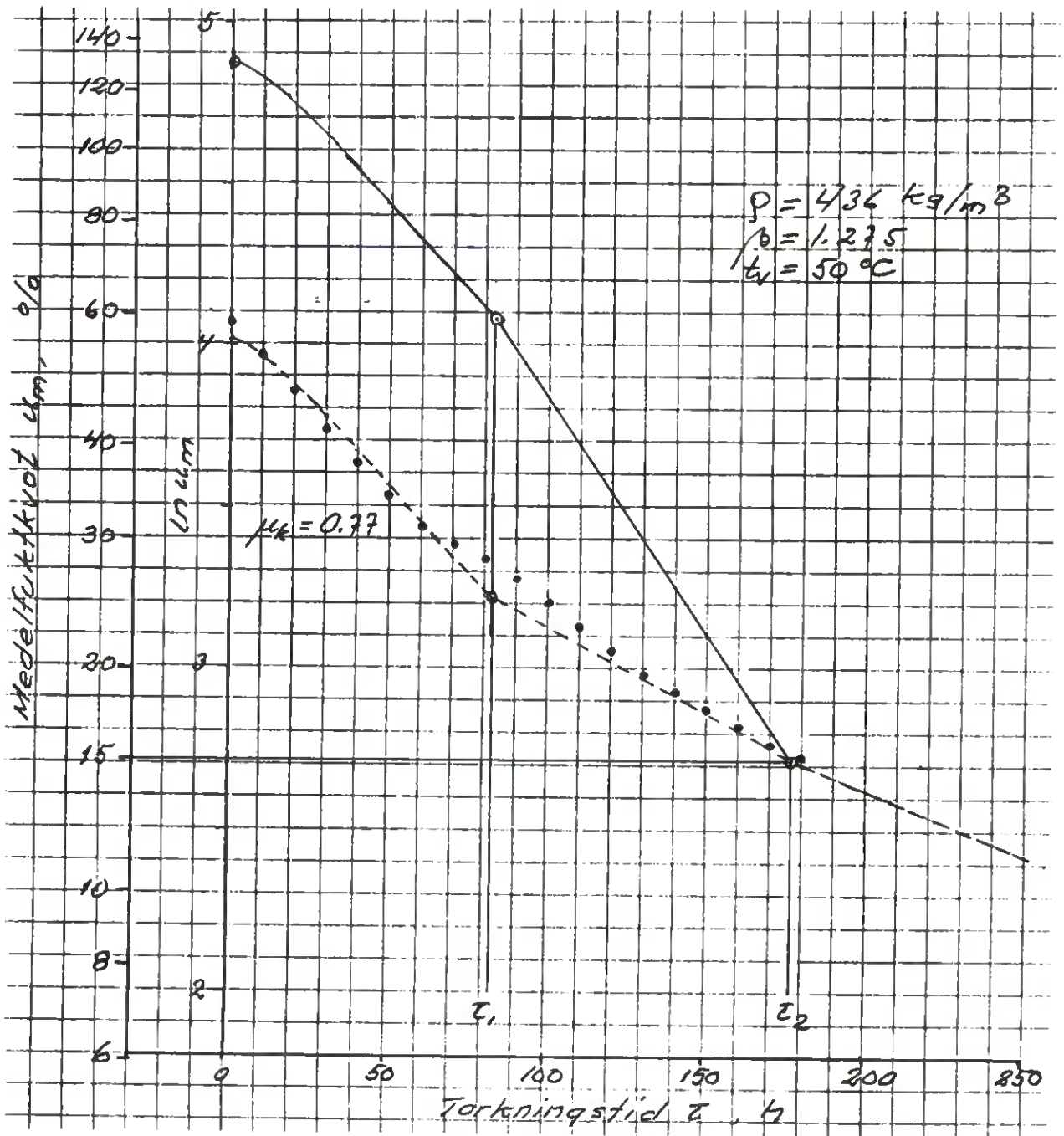
Figur A8. Försök F31, 63 x 150 furu.



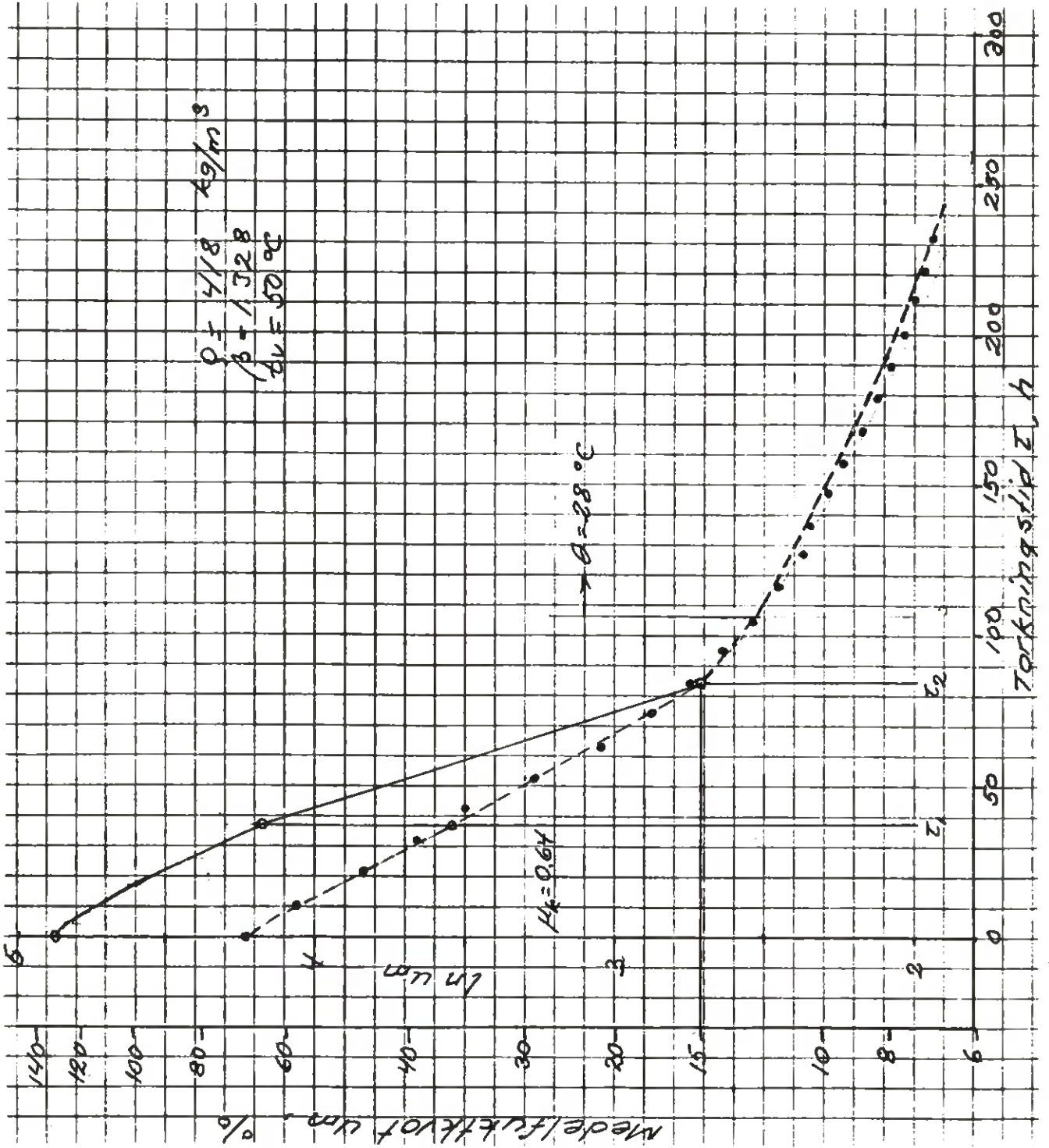
Figur A9. Försök F46.



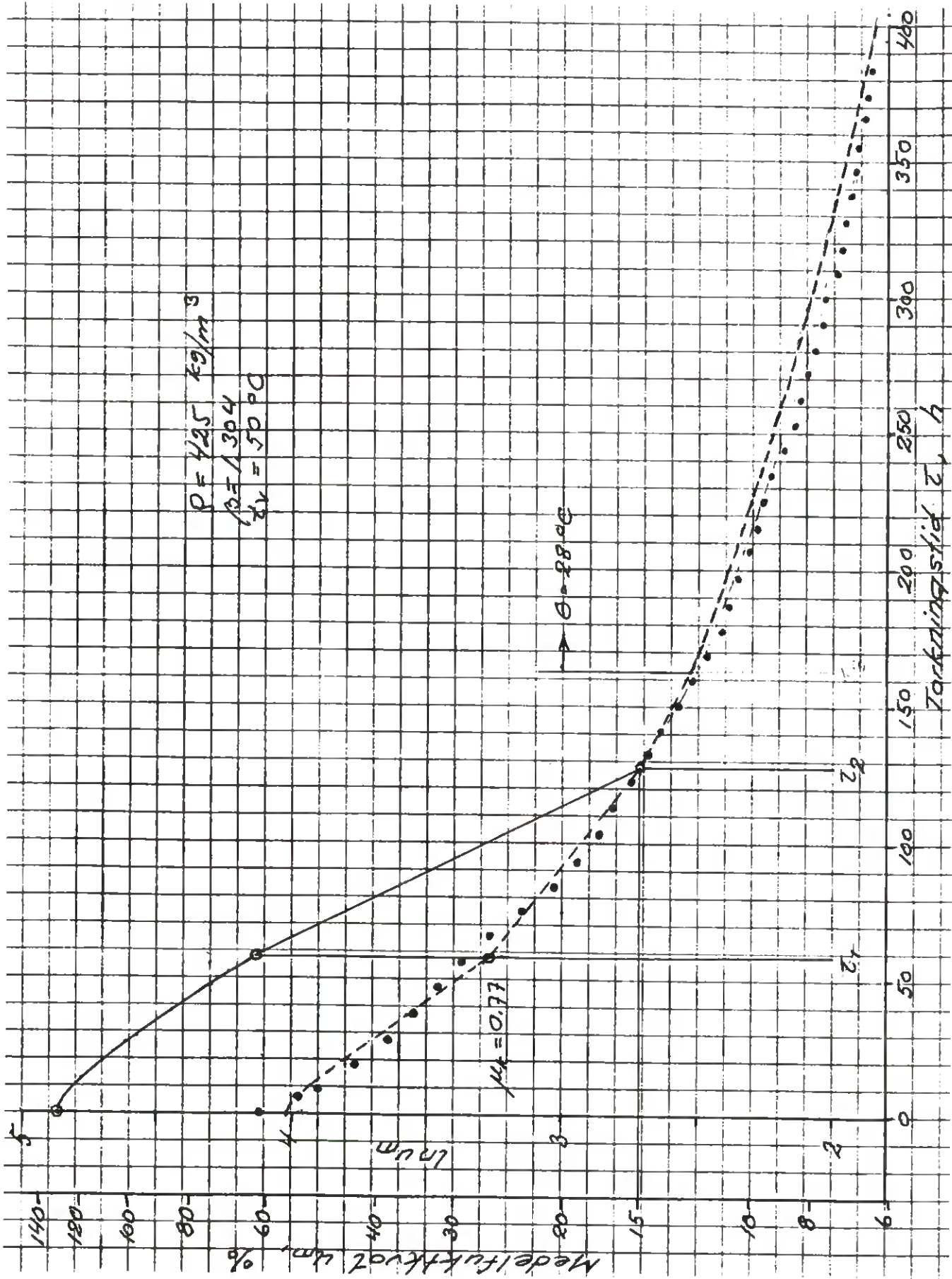
Figur A10 Försök F59, 25 x 100 furu. TACKNINGSKID E, A

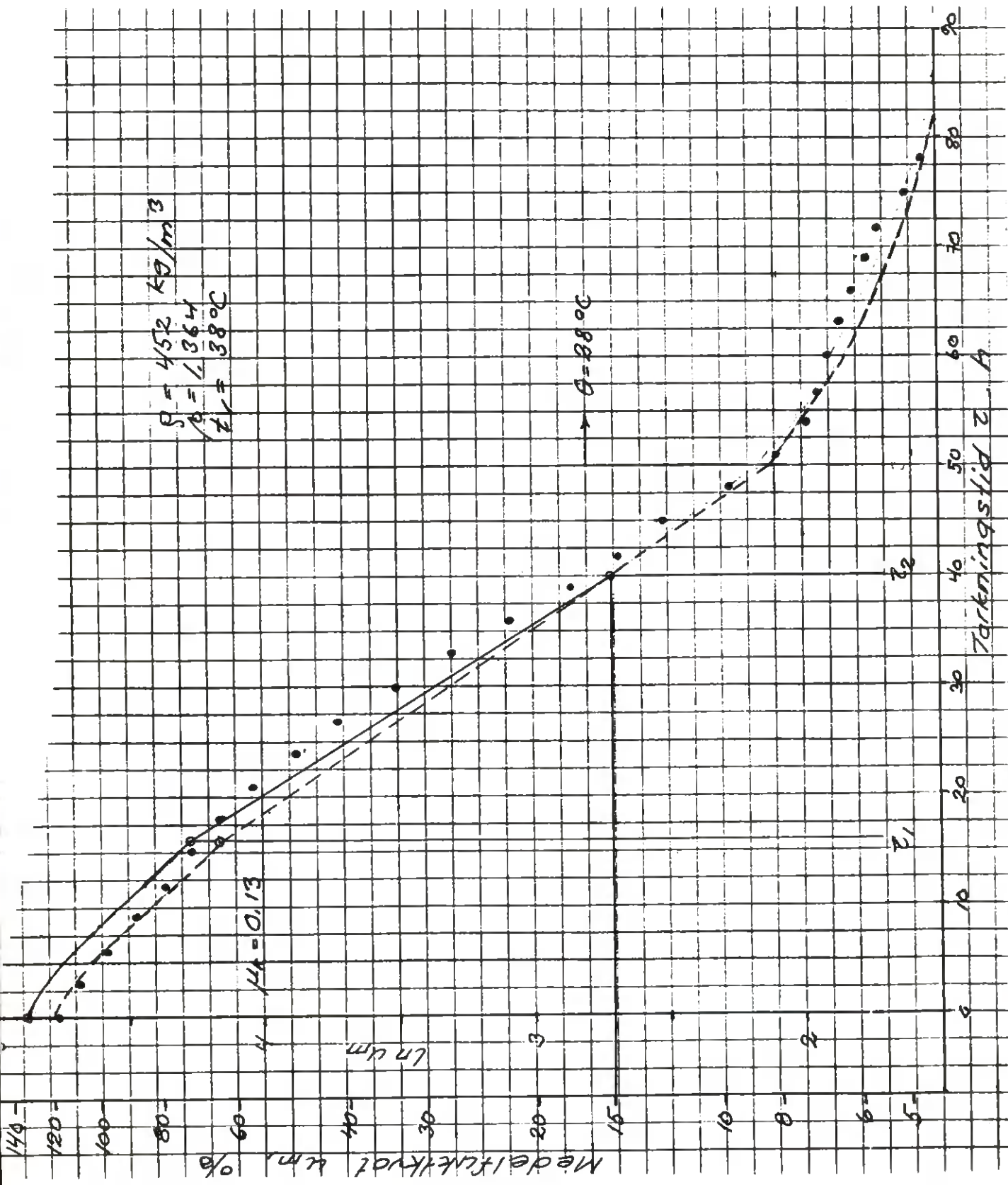


Figur A11. Försök F60, 75 x 150 furu.



... ..





Figur A14. Försök F64, 19 x 75 furu.

## SUMMARY

Pressure from the timber market successively increases the need for a technically higher quality in drying. A more rational use of the wood material in joinery industries can be achieved by a better drying which is directed towards less drying defects, a more uniform end moisture content and less stresses in the material due to drying.

The methods to achieve this are well known. Suitable schedules for the temperature and humidity control of the drying air have been experimentally proved for a very great number of species. The condition of the drying air then is put in relation to the moisture content of the timber to be dried which is measured in a number of "kiln samples". This method can be used in a compartment kiln, where the air can be controlled in the appropriate way.

The main purpose of the present investigation is - on the basis of a diffusion model for the drying process in the timber - to eliminate the precarious moisture content measurement during drying and to exchange this procedure into an equivalent time control of drying, suitable for modern control technique. In addition it has been achieved, that the drying intensity simply can be varied by changing an "intensity parameter" which simplifies an optimizing of the drying in relation to drying time-quality. Moreover, it is simple to take the different designs of kilns with respect to air velocity and blowing depth through piles into account.

European as well as American drying schedules have been used, giving two slightly different models called M1 and M2. A summary of necessary formulas to be used in programming micro-computers are given in Appendix 1 together with recommendations for the choice of drying parameters.

The models have been experimentally tested for Scots pine by a number of tests in the mobile test kiln of the Institute. In addition, a preliminary method of procedure in conditioning the timber after drying has been worked out. An additional number of tests of the validity of the models and a further development of the conditioning technique are desirable.

The complex nature of the general moisture movement in wood and its probable connection to the free hydroxyl groups is discussed. Bonding configurations change in a manner which is not known today.

## LITTERATUR

- /1/ Malmquist, L.: Compoundtorkning av virke. En analys av torkningsskador. TräteknikRapport Nr 62, 1984.
- /2/ Keylwerth, R.: Das „Trochnungsgefälle“ und die Steuerung von Holztrochenanlagen. Kap. 7, s. 56-62 i Kollmann, f. Keylwerth, R Beiträge zur Kraft- und Wärmewirtschaft in der Holzindustrie. 1950.
- /3/ Rasmussen, E.: Dry Kiln Operators Manual. Agriculture Handbook No. 188 F.P.L., US Dept. of Agriculture. 1961.
- /4/ Malmquist, L.: Untersuchungen zur empirisch-mathematischen Analyse der Sorption von Wasserdampf durch Holz. Diss. T.H. München 1966. Kurzfassung in Holz als Roh- und Werkstoff. Bd 25 (1967), s. 45-62.
- /5/ Malmquist, L.: Analys av modern virkestorkning, del 1. STFI Meddelande, serie B, nr 278, 1974.
- /6/ Malmquist, L., Meichsner, H.: Über den Wärmeübergang bei der konvektiven Trocknung von Holz in Heissdampf. Holz als Roh- und Werkstoff, Bd 22 (1964), s. 95-106.
- /7/ Shergowskij, S. P.: Referat i Holz als Roh- und Werkstoff, Bd 14, 1956, s. 282-283. Die Feuchtigkeitsleitfähigkeit des Holzes.
- /8/ Malmquist, L.: Analys av modern virkestorkning, del 2. STFI Meddelande, serie B, nr 285, 1974.
- /9/ Raen, T., Tronstad, S.: Tørkeskjemaer for norske og utenlandske treslag. Norsk Treteknisk Institutt, Utredning nr 48, 1979.
- /10/ Söderström, O.: Computer simulations of a progressive kiln with longitudinal air circulation. Forest Prod. J. 37(10):25-30, 1987.
- /11/ Torgesson, O. W.: Schedules for the kiln drying of wood. Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin. Report No 1791. 1957.

Detta digitala dokument  
skapades med anslag från  
**Stiftelsen Nils och Dorthi  
Troëdssons forskningsfond**

## **TräteknikCentrum**

INSTITUTET FÖR TRÄTEKNISK FORSKNING

Box 5609, 114 86 STOCKHOLM  
Besöksadress: Drottning Kristinas väg 67  
Telefon: 08-14 53 00  
Telex: 14445 tratek s  
Telefax: 08-11 61 88  
Huvudenhet med kansli

Åsensvägen 9, 552 58 JÖNKÖPING  
Telefon: 036-12 60 41  
Telefax: 036-16 87 98

931 87 SKELLEFTEÅ  
Besöksadress: Bockholmsvägen 18  
Telefon: 0910-652 00  
Telefax: 0910-652 65  
Telex: 65031 expolar s