



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R32:1988

# Krypningens mekanik i trämaterial

En teori baserad på vedens anatomi  
och fysiologi

S Åke Lundgren

R  
32/88

INSTITUTET FÖR  
BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

Se

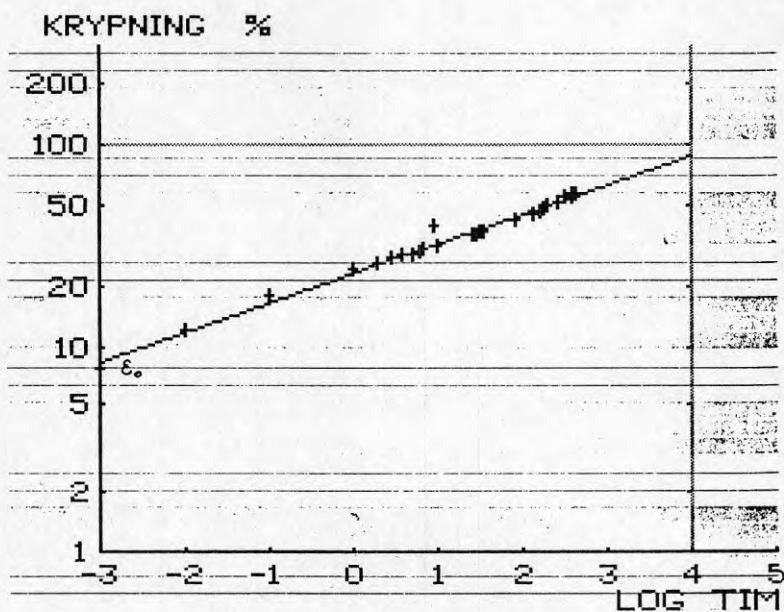
Byggeforskningsrådet

R32:1988

## KRYPNINGENS MEKANIK I TRAMATERIAL

En teori baserad på vedens anatomi och fysiologi

S Åke Lundgren



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840353-7 från Statens råd för byggnadsforskning till S Åke Lundgren Ingenjörbyrå AB, Nyköping.

## REFERAT

Hygroskopiska egenskaper hos trämaterial har studerats av många forskare, och litteraturen på området är omfattande. Iakttagna hysteresis-effekter har givits flera olika förklaringar.

Krypning under långtidslast och återhämtning efter avlastning har också provats ingående både vid konstanta och växlande klimat, och iakttagna kvarstående deformationer har motiverats mer eller mindre övertygande.

Observerade hygroskopiska och mekaniska deformationer är sällan helt reversibla. Underligt nog har forskare icke sökt något samband mellan dessa iakttagelser.

Trämateriels mikrostruktur, anatomi och fysiologi utgör emellertid den gemensamma grunden för hittills oförklarade deformationseffekter, vilket skall redovisas i denna preliminära kortfattade avhandling.

Resonemangen leder f.övr. fram till en ny förbättrad formulering av krypkurvors matematiska form, dessutom inom ett breddat tidsintervall.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R32:1988

ISBN 91-540-4880-X  
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1988

## INNEHÅLL

FÖRORD	2
TRÄSTRUKTURER	3
Spiralstruktur i cellväggar	4
Turgortryck (osmos) i fiberrör	5
Samband turgortryck och fiberform	6
MEKANISKA DEFORMATIONER	7
Hysteresis-effekter, samband	8
KRYPKURVORS MATEMATISKA FORM	9
Diagram i loglog-skalar	9
Begreppet 'momentan' deformation	9
Försök att bestämma $\epsilon_0$	10
Vibrationsprovning, inre dämpning	11
Ny metod att fixera $\epsilon_0$ -värden	12
Extrapoleringens noggrannhet	13
Inverkan av åldring, arbetsprogram	13
LITTERATURFÖRTECKNING	14
BILAGA 1 Superposition teori & ex	15
BILAGA 2 Krypkurvor & kalkyler	23
BILAGA 3 Avlastningskurvor & kalkyler	25
BILAGA 4 Trä till fiolbygge	27

## KRYPNINGENS MEKANIK I TRÄMATERIAL

Vedens mikrostruktur, anatomi och fysiologi

### Förord

Hygroskopiska egenskaper hos trämaterial har studerats nästan till leda. Iakttagna hysteresis-effekter har förklarats av bl.a. Barkas /1/ och för träbaserade skivor exemplifierats av Lundgren /2/.

Krypning vid långtidslast och återhämtning efter avlastning har också diskuterats ingående, se t.ex. /2/ och Mohager /3/. Kvarstående deformationer har ibland motiverats på otroliga sätt.

Observerade hygroskopiska och mekaniska deformationer är sällan helt reversibla. Underligt nog har forskare icke sökt något fysikaliskt samband mellan dessa iakttagelser.

Trämaterialets mikrostruktur, anatomi och fysiologi utgör emellertid den gemnsamma grunden för hittills oförklarade deformations-effekter, vilket skall redovisas i denna kortfattade, preliminära avhandling.

Resonemangen leder f.övr. fram till en ny förbättrad formulering av krypkurvornas matematiska form, dessutom inom ett breddat tidsintervall.

Arbetet har utförts vid undertecknads laboratorium i Nyköping. Som hjälp vid programmering har Göran Dahlberg medverkat.

Blåhamra januari 1988

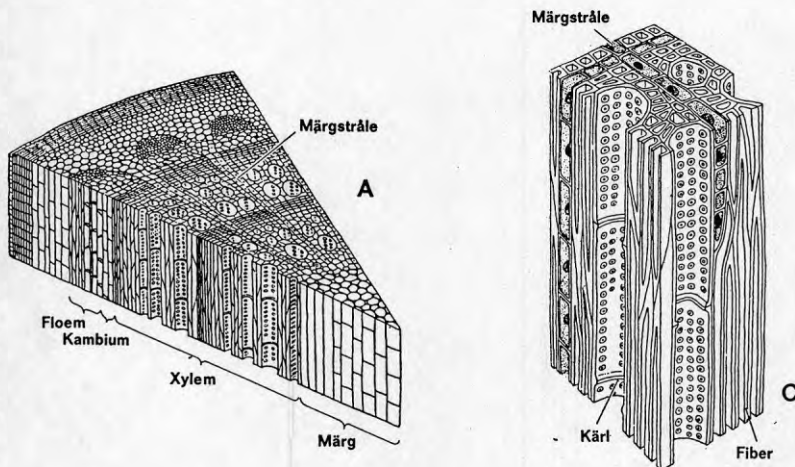
S Åke Lundgren

## TRÄSTRUKTURER

Det är lätt hänt, att man vid träteknisk forskning glömmar och försummar skillnaden mellan levande och dött trämaterial.

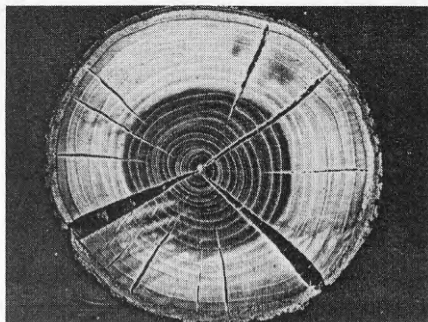
Den vedartade stammen hos barrträd består huvudsakligen av längsgående fibrer, silrör och radiella mägstrålar, som alla har sin fysiologiska tidsbestämda funktion. Mikrostrukturen hos lövträ, som biologiskt är en senare utvecklingsform, är mer komplicerad.

Utmärkt bra illustrationer av trästrukturer finns bl.a. i N Fries /4/ och F Kollmann /5/. Ur förstnämnda tillåter jag mig återge :



I det levande trädet är fibrernas väggar utspända av osmotiskt tryck, det s.k. turgortrycket (plasmans tryck mot cellväggen). Vid torkning minskar trycket, fiberväggarna börjar buckla in, och brutto-tvärmåttet minskar. Virket krymper, och det sker väsentligen av geometriska förändringar i fibrernas tvärsektionsform, ej p.gr. av krympning hos fiberväggens material. /5 Sid 449/ & mikrofotografering vid laboratoriet.

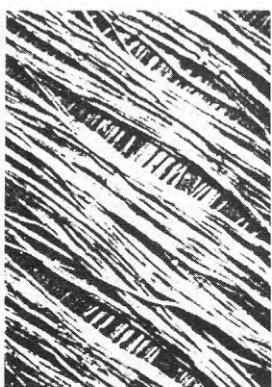
De radiellt riktade mägstrålarna (tyska Markstrahl) motverkar fiberstrukturens krympning i radiell led. Den blir desto större tangentiellt, varvid stammen spricker på ett för barrträd karakteristiskt sätt. Detta är allmänt känt åtminstone av båthyggare, se fig sid 4.



Om artificiell torkning drives extremt snabbt, kan hela fiberstrukturen kollapsa. Fiberrören plattas ihop men kan vid efterföljande kraftig uppfuktning, t.ex. i ånga, återhämta sig i viss mån. /5 sid 449/.

Men stabiliteten hos fibrernas dimensioner och framför allt form är inom rimliga fuktamplituder mer invecklad än så. Analysen därvidlag är en huvudpunkt i denna avhandling.

Om man i elektronmikroskop studerar uppbyggnaden av cellväggarna, finner man två skikt s.k. fibriller - ytterst tunna cellulosa-trådar - i spiralstruktur med sinsemellan omvänd riktning. Några bilder får förtydliga uppbyggnaden. De är tagna ur N Fries /4/, G Casperson /6/ och Butterfield-Meylan /7/ :



/4/  
10.000:1



Abb. 3. Tangentialschnitt durch Reaktionsholz von *Sylvestris*. Die Sekundärwand (S<sub>2</sub>) ist von Spalten zogen, die parallel zur Fibrillenrichtung verlaufen.

/6/  
1200:1

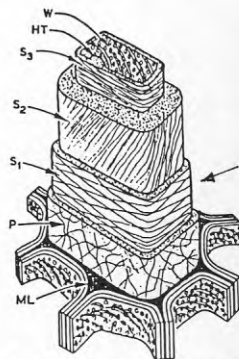
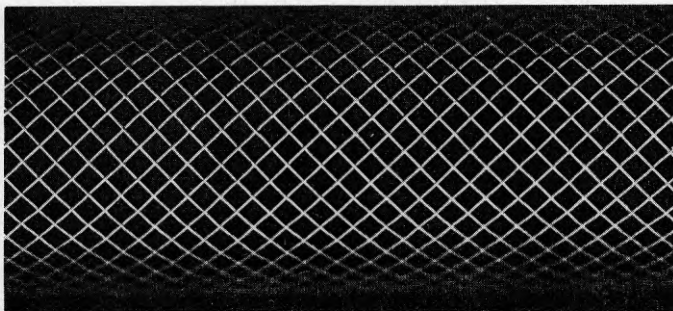


Fig. 2. A schematic diagram to illustrate the general structure of the cell wall of axially elongated wood

/7/



Stabiliteten hos en sådan struktur är av allra största intresse.  
 Av trådnät format till en cylinder (med godtyckliga proportioner)  
 kan man göra en modell



I denna cylinder är spiralernas stigningsvinkel  $45^{\circ}$  men i cellväggarna mindre, flackare, ca  $25^{\circ}$  så att vinkeln mot cylinderns längdaxel blir ca  $90 - 25 = 65^{\circ}$  i vardera spiralen att döma av mikroskop-iakttagelser.

Ett inre övertryck (turgortrycket) i fiberröret ger dels ett radiellt riktat tryck mot cylindermanteln, dels ett tryck mot cylinderns gavlar oavsett om dessa är plana eller något spetsiga som hos träfibrer. Båda trycken ger dragspänningar i manteln, det förstnämnda tangentiellt, det sistnämnda longitudiellt/axiellt.

Man förstår genast, att spiralernas stigning avgör om dessa spänningar skall balansera varandra eller om endera skall orka vidga rörets tjocklek eller förlänga röret på diameters bekostnad ?

Ett inre turgortryck  $q$  ger i manteln en tangentiell dragspänning av  $q \cdot r$ , medan trycket mot vardera gaveln blir  $q \cdot r^2 \cdot \pi$ , som fördelas på mantelns omkrets  $2\pi r$  och sålunda blir  $\frac{q \cdot r}{2}$  axiellt per breddenhet. Tangenten för jämviktswinkeln  $v$  blir sålunda  $= \frac{1}{2}$  och  $v = 27^{\circ}$  eller  $90 - 27 = 63^{\circ}$  mot cylinderaxeln.

Om spiralerna hade flackare stigning, skulle ett inre övertryck förlänga röret, men en brantare förtjocka och förkorta fibern.

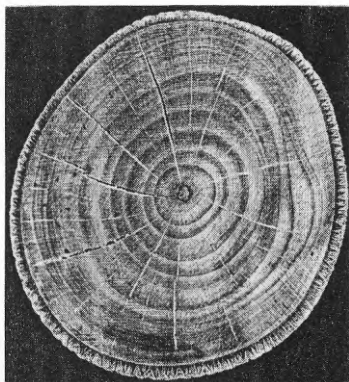
Om trycket i fiberns plasma minskar eller dennas volym reduceras vid torkning - vattenavgång - förlorar spiralstrukturen en del av sin formstabilitet. Yttre krafter kan påverka proportionerna mellan rörlängd och -diameter, och gränserna för sådana deformationer är kalkylerbara om man känner plasma-konditionen visavi rörvolym etc.

Bortsett från sådana djuplodande teoretiska analyser kan man lätt tänka sig, att det växande, levande trädet utnyttjar effekterna så att säga i eget intresse. Om spiralstrukturen från början gives vinklar som icke automatiskt ger jämvikt vid fullt celltryck, kan trädet genom tryckändring påverka cellens proportioner (längd/tjocklek) genom variationer i plasmans osmotiska egenskaper.

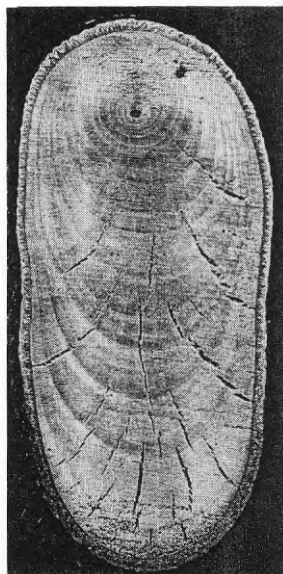
Sommarhalvårets näring, stärkelse, har låg löslighet i kallt vatten. Men inför vintern sker en enzymatisk omvandling till socker för att hindra frysning i cellerna. Socker ger högt osmotiskt tryck och därmed maximal volym inom spiral-väggen, vars proportioner då kan förändras. Inom parentes må här nämnas, att vatteninnehållet i svenska barrträd är dubbelt så högt på vintern som sommaren.

Kanske utnyttjar det levande trädet ovannämnda funktioner för att säsongsmässigt höja grenar mot ljus från skyn eller sänka granens snötyngda grenar i hopp om rutsch-avlastning ? Och för att nästan evigt hålla sin furu-kronas största grenar horisontellt utan någon synbar böj-krypning nedåt ?

Växande träd förstärker grenarnas undersida mot tryck och knäckning. Där bildas frodig splintved som är näringrik och ger turgortryck beroende av temp. m.m.



gren >  
< stam



Dessa resonemang kan verka 'överansträngda' men anföres som en tänkbar förklaring till att levande träd icke tycks ha samma tendens till långtidsdeformation som alltid iakttages hos byggnadsvirke och icke har något nedre tröskelvärde för lastnivån. Kanske finns någon bättre, sannolikare förklaring, och i så fall mottages den med tacksamhet - kanske kunde den vara artificiellt tillämpbar på träkonstruktioner.

Många forskare har studerat hur virkes fuktinnehåll ev. påverkas av yttre krafter. Drives vatten bort från plasman i fibrerna om dessa utsättes för tryck i tvärled? Resultaten av dessa försök borde bero på vedens fuktnivå och osmotiska balans, men effekterna har alltid blivit små eller försumbara, vilket kan bero på brister i provningsmetodiken. Virke med fuktkvot på nivån 10-15 % innehåller så många tomma kanaler och trycklösa fibrer, att träet partiellt krossas, innan man ens till närmelsevis når osmotiska turgortryck hos färskt material.

#### MEKANISKA DEFORMATIONER

Kryp-förlopp och återfjädring under olika lastförhållanden har ingående redovisats i /2/ och /3/, och dessa båda dr-avhandlingar ger sammanfattningsvis tumregler för trämaterials beteende under olika betingelser. Men där finns en del ouppklarade fenomen, nämligen krypningens förändring vid fuktväxlingar och skenbara inkonsekvenser vad gäller kvarstående deformationer. Bådadera har praktisk betydelse och är samtidigt lockande teoretiskt. En s.k. 'bit' ligger i tidsmässig åldring av trämaterial, vilket S Mohager /3/ studerat grundligt för verkligt gammalt virke men ännu icke för 'halvgammalt', d.v.s. bruksvirke under 1 - 30 år efter fällning, då dess hygroskopiska och mekaniska deformationer är som viktigast i trähus. För den tidsperioden behövs en kompletterande undersökning av åldringseffekter. Men man måste ge akt på att åldring i viss mån sker under pågående långtidsprovning av brotthållfasthet och moduler, vilket lätt kan bli vilseledande.

S Mohager /3/ påvisar övertygande, att deformationstillskott orsakade av fuktväxlingar under pågående långtidsbelastning är helt reversibla. Man skulle vänta sig, att fukthysteresis gav en viss tröghet vid återfjädring, men den effekten blir måhända försumbar vid stort antal cykler och på en så hög fuktnivå, att turgortrycket i cellerna förmår återföra cellväggarna till 'fyllda' och balanserade proportioner.

Men i andra fall noteras bristande återfjädring även efter mycket lång tids avlastning. Flera förklaringar till dessa frågetecken kan finnas :

- a/ Principiellt sker återfjädring enligt reglerna för s.k. superposition, d.v.s. en addering av tänkt varaktigt löpande belastning och motsvarande omvända effekt av avlastning/återhämtning. P.gr. av den för krypning karakteristiska tidsfaktorn blir icke  $+q - q = 0$  utan alltid ngt större än 0, och detta har av många forskare noterats som en permanent kvarstående deformation. I brist på förklaring har den döpts till  $\epsilon_p$ . I verkligheten blir den iakttagna bristen på återfjädring ständigt minskande asymptotiskt mot noll, dock kan hysteresis-eff. verka dämpande /2/ & Bilaga 1.
- b/ Som W Barkas /1/ påvisat, beror hysteresis på inre friktion i plasman ( eller fasta mtrl ). Återfjädring fordrar alltid ett energitillskott för att bli fullständig. Fuktning och torkning är visserligen reversibla effekter, men de fungerar ej med 100% verkningsgrad, och detsamma gäller mekaniska deformationer hos fasta mtrl. En stålstång som växelvis böjes åt ena och andra hållet blir varm av hysteresisförlust, och det blir järnet också om det magnetiseras växelvis. Osökt kommer man att tänka på hur arbetskrävande det är att lära men lätt att glömma - vart tog den energin vägen ?
- c/ Som ett specialfall anföres i /3/ iakttagelsen, att den momentana återfjädringen vid avlastning av ett långtidsprov blev flera ggr större än momentan-deformationen vid pålastning. Omständigheten råkade vara, att avlastning skedde vid mckt högre fuktnivå än pålastningen. Enligt principerna för formstyvheten hos fiberrör med högt inre fukttryck, är den snabba återfjädringen förklarlig.

d/Ofta återkommer i provningsrapporter en förvåning över att böjprov utsatta för långtidslast plötsligt ökar sin krypning när fuktigheten sänkes. Enligt principerna för cellväggar av dubbelspiral, som stabiliserar fibrernas form vid hög fuktighet men tolererar smärre förändringar i spiralvinklarna vid lägre celltryck (turgortryck), är nyssnämnda effekt rimlig.

Samtidigt måste man naturligtvis ha klart för sig, att varje formförändring i fiberväggarna, t.ex. vinkeländring mellan de båda spiralskikten, i sig själv innebär en material-deformation, som rimligtvis går trögare/viskösare än variationer i plasmans hydrostatiska tryck. Dessutom sker en 'överlagring' såtillvida, att cellväggarnas fasta material, cellulosa etc., är hygroskopiskt, mjuknar vid högre fukt och då låter sig deformeras mer och snabbare än i helt torrt tillstånd. Den totala krypmodellen är komplex !

#### KRYPKURVORS MATEMATISKA FORM

Krypkurvor avseende konstant last och klimat blir rätliniga i diagram där X-axeln logaritmiskt anger belastningstiden och Y-axeln i log-skala visar deformationens tillväxt i % av den momentana deformationen  $\epsilon_0$  vid pålastning.

Frågan är emellertid hur  $\epsilon_0$  skall kunna mätas. Man önskar utföra pålastningen 'momentant' men utan dynamiskt tillskott och samtidigt mäta deformationen med stor noggrannhet.

Enligt rutinen i laboratoriets klimatrum har lasten anbringats med största varsamhet successivt under ca 6 sekunder, vilket ansetts motsvara 3,6 sek. = 0,001 h effektiv lasttid. Motsvarande deformation har kallats momentan =  $\epsilon_0$ .

Men onekligen måste en viss krypning ha förekommit redan under dessa första 3,6 sek. - visserligen en kort tid jämfört med tusentals

lasttimmar för ett normalt långtidsprov, men onekligen den period då krypningen sker allra snabbast.

Man kan filosofiskt fråga sig vad 'momentan' deformation egentligen innebär ? Finns det någon definierbar sådan, eller är hela deformationen krypning på hög nivå ?

0,001 h Efter flera års rutinprovningar följda av en serie systematiska under-  
sökningar visade sig krypningen under 3,6 sek vara ca 2% av den 'momentana' deformationen  $\epsilon_0$ , som ingått i den använda krypekvationen.  
0,01 h Skaran av mätvärden för 36 sek. 6 min. 1 h och längre lasttider gav  
0,1 h nämligen regressionslinjer som pekade på 2% vid tiden 3,6 sek.  
1 h

Med den erfarenheten korrigerades krypekvationens värden för  $\epsilon_0$  och övriga  $\epsilon_{\text{obs}}$ . Korrelationskoefficienten  $e$  mellan den datorpassade regressionslinjen och observerade mätvärden blev därmed ännu bättre än tidigare och låg oftast kring 0,99, någon gång t.o.m. på 1,000.

Men precisionen försämrades : Råvaran i board och spånskivor, de trämaterial som provades mest, förändrades, formaldehyd-problem gav nya limtyper och ovannämnda 2% krypning för första 3,6 sek (0,001 h) tycktes öka avsevärt. Praktiskt taget alla skivfabrikat försämrades och visade allmänt stor krypning, som i första hand måste bero på inblandning av kortfibrig sågspån och krossad kutterspån.

Förnyad analys pekade på en 'initialkrypning' av 6 á 8 % i st.f. 2 % förut. Ekvationen justerades, och korrelationerna blev ånyo utmärkt bra. Men ej alltid rättvis : Dels fanns kvar fabrikat med prima K-skivor, dels provades ibland plywood eller massivträ med oförändrat god stabilitet, och då borde datorn ej vara programmerad för 6 % initialkrypning. Det blev nödvändigt att anpassa värdet individuellt från gång till annan; enkel räknerutin måste ersättas med erfarenhet.

I denna situation behövdes en metod att säkrare bestämma det verkliga värdet för  $\epsilon_0$ , alltså den faktiska eller åtminstone teoretiska momentana deformationen. Kunde man mäta den, skulle ingen 3,6 sek.-kryp-term behövas.

Lösningen på det grundläggande problemet att snabb-belasta utan dynamiskt tillskott och hinna mäta deformationen blev originell - och dynamisk ! Den tidigare statiska belastningen av prov-kroppar ersattes med mätning av egensvängningstalet hos stavarna, när dessa bringades i resonans med en frekvensreglerad impuls-apparat av enklaste slag.

Resonansen blev alltid mycket distinkt , och hela mätningen kunde utföras på någon minut och resultaten kalkyleras lika snabbt på ett enkelt program enligt kända formler för samband mellan styvhetstalet  $E \cdot I$  , massan  $M$  och frekvensen  $f$  /8/.

Onekligen blev resultaten mycket överraskande. Normalt gäller som bekant, att trämaterial har högst  $E$ -modul ( $G/\epsilon$ ) vid kortvarig belastning, men att  $E$  sjunker vid varaktig last. För spånskivor halveras  $E$  efter ca 1000 h i 65% r.f. Man kunde därför vänta, att vibrationsprovets mycket korta lastpulser (  $1/10 - 1/100$  sek.) skulle visa extra höga  $E$ -värden.

Men icke ! Tvärtom kom  $E$  för massivträ att hamna på ca 75% av normal korttids- $E$  (3,6 sek.), och för spånskivor på mindre än 50% av sådana basvärden.

Alldeles uppenbart dämpas snabba belastnings-pulser visköst i trä-strukturen. Materialet hinner varken deformeras eller återfjädra. Plasman i cellerna dämpar, och den planisotropa strukturen i spånskivor ( liksom fiberstrukturen i board ) ökar trögheten ytterligare.

Den tidigare omtalade rätliniga krypkurvan i dubbellogaritmiska diagram krokmar alltså till vänster om 'gamla' momentan-tiden 3,6 sek. Man kan ej extrapolera  $E$  för kortare tider än några sekunder.

Iakttagelsen är mycket intressant och kanske även praktiskt givande : Man kan lätt mäta skivors akustiska dämpning. Som bekant finns en tendens, att väggar av skivmaterial ger rummen 'låd-ljud', starkare ju styvare skivorna är i förhållande till sin vikt ( plywood ). Men vid den bedömningen har styvhetstalet räknats som konventionellt

korttidsvärde. Relationen mellan detta och vibro-mätt styvhet säger betydligt mer om resonans och dämpning.

Förmodligen kan vibr-mätning av E vid höga och mycket höga frekvenser avgöra om t.ex. tunna radiellt utsågade skivor av gran och lönn lämpar sig bra som lock och bottenar för stråkinstruments klanglådor. Fiolbygge : Bilaga 4.

Man kan utgå ifrån att hög styvhet ( i förhållande till egenvikten ) är önskvärd i träskivornas båda planriktningar. Anatomiskt innebär detta, att märgstrålarna är väl utvecklade och förstyrvar skivans tvärled.

Man får vibroprova sig fram mellan de varianter som förekommer inom respektive träarter. Där finns genetiska särdrag, individuella och klimatiskt betingade. Även växtplatsen kan inverka.

Eftersom försöken att dynamiskt mäta  $\epsilon_0$  vid mycket korta lasttider ej gav den rätliniga krypkurvan någon 'styrning' nedåt, utvecklades en annan metod att kalkylera krypning under de allra första sekunderna och därmed få fram ett teoretiskt - säg fiktivt - värde på momentan-deformationen  $\epsilon_0$ .

Datorns programmering ändrades så, att en serie regressionslinjer med olika värden för  $\epsilon_{3,6 \text{ sek}}$  kalkylerades, varefter datorn själv valde den linje som visat bäst korr. med observerade värden från 36 sek. och längre. Efter detta linjeval kalkylerades och redovisades E för olika lasttider, korrelation etc i tabell- och diagramform, se Bilagor 2a och 2b.

Med denna programmering blev datorn s.a.s. självstyrande när material av helt olika kryp-karaktär kördes. Dessutom kunde datorn nu beräkna och redovisa återfjädring enl. principerna för superposition, sedan last-deformationens  $\epsilon_0$  tidigare uppskattats enl. ovan. Se Bilagor 3a och 3b.



Efter alla erfarenheter och modifikationer kan olika trämaterials krypning och återfjädring nu bestämmas med stor precision. Under de 20 år som gått sedan avhandlingen Träskivor som Byggnadsmaterial Del I /2/ presenterades, har provningsmetodikerna förfinats så långt, att krypningen hos ett godtyckligt trämaterial efter årslång belastning kan förutsägas med noggrannheten  $\pm 1\%$  redan efter några dygns provbelastning av 2 - 4 provkroppar som ger medelvärde.

Det har blivit rutin att köra datorprogrammet efter ca 100 h last, och om korrelationen då blir sämre än 0,99 förlänges provningen tills klarhet vunnits och ev tillfälliga avläsningsfel eller andra störningar avslöjats av datorritad krypkurva för varje enskilt prov.

Men om krypförloppen nu är väl kända inom tidsintervallet 0,01 sek - 10000 h ( ca 1 år ), så saknas ännu säkra mått på hur tidsberoende åldring inverkar efter några års belastning. Det är alldeles klart, att gammalt och mycket gammalt virke är avsevärt formstävare än ungt, se /3/. Plasman av äggviteämnen etc har koagulerat, polymeriserat, oxiderat, torkat och förhårdnat liksom beståndsdelarna i cellväggarna. Sådana effekter minskar kryp-tendenser men försprödar. Samtidigt avtager de hygroskopiska deformationerna och därav orsakade spänningarna. S Mohager studerar dessa problem nu, och här vid laboratoriet i Nyköping pågår viss omprovning av de nu 20 år gamla 'typ-skivor' som gav underlag för avhandlingen /2/. En detaljerad rapport om detta planeras i Träskivor som Byggnadsmaterial Del II - V, som beräknas utkomma.

Till dess, kort sagt :

Glimmingehus' bjälklag blir aldrig hängmattor.

Bra fioler vårdas, blir gamla och då ännu bättre.

Planverket bör överväga att ge  $E_{\text{trä}}$  påökt.

LITTERATURFÖRTECKNING

1. Barkas W W : Swelling Stresses in Gels, For.Prod. Res. Spec. Rep. Nr 6 S 41 London 1945  
Ref. i Kollmann F : Techn. d Holzes u d Holzwerkstoffe, Springer Verlag 1951, Band I Kap. 322.4 S 399.
2. Lundgren S Å : Träskivor som Byggnadsmaterial Del I 1967, Nyköping, Kap 4 s 39-92 (hygroskopi), Kap 5 S 192-199 (superposition).
3. Mohager S : Studier av Krypning hos Trä, Stockholm 1987.
4. Fries N : Växtfysiologin, introduktion till, Stockholm 1974, Natur & Kultur, ISBN 91-27-62101-4, S 24
5. Kollmann F : Techn.d.Holzes u.d. Holzwerkstoffe, 1951 Springer Verl. Band I, Kap 124, S 16
6. Casperson G : Zur Anatomie des Reaktionsholzes, Stockholm 1965, Sv. Papperstidning nr 16/1965, S 536.
7. Butterfield B G & Meylan B A : Three Dimensional Structure of Wood, 2:a uppl. London New York, Kap 1 Fig 2
8. Handboken Bygg, Stockholm 1972, Allm.Grunder, Huvuddel 1 B, Kap. 169:38 & :39 (ekv.  $f = k(EI/mL^4)^{1/2}$  , k enl.fig för egenmoder.

\*\*\*\*\*

- Bilaga 1 Principer för superposition vid beräkning av återhämtnings-förlopp efter avlastning eller belastningsväxlingar ( ur /2/ ovan ).
- Bilagor 2 Krypkurvor för långtidsbelastade spånskivor kalkylerade med  $\epsilon_0$  från bästa korrelation ( enl. sid 12 i denna avhandling ).
- Bilagor 3 Motsvarande datorritade diagram över återfjädring efter långtidslast.
- Bilaga 4 Nilsson Anne : Fioler. ICA Västerås, 1981. Sid 144 'Trä till fiolbygge'.

Utdrag ur /2/ Lundgren A : Träskivor som Byggnadsmaterial

Avhandling 1967, Sidorna 192-199

**ÅTERFJÄDRING VID AVLASTNING, INVERKAN AV PULSERANDE LAST**

Flertalet av hittills redovisade diagram över krypning under last åskådliggör även förloppet vid och efter avlastning. Den momentana återfjädringen har markerats med en streckad linje fram till tiden  $10^{-3}$  h ( 3,6 sek. ), då första avläsningen hunnit göras. Därefter har den elastiska efterverkan, 'återkrypningen', följts fram till  $10^3$  h eller längre om ej mätanordningarna undantagsvis krånglat eller provkropparnas tendens till välvning omöjliggjort korrekta iakttagelser.

I ett par fall har återfjädringen vid oförändrad fuktighet kunnat följas under så lång tid som 33500 h ( 4 år ). Icke ens då har rörelsen helt upphört men varit så långsam, att den börjat skymmas av mätfel i form av små r. f. -förändringar.

Den elastiska efterverkans förlopp liknar krypningen under last men förefaller ibland att gå något saktare. Försök har visat, att retrurrörelsen kan påskyndas genom fuktcykler, vilket påminner om de kvarstående dimensionsförändringar som uppkommer vid fuktcykler, se t. ex. figur 34. Mekaniken är förmodligen densamma - och därmed finns också risk för sammanblandning.

En väsentlig iakttagelse är, att återgång aldrig sker till ursprunglig längd, icke ens efter kortvarig belastning. Effekten kan tänkas bero på inre friktion i fiberstrukturen eller på att en del svaga, primärt påkända förband brustit, så att den inre jämvikten rubbats.

Diagrammen i figurerna 95 - 108 ger en allmän uppfattning om olika faktorerers inverkan på återfjädringen :

1. Plywood visar mest fullständig återfjädring, därefter spånskivor, oljehärdad board, hård board samt sist byggboard. Ju mindre tendenser till krypning under last, desto fullständigare återfjädring, är tydligen regeln.
2. Efter viss tids avlastning är den kvarvarande deformationen proportionell mot påkänningen under en given lastperiod. Huruvida återgången så småningom upphör på nivåer som fortfarande är proportionella mot  $\sigma$  är okänt.

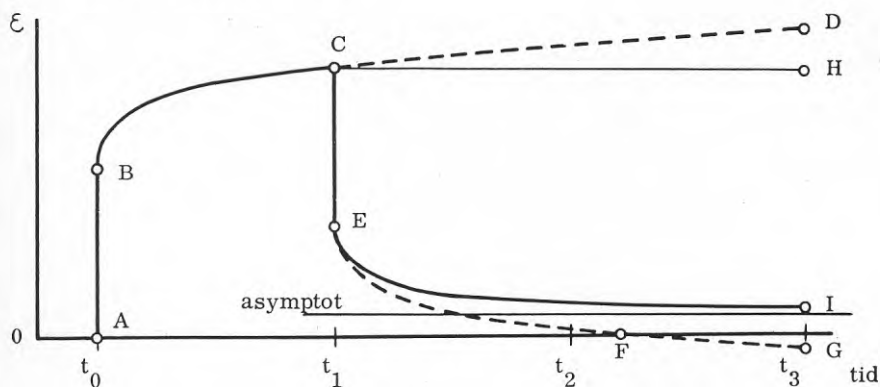
3. Hög luftfuktighet förminskar eller försenar retrurrörelsen högst avsevärt.  
Förloppen vid 32 och 65 % r. f. visar däremot ringa skillnad.

Jämförande försök med kortvariga belastningar,  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  h, har givit underlag för ytterligare en notering :

4. Vid avlastning blir den momentana återfjädringen nästan lika stor som  $\epsilon_0$ , oavsett om belastning varat  $10^{-3}$  eller  $10^3$  h. Ett par exempel finnes dock på mindre återfjädring efter längre belastningstid.

Vid beräkning av kryp-benägna materials deformation efter avlastning eller vid växlande belastning brukar man kunna använda s. k. superposition. Det innebär, att man med positiva eller negativa tecken adderar effekten av förekommande belastningsförändringar vartefter de inträffar.

Det karakteristiska för dessa material är att ifrågavarande effekter, d. v. s. deformationer, icke är begränsade till vad som sker i ögonblicket för laständring utan utvecklas fortlöpande under all tid därefter, åtminstone teoretiskt sett. Man förstår detta resonemang bättre, om det åskådliggöres grafiskt som i figur 110, där tidsskalan är linjär i motsats till den logaritmiska gradering som använts i alla tidigare krypdiagram ( och kanske givit ett felaktigt intryck av att krypningen går fortare och fortare ).



Figur 110

Vid tiden  $t_0$  sker pålastning, som momentant medför deformationen AB. Under konstant, vilande last ökar deformationen till C under tiden  $t_1$  och skulle fortsatt att öka mot punkt D om ej avlastning skett vid C. Avlastningen medför genast en återfjädring CE, som är något mindre än AB. Om den elastiska efterverkan därefter följde samma kurvform som BC men spegelvänd, skulle kurvan skära abskissan i F, d. v. s. strax efter tiden  $t_2$ . Återfjädringen skulle sedan fortsätta förbi utgångsvärdet ( $\epsilon = 0$ ) till G vid tiden  $t_3$  och teoretiskt gå vidare hur långt som helst, vilket givetvis vore helt orimligt.

Enligt principen för superposition räknas förloppet efter tiden  $t_1$  som den adderade effekten av belastning och avlastning ( $\sigma - \sigma = 0$ ). Återfjädringen skall alltså kalkyleras från kurvan CD och ej linjen CH, och då erhålles kurvan EI, som får asymptoten  $\epsilon = \epsilon_{kvarst.}$ , d. v. s. den kvasi-permanenta deformation som varje pålastning oundvikligen medför.

För att kontrollera principens giltighet skall några exempel genomräknas.

Först väljes ett enkelt fall såsom kurvan i figur 99, vars långa avlastningstid gör den särskilt intressant. Koefficienterna för deformation under last har tidigare kalkylerats till  $\epsilon_0 = 0,097$   $\alpha = 0,109$  och  $k = 1,66$ .

Tiderna har varit

belastning	5586 h		
avlastning	33482 h	$\log = 4,5247$	( $z = 7,5247$ )
totalt	39068 h	$\log = 4,5919$	( $z = 7,5919$ )

Den kvarstående deformationen efter 39 068 h borde bli

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,097 ( 1 + 0,109 \cdot 1,66^{4,5919} ) - 0,097 ( 1 + 0,109 \cdot 1,66^{4,5247} ) \\ &= 0,004 \% \end{aligned}$$

Kurvan visar emellertid ett mycket högre värde, 0,032 %, varför kalkylen skulle ha ett fel på  $0,032 - 0,004 = 0,028$  %. Eftersom avlastningen varit långvarig, och återfjädringen tenderat att helt upphöra, föreligger tydligen en permanent deformation av ca 0,028 %. Redan vid avlastningen tycks denna ha gjort sig märkbar. Då

blev den momentana återfjädringen endast 0,072 % mot 0,097 vid pålastning. Skillnaden 0,025 stämmer bra. Försök har visat, att dessa kvarstående deformationer reduceras om provkropparna utsättes för fuktväxlingar, varför den praktiska betydelsen kan bedömas vara ringa.

För att få en något säkrare eller i varje fall mer komplett kontroll av sambandet mellan krypning och återfjädring har ett antal speciella försök genomförts med växlande på- och avlastning till olika belastningsnivåer. I några fall har därvid använts samma boardkvalitet som i exemplet ovan, d. v. s. 1/8" hård board från 1959.

Figur 111 visar ett par sådana försök, där provkropparna A och B växelvis belastats till  $\sigma_{\text{drag}} = 50$  och  $110 \text{ kp/cm}^2$  under några månader. Deformationen efter 4 cykler = 1649 h skall kalkyleras och jämföras med den observerade. Dessförinnan skall nämnas, att båda provkropparna avlastades under 12 000 h (1,4 år) efter lastcyklerna, varvid den 'kvasi-permanenta' deformationen blev 0,040 % för A och 0,042 för B.

Lasttider enl. figur 111 :

379 + 427 + 361 + 482 = 1649	log = 3,2172
427 + 361 + 482 = 1270	log = 3,1038
361 + 482 = 843	log = 2,9258
482 = 482	log = 2,6830

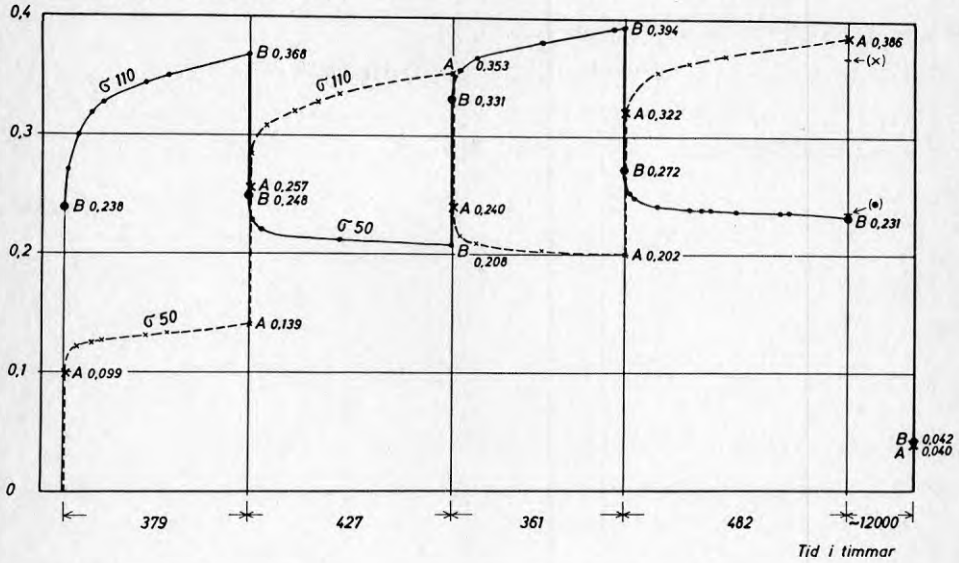
Koefficienterna tagas som förut :  $\alpha = 0,109$   $k = 1,66$ , men för  $\epsilon_0$  räknas med de värden som observerats just för dessa provkroppar A och B under den första pålastningen och avlastningen.

Kalkyl av  $\epsilon_{1649}$  för A :

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,099 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{3,2172}) + 0,118 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{3,1038}) - \\ &- 0,118 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{2,9258}) + 0,118 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{2,6830}) = \\ \epsilon &= 0,328 \% \end{aligned}$$

Om detta värde ökas med  $\epsilon_{\text{perm}} = 0,040$  erhålles  $\epsilon_{1649} = 0,368 \%$  att jämföras med  $\epsilon_{\text{obs}} = 0,386 \%.$

%  $\epsilon$  töjning 1/8" hård board 65% r.f.



Figur 111

Kalkyl för  $\epsilon_{1649}$  för B :

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,238 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{3,2172}) - 0,120 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{3,1038}) + \\ &+ 0,120 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{2,9258}) - 0,120 (1 + 0,109 \cdot 1,66^{2,6830}) \\ \epsilon &= 0,194 \% \end{aligned}$$

Om detta värde ökas med  $\epsilon_{perm} = 0,042$  erhålles  $\epsilon_{1649} = 0,236\%$  att jämföras med  $\epsilon_{obs} = 0,231\%$ .

Under förutsättning att  $\epsilon_{perm}$  beaktas, blir överensstämmelsen god för både A och B.

Försök har också genomförts med större antal lastcykler för att studera hur detta inverkar på de momentana deformationerna.

Nedanstående schema visar förloppet, när hård 1/8" board av samma sort som 'A' och 'B' ovan utsättes för omväxlande last- och viloperioder med varaktighet enl. den första kolumnen,  $\Delta t$ . Den löpande, totala tiden  $\Sigma t$  anges därbredvid.

Hård 1/8" board 1959 :

Tid h		$\sigma$	$\epsilon_{\text{mom}}$		$\epsilon_{\text{kryp}}$		$\epsilon_{\text{tot}}$	
$\Delta t$	$\Sigma t$		på	av	på	av	på	av
24	24	110	0,223		0,067		0,290	
356	280	0		0,226		0,046		0,018
24	304	110	0,233		0,043		0,294	
406	710	0		0,225		0,050		0,019
24	730	110	0,231		0,043		0,293	
146	876	0		0,219		0,044		0,030
24	900	110	0,216		0,048		0,294	
142	1042	0		0,219		0,046		0,029
24	1066	110	0,238		0,043		0,310	
..	...	.		....		....		....
..	...	...		....		....		....
24	1846	110	0,236		0,047		0,331	
165	2011	0		0,231		0,053		0,047
7000	9000	0						<u>0,015</u>

Ett 20-tal lastperioder har icke påtagligt förändrat  $\epsilon_{\text{mom}}$  eller  $\epsilon_{\text{kryp}}$ . Vid första cykeln har krypningen varit större än återfjädringen, vilket bidragit till den permanenta deformationen, liksom en liten men återkommande skillnad mellan

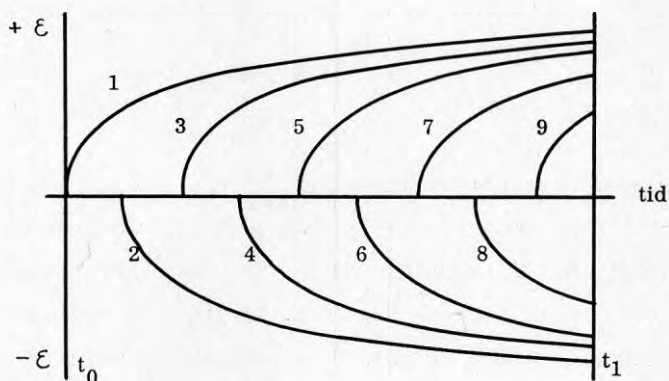
$\epsilon_{\text{mom på}}$  och  $\epsilon_{\text{mom av}}$ .

Ett liknande försök har gjorts med spånskiva och givit likartade resultat. Dock kan där tydligare iakttagas successivt minskade värden för  $\epsilon_{\text{kryp}} \left( \frac{+}{-} \right)$ , vilket stämmer med superpositions-regeln.



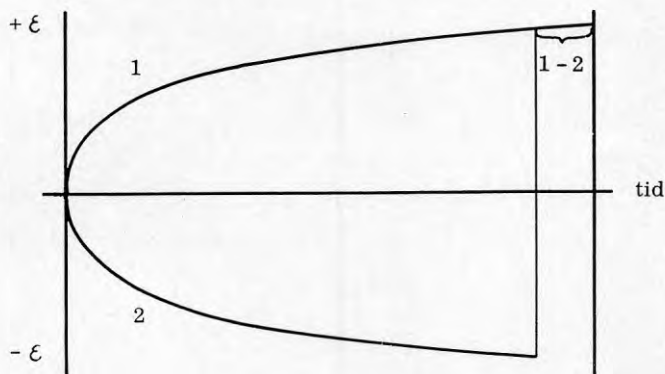
Effekten av superposition vid frekventa på- och avlastningar kan åskådliggöras med två skaror  $\epsilon_{\text{kryp}}$ -kurvor förskjutna i tiden, figur 112. Grupperna motsvarar deformation i var sin riktning.

Figur 112

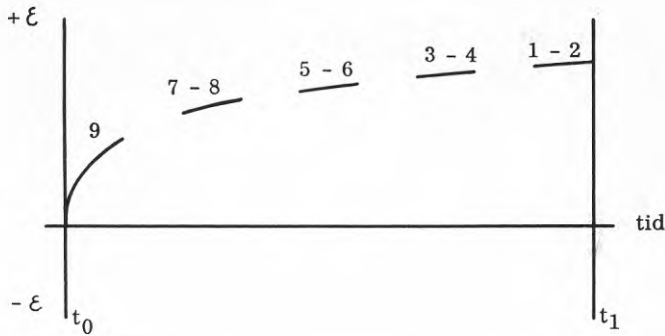


Om dessa kurvor adderas (med sina tecken  $\pm$ ), erhålles  $\epsilon$  vid t.ex. tiden  $t_1$ . Men eftersom alla kurvorna har samma form, kan uträkningen förenklas avsevärt. Man ser detta bättre om kurvorna tänkas förskjutna åt vänster så att de börjar i origo men i gengäld slutar vid olika tidpunkt. Beträktade parvis kommer kurvor med udda och jämna nummer att utjämna varandra utom på en viss sträcka såsom visas i figur 113. Kvar blir bara delar av den ursprungliga kurvan nr 1, se figur 114.

Figur 113



Figur 114



Vid stort antal på- och avlastningar av sinsemellan samma varaktighet blir den resulterande deformationen tydligen hälften av vad den skulle blivit vid oavbruten last från  $t_0$  till  $t_1$ . Har lastperioderna bara varat  $1/3$  och avlastningen  $2/3$  av tiden, blir deformationen  $1/3$  av den vid konstant last uppkomna, etc.

Genom uppdelning av lastkombinationer i konstanta och pulserande delar, kan även invecklade program lätt kalkyleras.

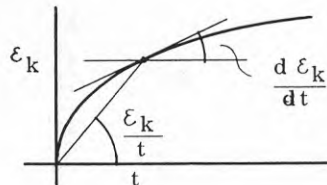
Man kan ha intresse av att känna kryptkurvornas lutning vid viss tidpunkt ( $t$  i diagrammet nedan). Det ger bl.a. möjlighet att från en iakttagen kryptning vid visst tillfälle bedöma situationen för en konstruktion som redan stått belastad längre eller kortare tid.

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \varphi) = \varepsilon_0 + \varepsilon_k ; \quad \varphi = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_0} ; \quad \varphi = \alpha \frac{k^z}{3} ; \quad z = \log \frac{t}{t_0} ;$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_0 \frac{d\varphi}{dt} = \varepsilon_0 \alpha \cdot \ln k \frac{k^z}{3} \cdot \frac{dz}{dt} = \varepsilon_0 \alpha \cdot \ln k \frac{k^z}{3} \cdot \frac{1}{\ln 10} \cdot \frac{1}{t} ;$$

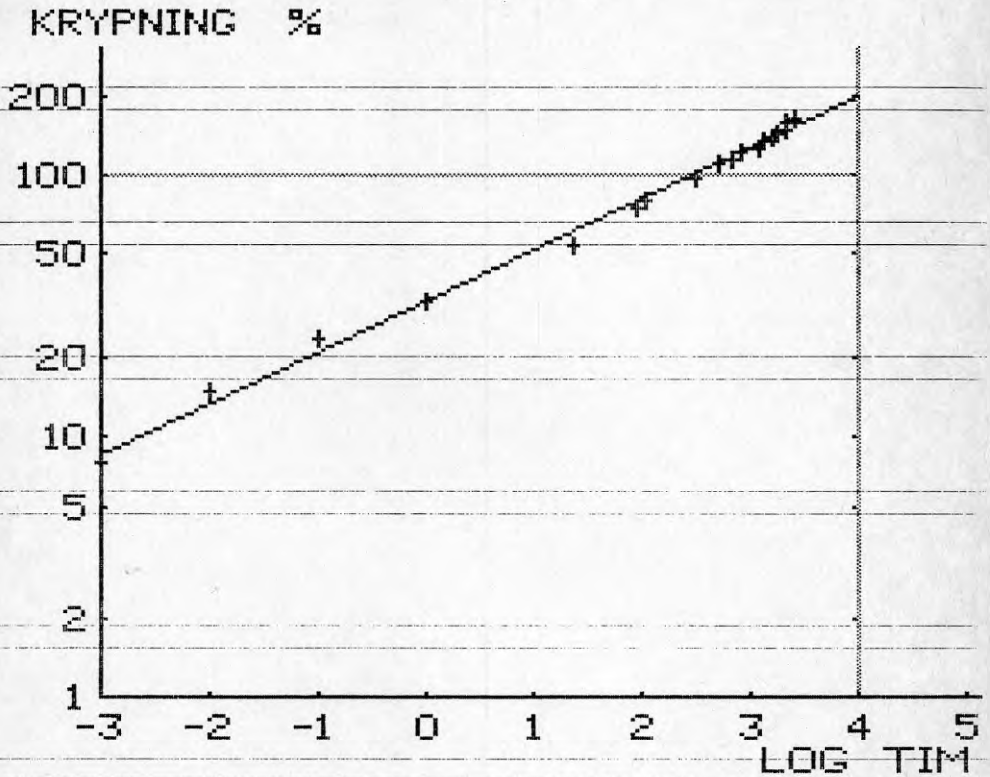
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \varepsilon_0 \frac{\ln k}{\ln 10} \cdot \frac{1}{t} \cdot \varphi = \frac{\ln k}{\ln 10} \frac{\varepsilon_k}{t} ;$$

$$\frac{d\varepsilon_k}{dt} = C \frac{\varepsilon_k}{t} ; \quad \text{där} \quad C = \log k$$



PROV: **NKB L 1** (enstaka provkropp)  
spånskiva

STARTKRYPNING % 8  
KORRELATIONSKOEFF. 0.9976

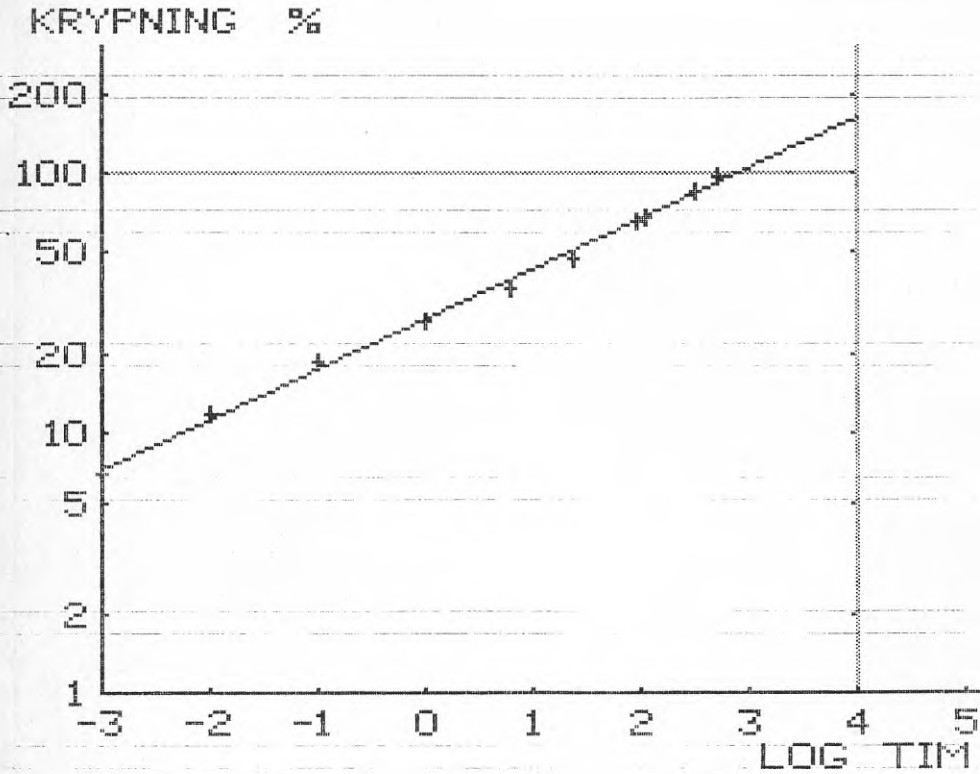


KALK E-MODUL	0.01 TIM	3167	0.001	TIM	3309
=====	0.1	2969			
	1	2702			
	10	2370			
	100	1986			
	1000	1584			
	10000	1203			

REGRESSIONSKURVANS EKVATION,  $\text{LOG } Y = 0.195 * \text{LOG } X + 1.517$

PROV: **NKB TV 2** (enstaka provkropp, spånskiva)

STARTKRYPNING % 7  
 KORRELATIONSKOEFF. 0.998



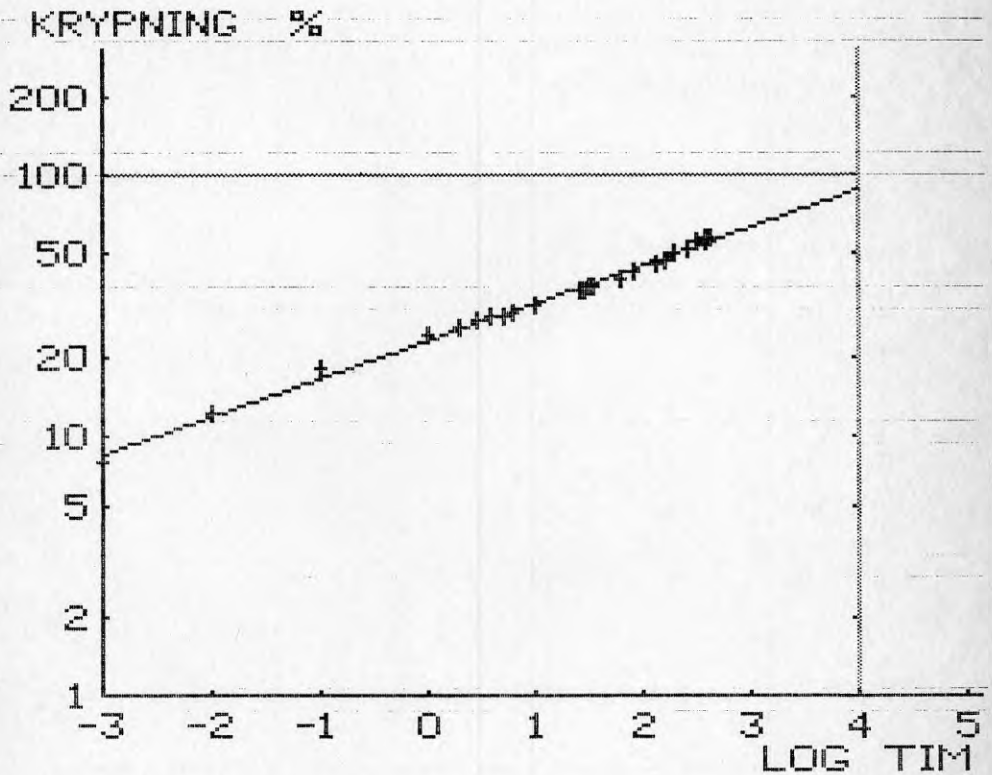
KALK E-MODUL	0.01 TIM	3605	0.001	TIM	3741
=====	0.1	3412			
	1	3150			
	10	2812			
	100	2411			
	1000	1972			
	10000	1536			

REGRESSIONSKURVANS EKVATION,  $\text{LOG } Y = 0.192 * \text{LOG } X + 1.438$

PROV: NKB L 1

KORRELATIONSKOEFF. 0.997

AVLASTNING 'SUPERPOSITION'



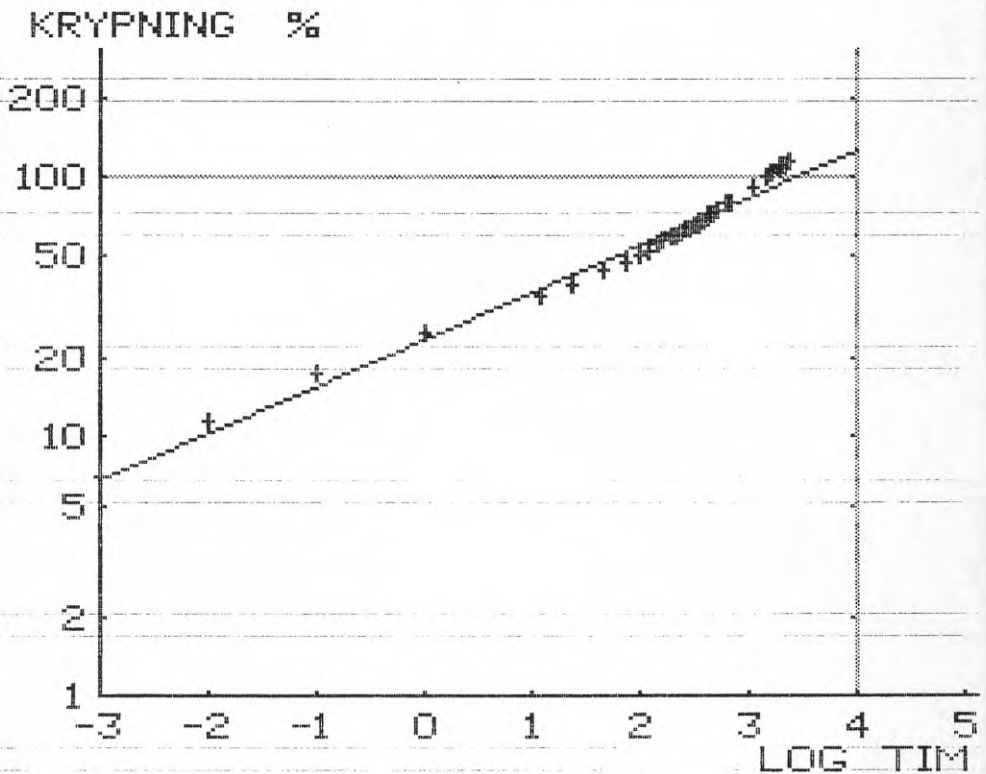
KALK KRYPN %	0.01 TIM	12	0.001	TIM	8
=====	0.1	17			
	1	23			
	10	32			
	100	45			
	1000	63			
	10000	87			

REGRESSIONSKURVANS EKVATION,  $\text{LOG Y} = 0.145 * \text{LOG X} + 1.363$

PROV: NKB TV 2

KORRELATIONSKOEFF. 0.992

AVLASTNING 'SUPERPOSITION'



KALK KRYPN %	0.01 TIM	10	0.001	TIM	7
=====	0.1	16			
	1	24			
	10	36			
	100	55			
	1000	84			
	10000	128			

REGRESSIONSKURVANS EKVATION,  $\text{LOG } Y = 0.182 * \text{LOG } X + 1.377$

ur FIOLER av Anne Nilsson  
ICA Västerås 1981

### Trä till fiolbygge

I fiolmakarskråets sägenomspunna historia ingår bilden av mästare som strövar omkring bland de kraftiga alpgrannarna och slår med sin träklubba, för att lyssna sig fram till det bästa materialet för de finaste instrumenten. Man kan gärna tänka sig att det sjunger olika i trädstammarna och att mästare söker efter en viss klangfärg.

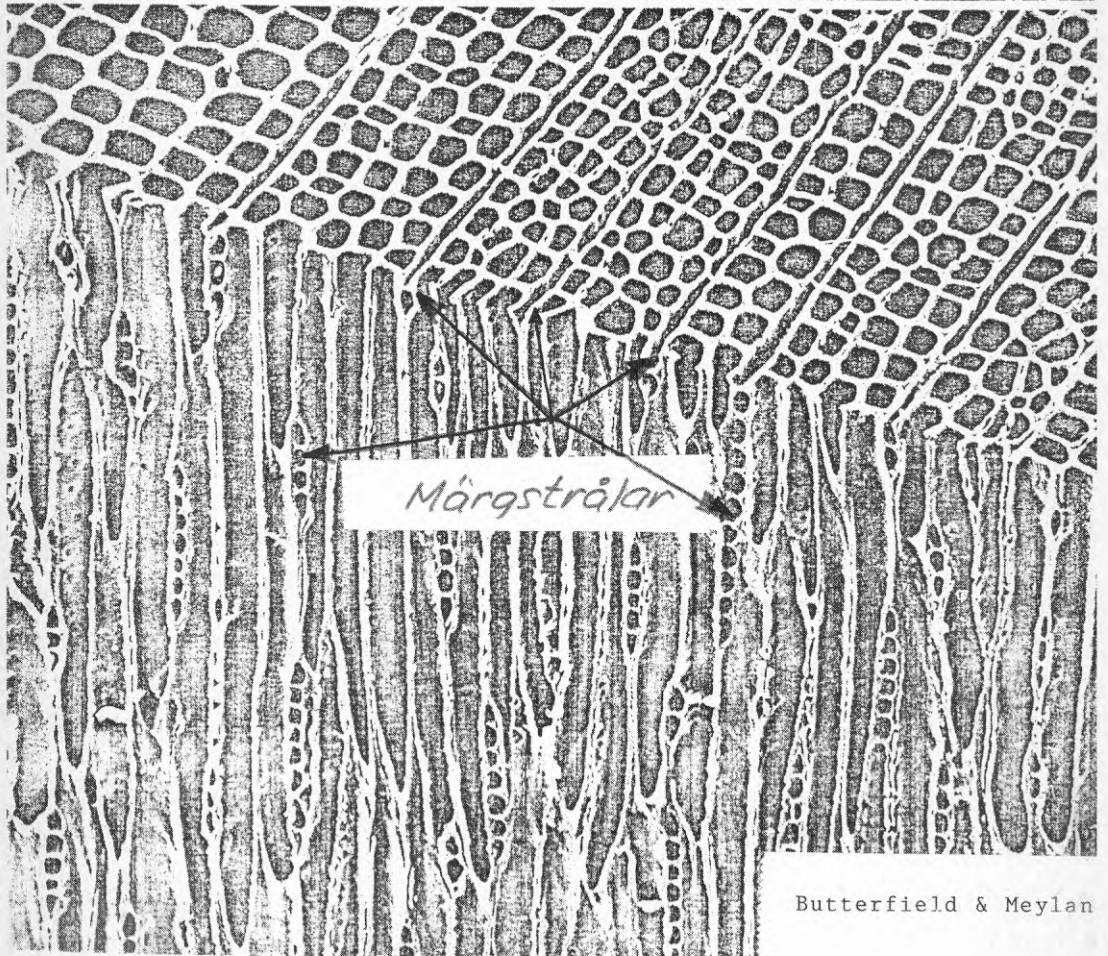
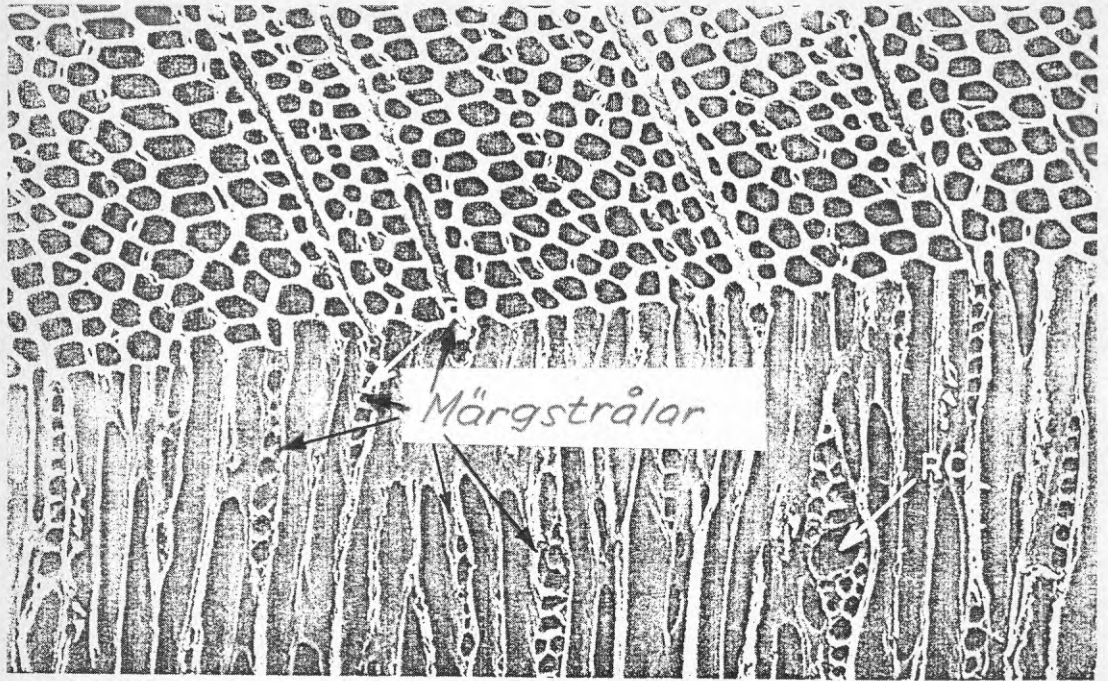
Men tänk längre: Han behöver komma ihåg klangerna under allra minst fem år, som det tar innan träet har torkat så att det går att använda. I det torkade träet är ju klangen helt annorlunda. Ett ordentligt svar på om det var en god kvalitet får han inte förrän fiolen är färdig, och då är det en mängd andra egenskaper hos fiolen som har betydelse för resultatet. Det behövs alltså ett sjusärdeles minne och en mycket lång följd av år, för att man skall kunna få något jämförelsematerial att lära sig av vid bedömningen av klangen på det växande trädet.

En enklare metod, som säkert praktiserades redan på senmedeltiden, är att se på trädens växt och förekomsten av kvistar. Sitter årsringarna tätt och jämnt har trädet vuxit långsamt och träet blir starkt och hårt, möjligt att arbeta ut till de tunna plattor som är fiolens lock och botten.

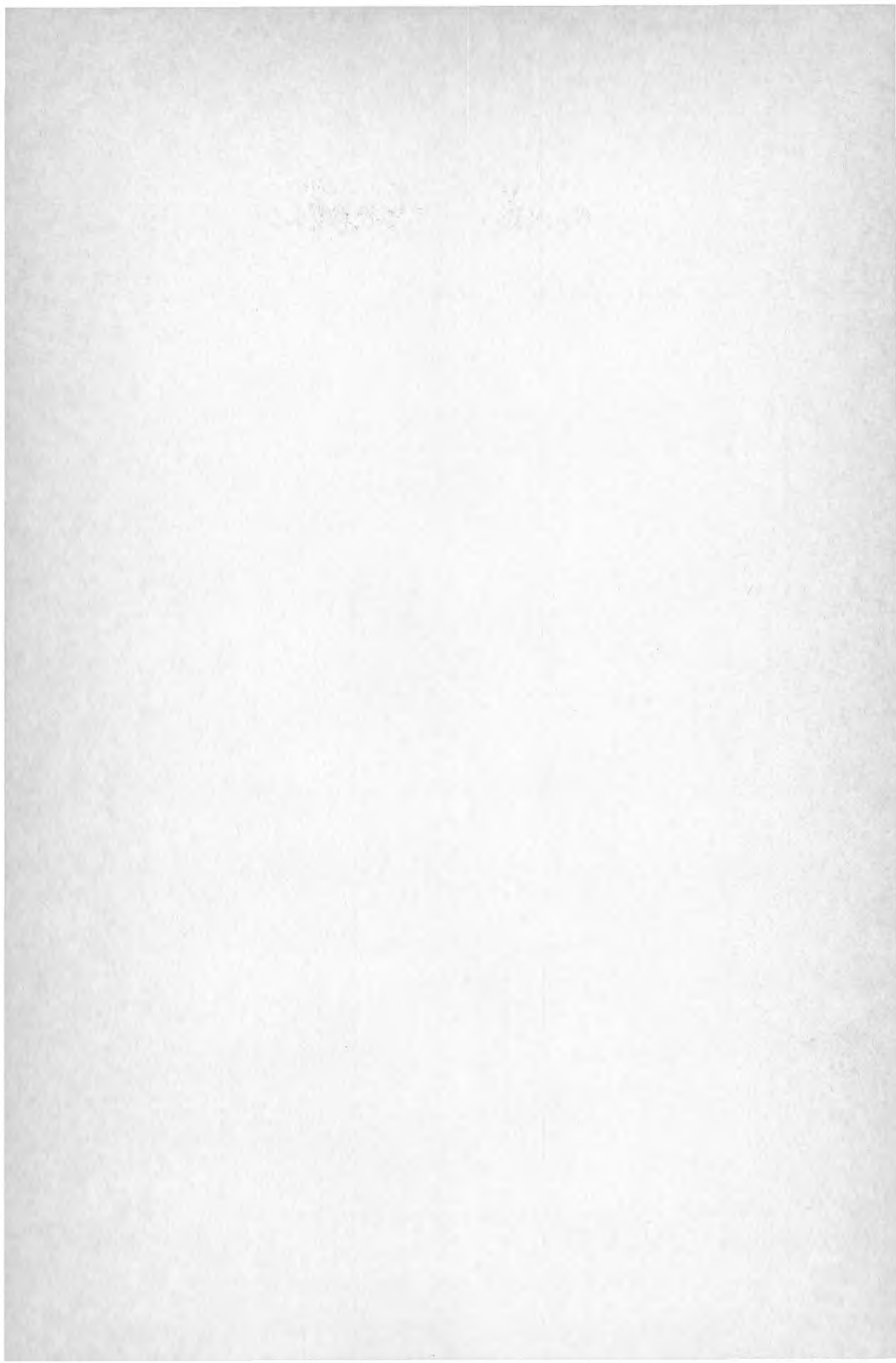
En kräsen fiolbyggare väljer helst trä som har torkat i flera år eftersom trä förändrar sig under torkningen.

En annan aspekt vid valet av trä är den rent estetiska. En vacker ådring och flammorna i lönnen betyder mycket för det färdiga instrumentets utseende. Men även om en djupt flammig lönnbotten med det rätta genomskinliga lacket gör fiolen till en skimrande pärla, så är regeln till för att överträdas. De stora mästarna har kunnat bygga utsökta instrument, både utseendemässigt och ljudmässigt med lönn nästan utan flamning, med snabbvuxen gran eller helt annat trä. Ju större hantverksskicklighet, desto större friheter kan man ta sig. En nybörjare måste kompensera sin okunnighet med större lagbundenhet.

-----









**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840353-7  
från Statens råd för byggnadsforskning till S Åke Lundgren  
Ingenjörbyrå AB, Nyköping.**

**R32:1988**

**ISBN 91-540-4880-X**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6708032**

**Abonnemangsgrupp:  
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**Cirka pris: 30 kr exkl moms**