

MÅLINGER AF FUGTTRANSPORT I TRÆ
MED GAMMA-MÅLEUDSTYR

CIV.ING. LIC. TECHN. ANKER NIELSEN
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

JANUAR 1977
MEDDELELSE NR. 53

1. Indledning

Træs fugtindhold er af stor betydning for dets anvendelse i konstruktioner. Et højt fugtindhold medfører risiko for svampeangreb samt stærkt faldende styrke. Samtidig er træ, som et naturmateriale, født med et højt fugtindhold på op til 200% vægt. Under normale brugsforhold skulle træet ikke ligge over 12% vægt. Det vil sige, at en udtørring er nødvendig. Denne udtørring foretages efter empiriske regler, idet kendskabet til træets fugttransportkoefficienter er mangelfuldt.

Denne undersøgelse giver en række informationer om træets fugtforhold, som er målt med et nyudviklet γ -måleudstyr. Denne undersøgelse af træets fugttransport er blevet gennemført i løbet af 1975 og 76 med støtte fra Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd samt en legatportion af TRÆFONDENS uddeling i 1975.

2. Teori for fugttransport

Træ kan indeholde vand i 2 former, dels vand bundet til fibre kaldet hygroskopisk bundet vand, og dels frit vand i cellehulrummene kaldet kapillært bundet vand. Når træet er friskt, indeholder det vand af begge former, mens det som tørt kun indeholder hygroskopisk vand. Under udtørringen passerer det punkt, hvor vandet ikke mere indeholder kapillært vand. Dette punkt kaldes fibermætningspunktet og har stor betydning, idet en udtørring herunder medfører svind.

Ved en udtørring er det vigtigt, at træet ikke har alt for store fugtgradienter, når fibermætningspunktet passerer. Hvis det sker, vil der opstå trækspændinger og revnedannelser. Dette giver selvfølgelig anledning til en dårligere kvalitet. Da fordampningen sker fra overfladen, er der en risiko for, at transporten af fugt fra det indre af træet ikke kan følge med fordampningen. Tørringshastigheden

bliver derfor af væsentlig betydning. Da træ er anisotrop, finder man, at udtørringshastigheden er væsentlig forskellige i træets 3 hovedretninger, størst i fiberretningen, mindre i radiær retning, og mindst i tangential retning. Forholdet mellem tørringshastighederne i den nævnte rækkefølge er ca. 20:2:1. Desuden har træsorten betydning. Eventuelle fejl i træet kan også komme til at influere på resultaterne.

Vandopsugning foregår efter de samme regler, som gælder for udtørring, f.eks. vedrørende hastighederne i de 3 retninger. Det gælder specielt, at kernetræ opsuger fugt meget langsommere end splint.

Vandindholdet i træ ved ligevægtstilstanden er afhængig af den omgivende lufts temperatur og relative fugtighed. Derfor skal træ helst bringes ned på samme fugtindhold, som det senere skal bruges ved under udtørringen.

3. Målinger af fugtindhold

Målingerne foretages med Laboratoriet for Varmeisolering nye gamma-måleudstyr, som kan foretage målinger med forskellig afstand mellem kilde og detektor. For disse forsøg er dog altid anvendt 20 cm. Kilde og detektor kan flyttes med 5 mm spring over en højde på 40 cm. Ved målingerne anvendes en 100 mCi Am^{241} kilde, som udsender 60 keV gammastråling. Detektoren er en scintillationsdetektor med NaI krystal. Ved hjælp af kollimatorer sikres, at strålen har en udbredelse på ca 5 mm i højden og 10 mm i bredden.

Registreringen af den modtagne stråling sker ved brug af et digitalt ratemater (DILORA), som angiver resultatet på et display. Disse tal overføres til en papirstrimmel ved hjælp af en FACIT-puncher.

Styringen af målingen foregår fra en elektronisk styrekasse med fingerhjul og knapper. Med fingerhjulene kan det bestemmes, hvor der skal måles. Ved hjælp af knapperne kan man få målingen til at ske automatisk, idet elektro-

nikken styrer en motor, som flytter kilde-detektor og standser ved målepunkterne. Det betyder, at det kun en gang i døgnet er nødvendigt at se til udstyret, da papirstrimlen kun kan indeholde ca. 32 timers målinger.

Ud fra måleresultaterne kan fugtindholdet beregnes, idet der benyttes formlen:

$$\psi = \frac{\ln N_0 - \ln N_\psi}{\mu \cdot \rho \cdot x}$$

hvor ψ = fugtindholdet (m^3/m^3)
 μ = absorptionskoefficienten for vand (m^2/kg)
 ρ = densiteten for vand (kg/m^3)
 x = stenens tykkelse (m)
 N_0 = intensiteten med fugtindhold 0 (impulser/sek)
 N_ψ = intensiteten med fugtindhold ψ (impulser/sek)

4. Forsøg med udtørret træ

Det er valgt at koncentrere sig om konstruktionstræ, i første omgang fyr. Her er kernetræ blevet undersøgt. Der er blevet udført forsøg med op sugning fra en fri væskeoverflade og udtørningsforsøg fra stykker, der er blevet vandfyldt under vacuum. Det kan nævnes, at målingerne viser, at alene det at fylde et stykke træ med vand er noget af et problem, hvis fugtindholdet skal være ens i hele stykket. Desuden er der senere udført udtørningsforsøg med splint og kerne med naturligt fugtindhold.

4.1. Opsugning

Der er blevet udført 2 op sugningsforsøg med fyr, hvor op sugningen er sket i fiberretningen. Prøvestykkerne var ca. 10 cm høje og længde og bredde på ca. 6 cm. Overfladen af prøverne, undtagen de 2 endeflader, blev dækket med sort diffusionstæt tape. Prøven blev stillet med den ene endeflade ned i vand. Herefter blev fugtfordelingens variation med tiden bestemt med gamma-stråling.

Fig.1 viser resultatet af det første forsøg. Det ses, at op sugningen sker nogenlunde jævnt, efterhånden som tiden

går. Det går væsentligt langsommere end gasbeton. I forhold til gasbeton er der også en anden væsentlig afvigelse. For træ når ingen af lagene at komme i fugtlige vægt inden for de ca. 170 timer, forsøget har varet. Ved gasbeton når det første lag sin lige vægtstilstand i løbet af en time. Herefter forbliver fugtindholdet konstant i dette lag. Dette sker ikke for træ, formodentlig på grund af træets organiske struktur, som medfører svelning af træet ved op sugningen. I dette tilfælde (fig.1) bliver fugtindholdet ikke ret højt. Det skyldes, at træstykket har mange årringe pr. cm. Dette forhold giver en stærkere struktur, som samtidig er tættere og dermed hindrer fugttransport i større omfang.

Det andet forsøg (fig.2) viser et billede af fugttransporten, som svarer meget til det første, men bemærk, at fugtindholdene nu er blevet 3 gange så store. Stadig er der ikke opnået fugtlige vægt i laget lige ved den frie væskeoverflade. Omkring ved 132 timer viser nogle af kurverne et dyk. Det skyldes en fejl ved en af fugtfordelingerne. Det har altså ingen fysisk betydning. Man kan også bemærke, at fugtindholdet i den øverste del af prøvelegemet falder, efterhånden som tiden går. Det kan muligvis skyldes fordampningen fra overfladen, men træets ekspansion ved fugtopsugningen kan også have betydning.

Et forsøg på at beregne fugttransportkoefficienterne fra disse kurver har ikke været mulig, idet det program, som anvendes for gasbeton ikke umiddelbart kan bruges. Det er også af interesse at bemærke, at op sugningen ikke viser ændringer ved fiber mætningspunktet, som for disse stykker ligger omkring 9% vol.

4.2. Udtørring

Ved udtørningsforsøg er noget af det vigtigste at sikre sig, at prøverne bliver pakket diffusionstæt ind. Dette har kunnet gøres ret let, idet en sort tape, 3M, giver meget fine resultater ved forsøg, som varer op til 2 måneder.

ØPSUGNINGSFØRSØG

SPECIMEN NUMBER = 370

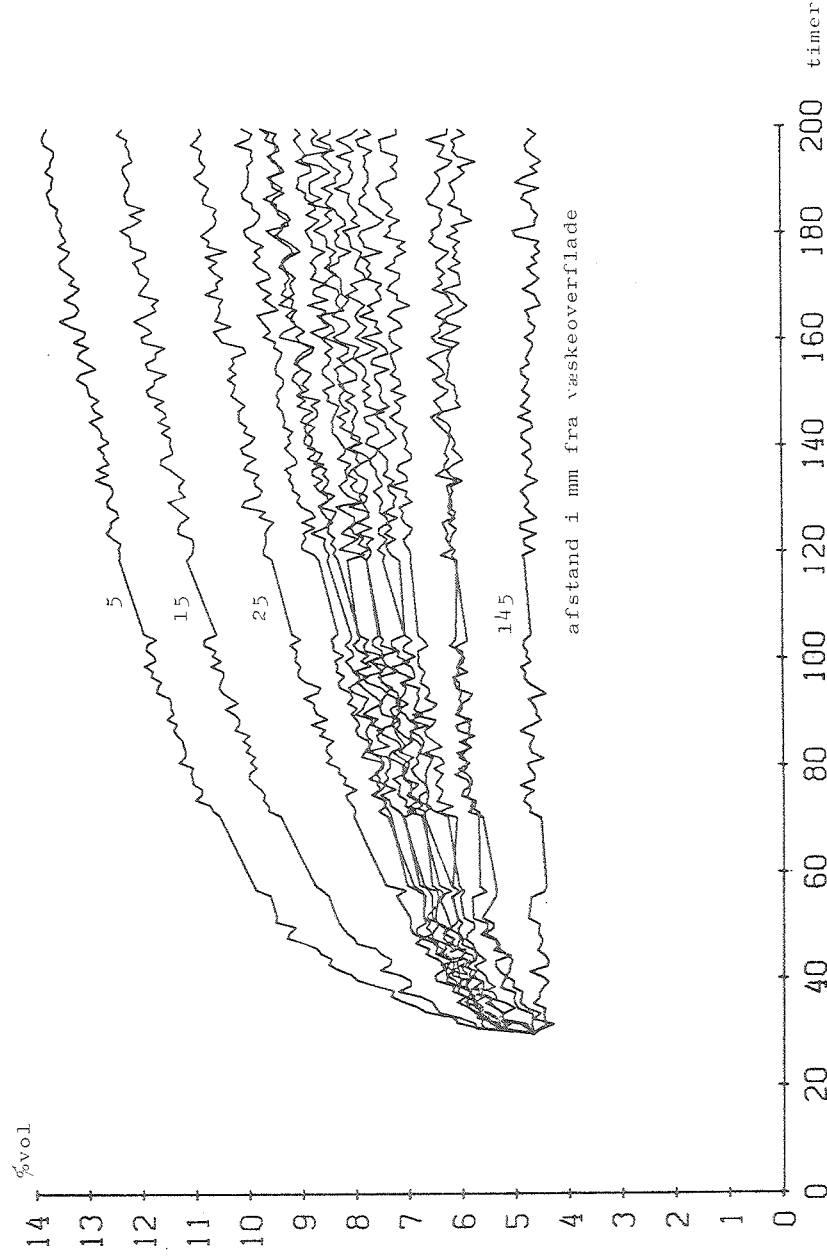


Fig. 1. Fugtfordelinger i træ (fyr) under opsuigningsforsøg (i fiberretningen).
Hver kurve angiver fugtvariationerne i en bestemt højde.

ØPSUGNINGSFØRSØG

SPECIMEN NUMBER = 371

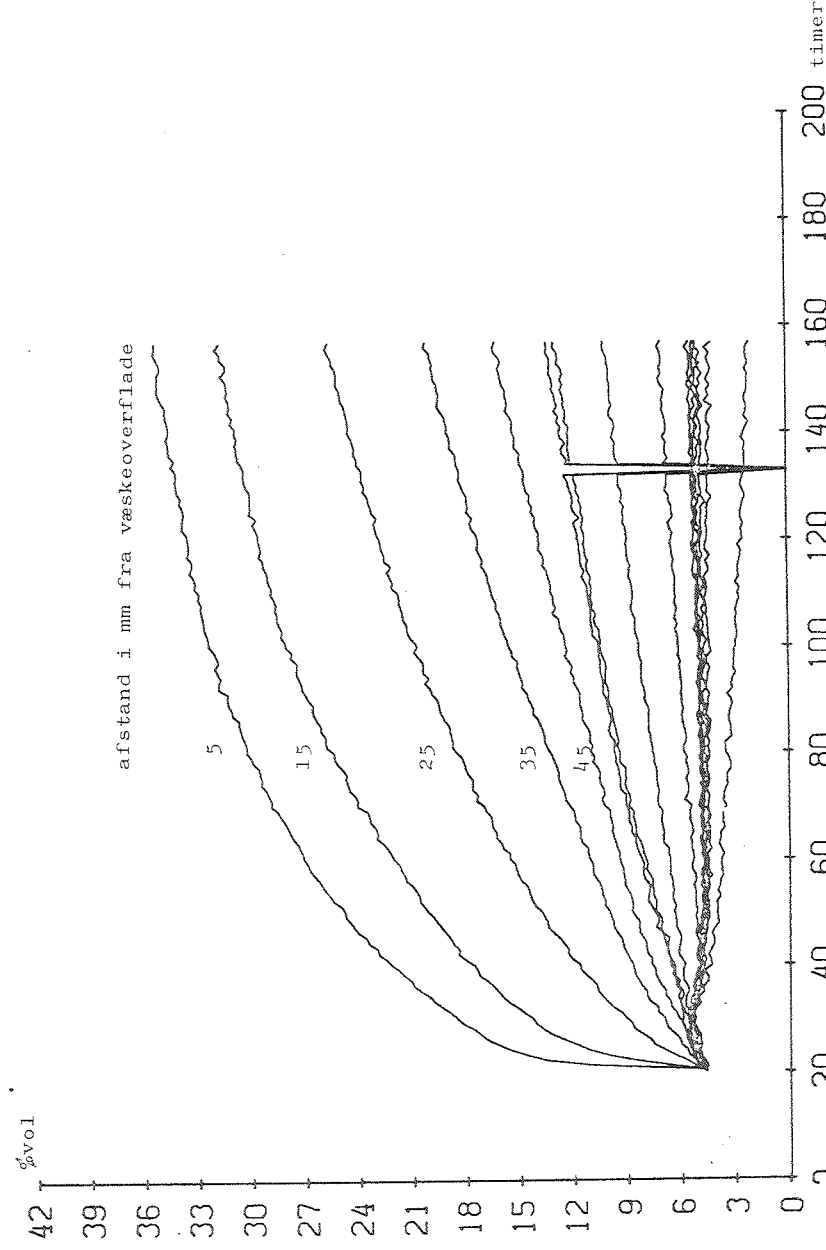
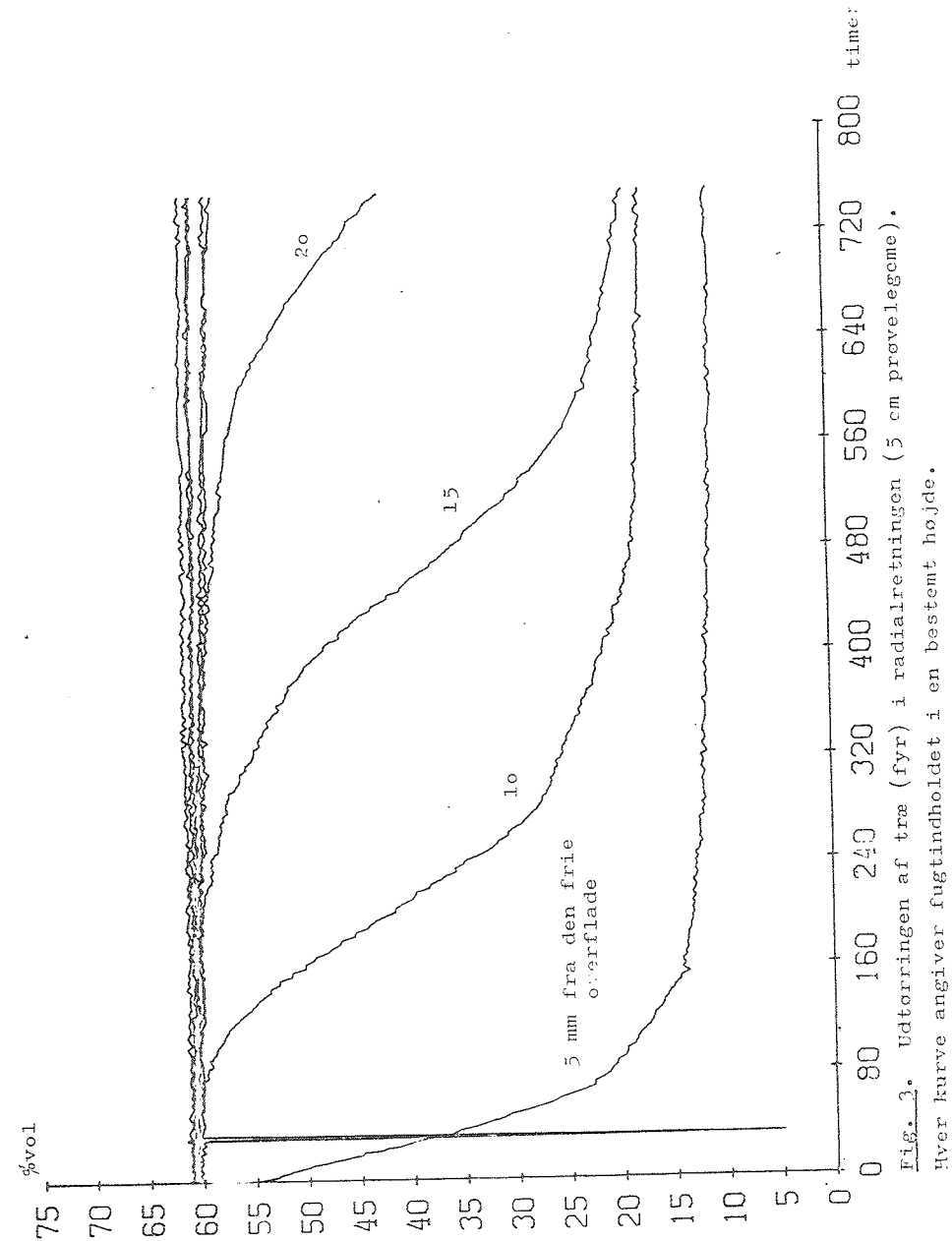


Fig. 2. Fugtfordelinger i træ (fyr) under opsuigningsforsøg (i fiberretningen).
Hver kurve angiver fugtindholdet i en bestemt højde.

Dette kan ses af de målte fugtfordelinger, som vi vil komme tilbage til. Et andet problem er at fylde prøverne med vand. Dette er gjort ved at lægge prøverne i vand og derefter sætte vacuum på. Det medfører, at luften i porerne slipper ud, og når undertrykket derefter fjernes, kommer vandet ind i porerne. Forsøg har vist, at det ikke er godt at tage prøverne op lige efter, at undertrykket er fjernet, idet der helst skal gå et par døgn, hvor prøverne ligger i vand ved almindeligt atmosfæretryk. Man finder ved denne vandmætning, at fugten trænger forskelligt ind i materialet afhængig af træets 3 hovedretninger. I overfladen fås fugtindhold på ca. 75% vol, mens der inderst i træet er ca. 35% vol. Fugtindtrængningen er størst i fiberretningen. Af den grund er det ikke helt ligegyldigt i hvilken retning, man måler fugtindholdet. Ved en måling i fiberretningen vil man finde ca. det samme fugtindhold i alle lag. Ved en måling vinkelret på fibrene varierer fugtindholdet fra 75 til 35% vol. I den tredje retning afhænger det af, hvilket sted man måler.

Der er indtil nu udført 3 forsøg med udtørring af træ, dels i fiberretningen, og dels i radialretningen. Prøvestykkerne var ca. 5x5x5 cm. Fig. 3 viser udtørringen i radialretningen. Hver kurve angiver fugtindholdet i en bestemt højde. Det ses klart, at udtørringen i materialet skrider gradvist frem gennem materialet, således at lagene tømmes et for et. Det må betyde, at porerne forhindrer transport fra det våde indre til overfladen af træet. Det fremgår tydeligt, at fugtindholdet i de enkelte lag ikke falder under de 60% vol, før fordampningen fra det enkelte lag kan ske til andre lag, der er tømt for frit vand. Derfra sker den videre fordampning til den omgivende luft. Dette er i modsætning til udtørringen af gasbeton, hvor der sker en væsketransport gennem pore-systemet over hele prøvelegemets højde, så fugt længst væk fra overfladen også flyttes. Herved falder fugtindholdet. Det kan også ses, at fugtindholdet ved udtørringen af træet ender ved fibermætningspunktet, som svarer til ca. 15% vol. En udtørring ud over fibermætningspunktet vil tage væsent-

SPECIMEN NUMBER = 372



ligt længere tid, da kun de første 20 mm er udtørret på 750 timer.

Fig.4 viser udtørringen i fiberretningen. Som det fremgår, er denne udtørring helt anderledes end i radialretningen. Det viser sig, at fugtindholdet næsten øjeblikkeligt begynder at falde gennem hele prøvens tykkelse. Det er ikke så mærkværdigt, at fugttransporten i fiberretningen går hurtigt, idet træets naturlige vandopsugning sker i fiberretningen. Dette udtørningsforløb ligner langt mere gasbetons, end udtørringen i radialretningen. Det kan også bemærkes, at udtørringen i denne retning tilsyneladende ikke lader sig influere af fibermåtningspunktet.

Fig.5 viser et yderligere udtørningsforsøg i radialretningen. Det minder meget om det tidligere (fig.3) ., så udtørningsformen kan ikke være en tilfældighed. Dette forsøg er stoppet efter 1000 timer.

4.3. Kapillarledningstallet

For at kunne beregne kapillarledningstallet, må der ske en beregning af fugtfordelingerne til en række tidspunkter efter hinanden. For at det kan ske nøjagtigt, er det nødvendigt at foretage en udjævning af fugtfordelingerne efter mindste kvadraters metode.

Fig.6 viser et eksempel på denne udjævning. Det ses, at tilnærmelsen til en række parabler er ganske god. Variationerne i de målte værdier svarer ganske godt til gammastrålingens statistiske natur. U fra disse fugtfordelinger kan kapillarledningstallet beregnes, som omtalt i Nielsen [1]. Som et eksempel er vist Fig.7 med resultatet fra udtørringen af prøve nr.379. Der ses et maksimum i kapillarledningstallet, som ikke er helt rigtigt. De øvrige punkter er også behæftet med fejl på grund af, at fugtfordelingen over prøvelegemet for det enkelte tidspunkt sammensættes af 2 parabler. Denne løsning er dårlig, når fugtindholdet sti-

SPECIMEN NUMBER = 379

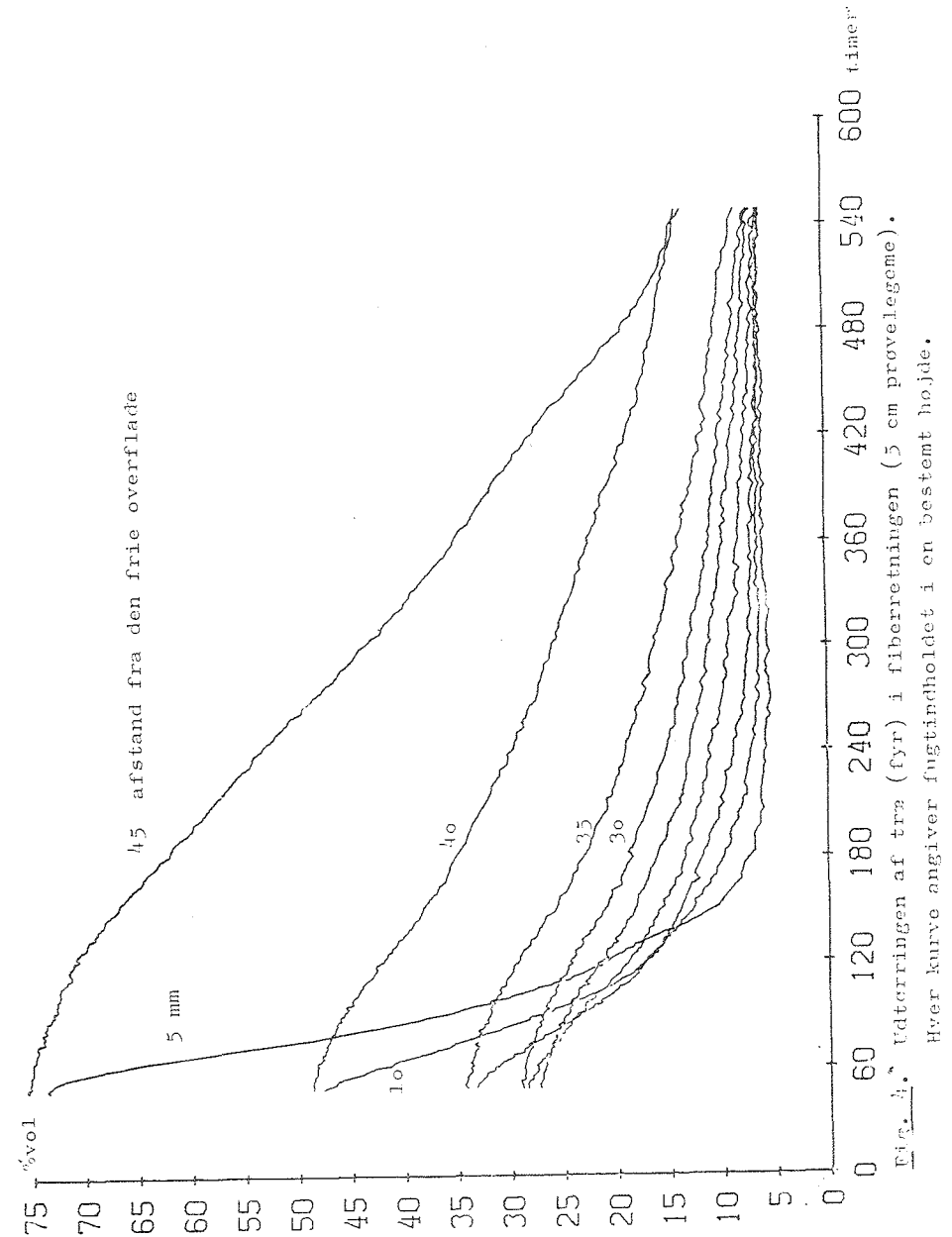


Fig. 4. Udtørringen af træ (fyr) i fiberretningen (5 cm prøvelegeme). Hver kurve angiver fugtindholdet i en bestemt højde.

SPECIMEN NUMBER = 378

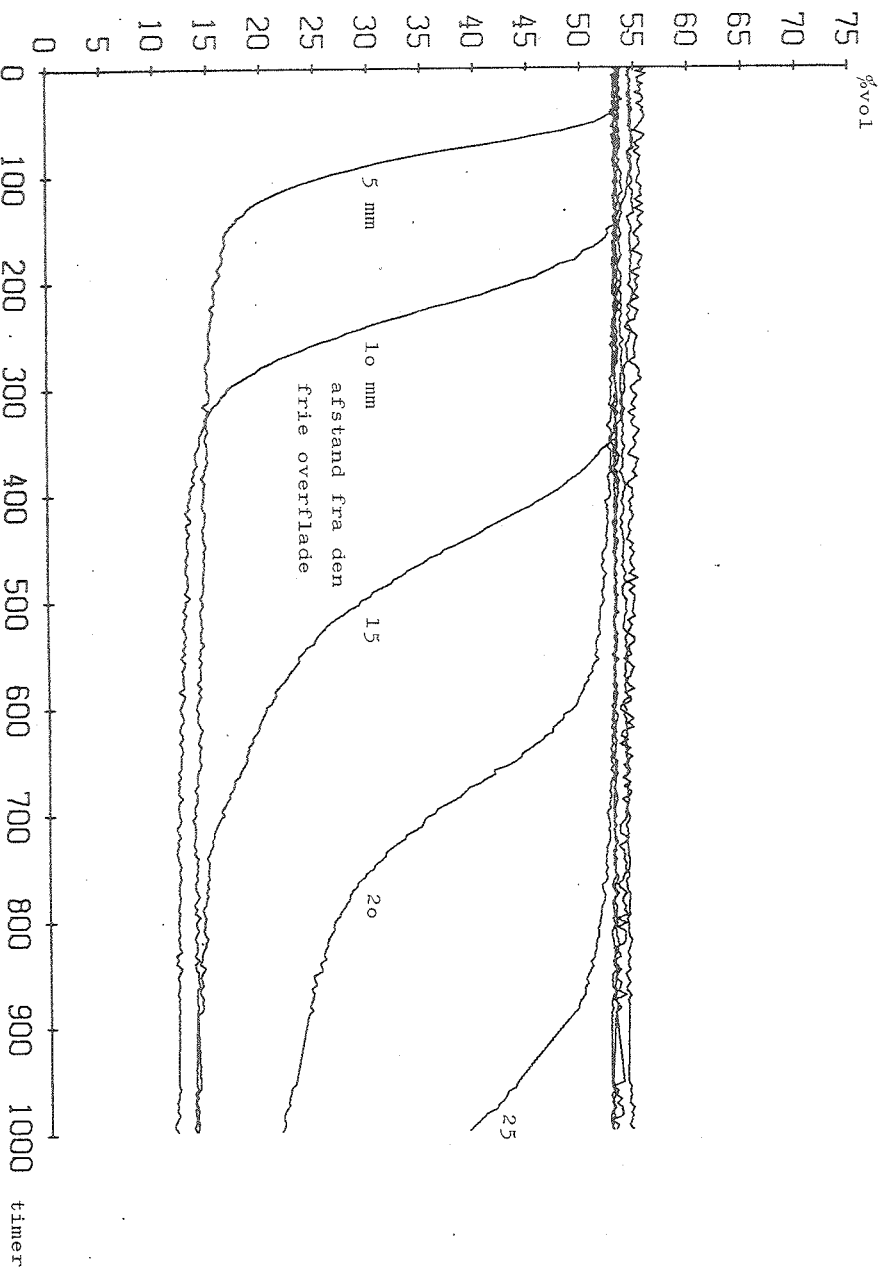


Fig. 5. Udtørringen af træ (tyr) i radialretningen (5 cm prøvelegeme). Hver kurve angiver fugtindholdet i en bestemt højde.

11.

%vol

12.

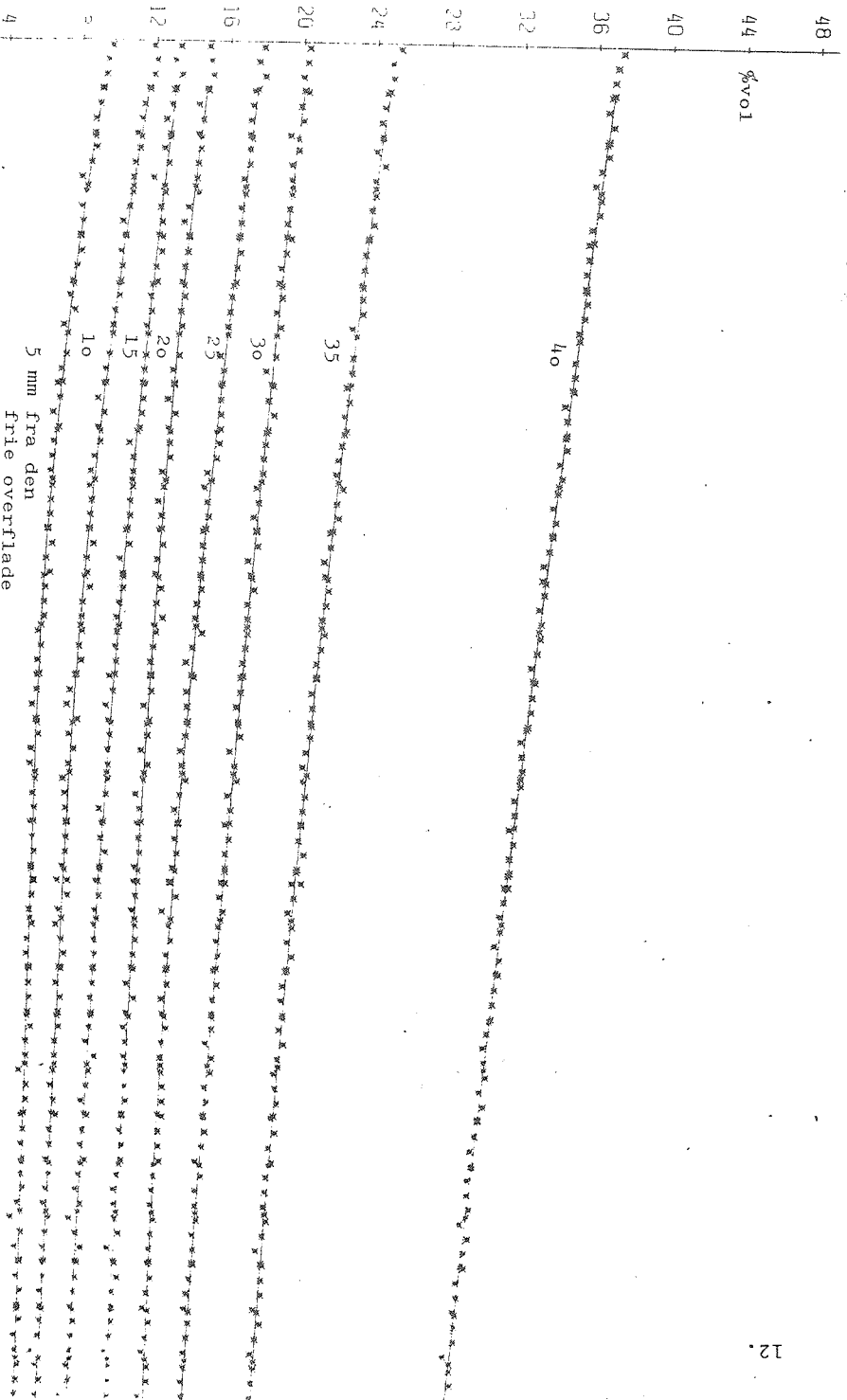


Fig. 6. Udgjævning af fugtvariationerne for udtørningsforsøg (379). * er målte værdier. Kurverne angiver de udjævrede værdier for hver højde.

timer

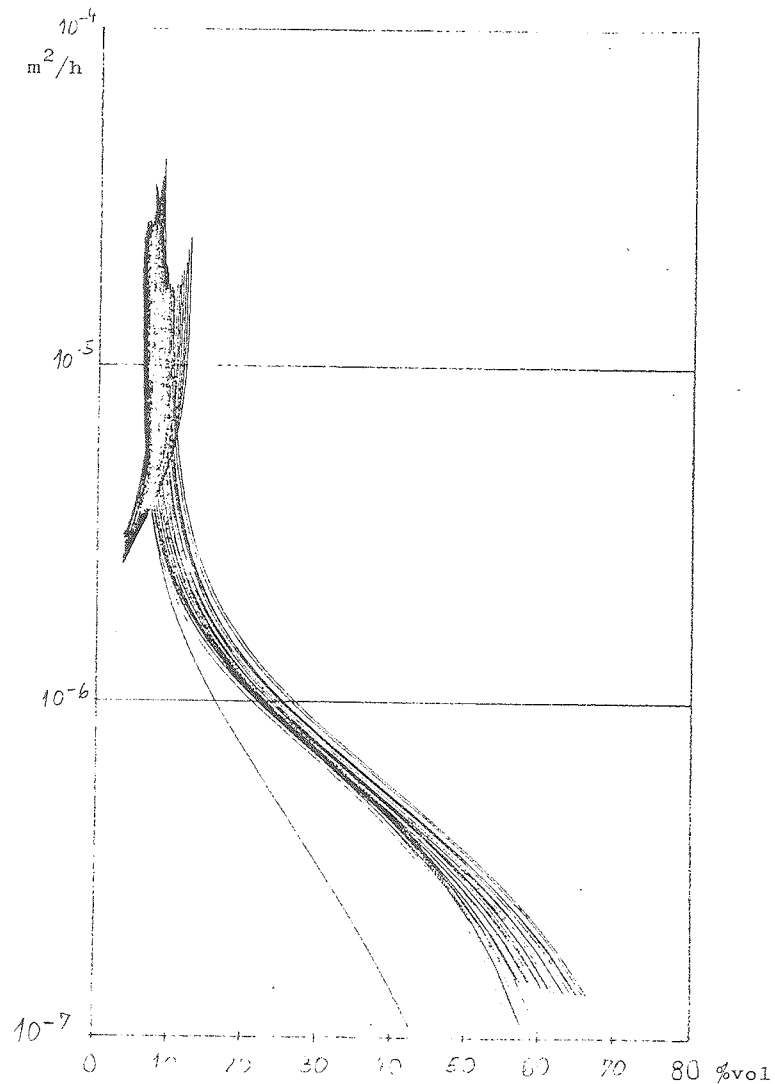


Fig. 7. Kapillarledningstallet for træ i fiberretningen beregnet fra udtørningsforsøg. Gamle beregningsmetode.

ger meget stejlt indenfor et meget snævert interval, ca. 30% vol. på 5 mm. Tilnærmelsen bliver derfor uheldig, som det fremgår af Fig.8.

Den eneste løsning er derfor at finde kurve-tilnærmelsen, som kan udvise store ændringer i fugtindholdet inden for snævre intervaller. Desuden skulle de kunne give jævne overgange til de 2 dele af prøven, som har tilnærmelsesvis konstant fugtindhold. Dette kan løses ved brug af Spline-funktioner, som giver kurver, hvor hældningskoefficienten og krumningen er kontinuerte over delepunkter. Sådanne kurver har tidligere været brugt til beregning af kapillarledningstallet ved opslugningsforsøg, f.eks. for gasbeton, Nielsen [2]. Det ville derfor være nærliggende at anvende samme EDB-program, som brugtes ved opslugningen. En nærmere undersøgelse viste, at det var muligt, hvis der blev foretaget nogle få ændringer i grænsebetingelserne for beregningen. Derefter blev metoden brugt til beregning af kapillarledningstallet fra udtørningsforsøg. Fig.9 viser resultatet for prøve 379. En sammenligning med den tidligere beregningsmetode viser, at der sker visse ændringer i resultaterne, især for fugtindhold over 20% vol. En sammenligning med Fig.8 viser, at Spline-funktionen i området 20-40% vol. er for stejl, og det fører til, at de beregnede kapillarledningstal bliver for lave.

Fig.10 viser kapillarledningstallet i radialretningen, beregnet med den nye metode. Resultaterne viser, at kapillarledningstallet, som før, er afhængigt af fugtindholdet samt, at træets hovedretninger har væsentlig betydning. Værdierne ser, som ventet, ud til at blive lavere end i fiberretningen.

WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 379
CARD TYPE = 22

TIME INTERVAL FROM: 9.9 TO: 102.3 EXP. HOURS
HEIGHT INTERVAL FROM: 1.0 TO: 4.0 CENTIMETER
EXP. CONDITIONS NR. 0
DATE OF PLOTTING 6 - - 8 - - 75

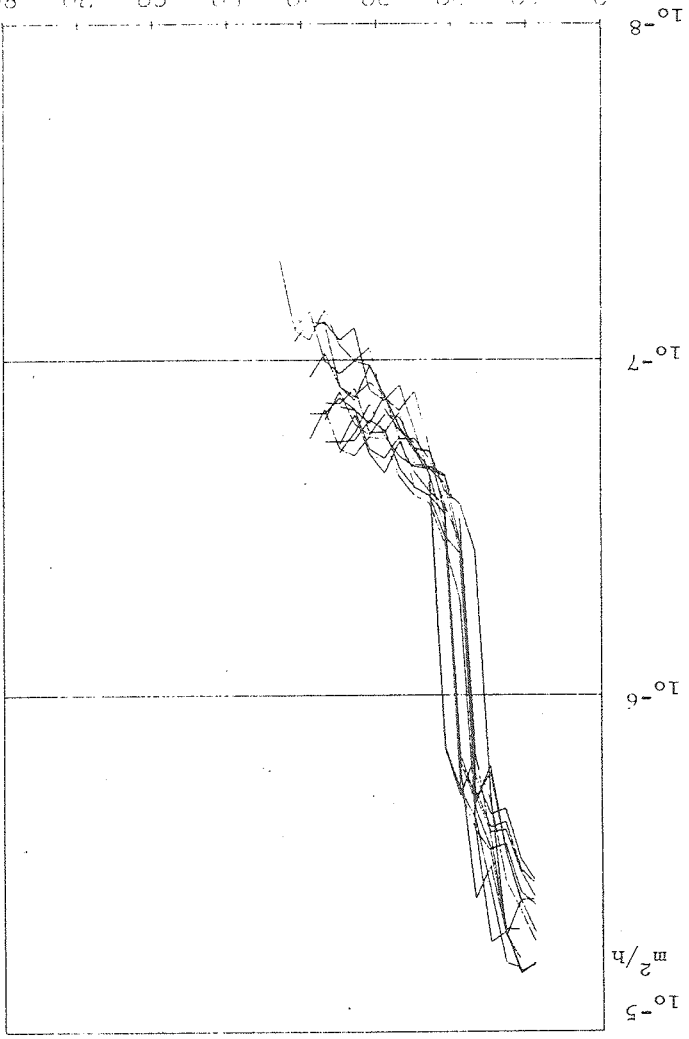


Fig. 9. Kapillarmedningstallet for tre i fiberet-
ningen beregnet fra udtørningsforsøg. Nye bereg-
ningsmetode.

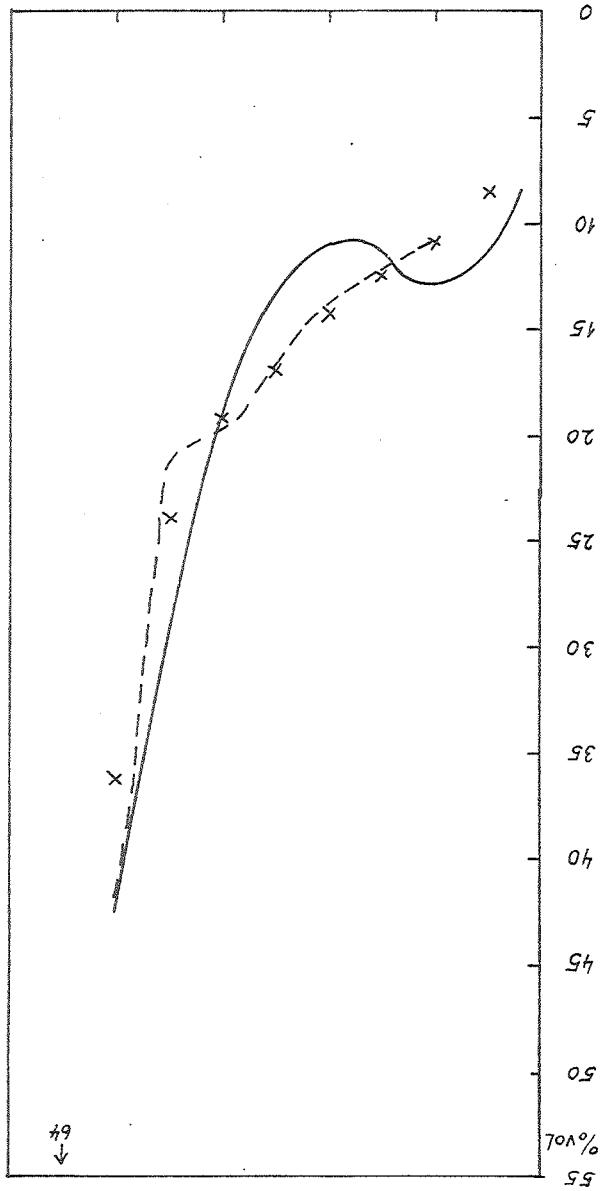


Fig. 8. Fugtfordelingen i tre under udtør-
ning i fiberetningen. Målte punkter af-
markert. Ruldt optrukken linie angiver pa-
rabeltilnærmelse. Punkteret linie angiver
spline-funktion.

WATER DIFFUSIVITY

SPECIMEN NUMBER = 372
CARD TYPE = 22

TIME INTERVAL FROM: 4.4 TO: 72.6 EXP. HOURS
HIGH INTERVAL FROM: 1.0 TO: 4.5 CENTIMETERS
EXP. CONDITIONS NR. 2 ABSORPTION COEFFICIENT NR. 0
DATE OF PLOTTING 7 . - 8 . - 75

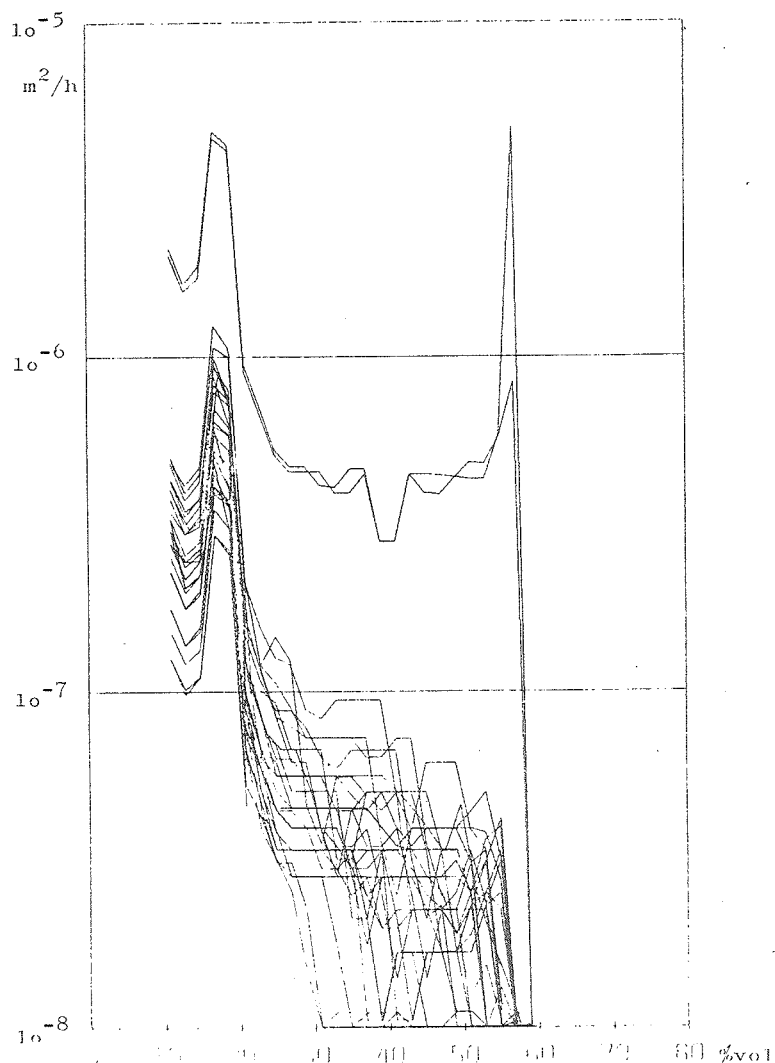


Fig. 10. Kapillarledningstallet for træ i radialretningen, beregnet fra udtørningsforsøg. Nye beregningsmetode.

17.

5. Forsøg med nyfældet træ

På grundlag af de tidligere forsøg med udtørret træ blev det valgt at foretage en serie forsøg med nyfældet fyrretræ. Der udførtes udtørningsforsøg med ialt 6 prøvestykker, bestående af splint eller kerne. Målingerne blev foretaget med udtørring i de 3 hovedretninger. Som følge af en uheldig udvælgelse blev det ikke 6 forskellige tilfælde, der målt på, men 4 - kerne (i fiberretningen og tangentialretningen) og splint (i fiberretningen og radialretningen). De udvalgte prøvestykker bestod af den type fyrretræ, som Laboratoriet for Bygningsematerialer har anvendt til andre undersøgelser af væske-gennemtrængelighed. Ved at anvende nyfældet træ vil man få forhold, som svarer til den normale udtørring for konstrukstræ.

Prøvestykkerne blev anbragt i en opstilling på det nye målebord til γ -måleudstyret. Herved har det været muligt at foretage målinger på alle 6 stykker uden flytning af prøverne under forsøget. En måleserie bestående af 9 målepunkter i hvert af de 6 prøvestykker tager 2 timer. Ialt har målingerne strakt sig over mere end 500 timer (ca. 20 dage).

5.1. Kernetræ

Startfugtindholdet i kernetræ viser sig at ligge forholdsvis lavt, ca. 10% vol. Herved bliver udtørringen meget begrænset, idet træet er ret tæt ved fugtlige vægt med omgivelserne. Det har derfor i disse 2 tilfælde (fig. 11 og fig. 12) ikke været muligt at beregne kapillarledningstallet. En sammenligning viser, at udtørringen i tangential retning sker meget langsomt (der er ikke ligevægt efter 500 timer). For fiberretningen er der næsten ligevægt efter 350 timer. Det fremgår af fordelingerne (fig. 12), at der ved udtørring i tangentialretningen opstår en fugtgradient gennem træet.

18.

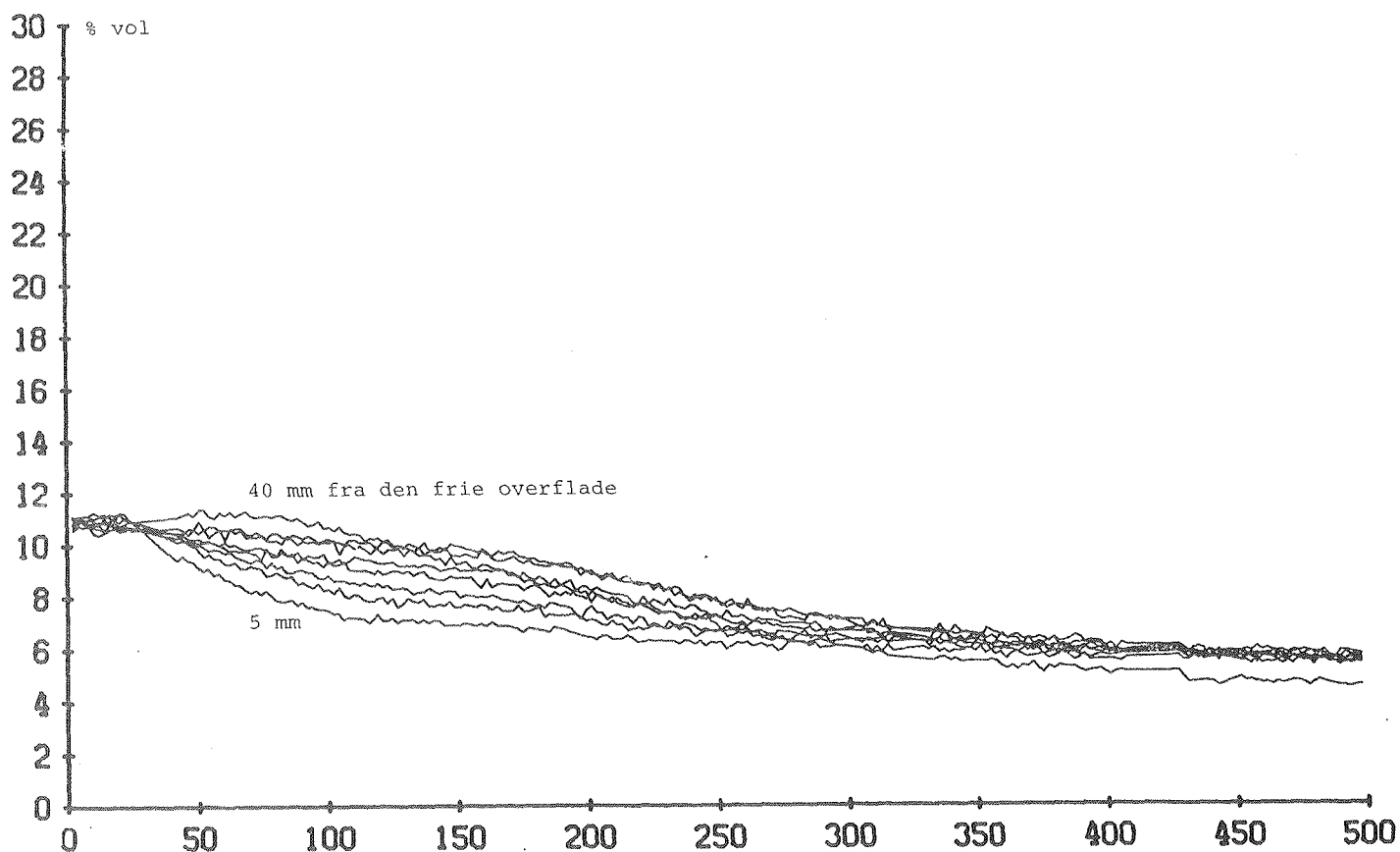


Fig. 11. Fugtfordelinger i kernetræ (fyr) under udtørring i fiberretningen.
Hver kurve angiver fugtindholdet i en bestemt højde.

19.

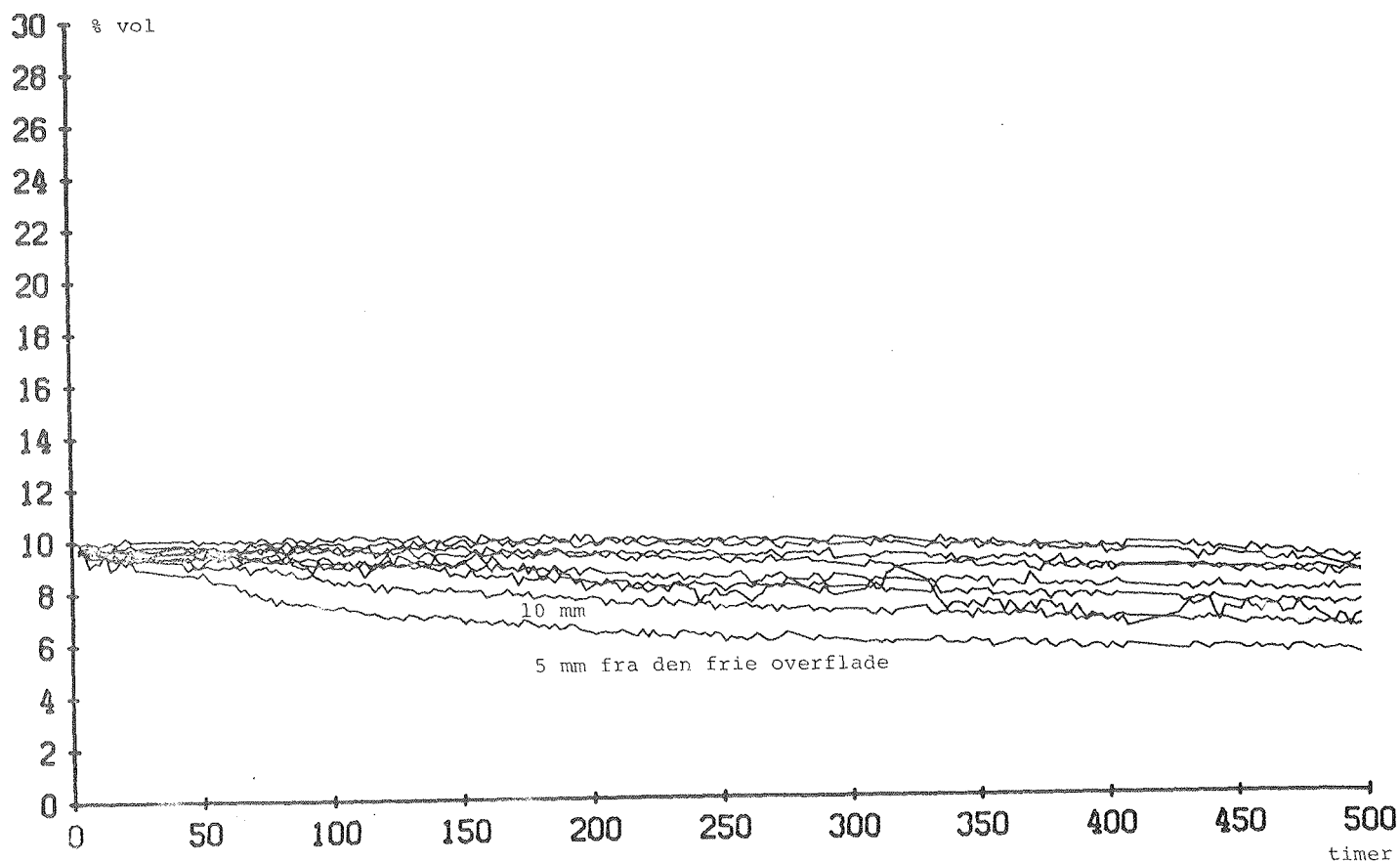


Fig. 12. Fugtfordelinger i kernetræ (fyr) under udtørring i tangentialretningen.
Hver kurve angiver fugtindholdet i en bestemt højde.

20.

5.2. Splint

I fiberretningen (fig.13) sker udtørringen, så fugtindholdet er næsten konstant over hele prøvens tykkelse. Cellerne må derfor tømmes ensartet igennem hele prøven. Da fugtfordelingerne ligger tæt samlet, har det ikke været muligt at beregne kapillarledningstallet. I et område ved 15% vol. og 425 timer er fugtindholdet meget ensartet. Dette svarer nogenlunde til fibermaåningspunktet.

I radialretningen (fig.14) sker udtørringen lag for lag, mens fugtindholdet er konstant ved de inderste lag. Bemærk, at et lag først begynder at blive tømt, når det foregående (øvre) lag har nået sin ligevægtstilstand. Det samme forhold findes i forsøg nr.2 af denne type, mens nr.3 (fig.15) viser et andet billede. Lagene tømmes i dette tilfælde, så der opstår en fugtgradient - men ikke så stor - som ved fig.14.

Fra disse 2 forsøg er kapillarledningstallet beregnet - resultatet fremgår af fig.16 & 17. Det bemærkes specielt, at kapillarledningstallet bliver det samme ved begge målinger.

Fig.17 svarer til et mere uregelmæssigt stykke (variationer i årringe over højde og bredde) fyrretræ, men alligevel findes samme kapillarledningstal.

6. Konklusion

De opnåede resultater viser, at det er muligt ved anvendelse af γ -stråling at få nøjagtige informationer om fugttransporten i træet. Der fås f.eks. tydeligt forskellige fugtfordelinger, afhængig af udtørningsretningen. Dette må helt klart hænge sammen med træets opbygning af celler, ringporer og marvstråler. Beregninger af kapillarledningstallet viser resultater i samme størrelsesorden for udtørring i radialretningen, hvad enten der brugt ud-

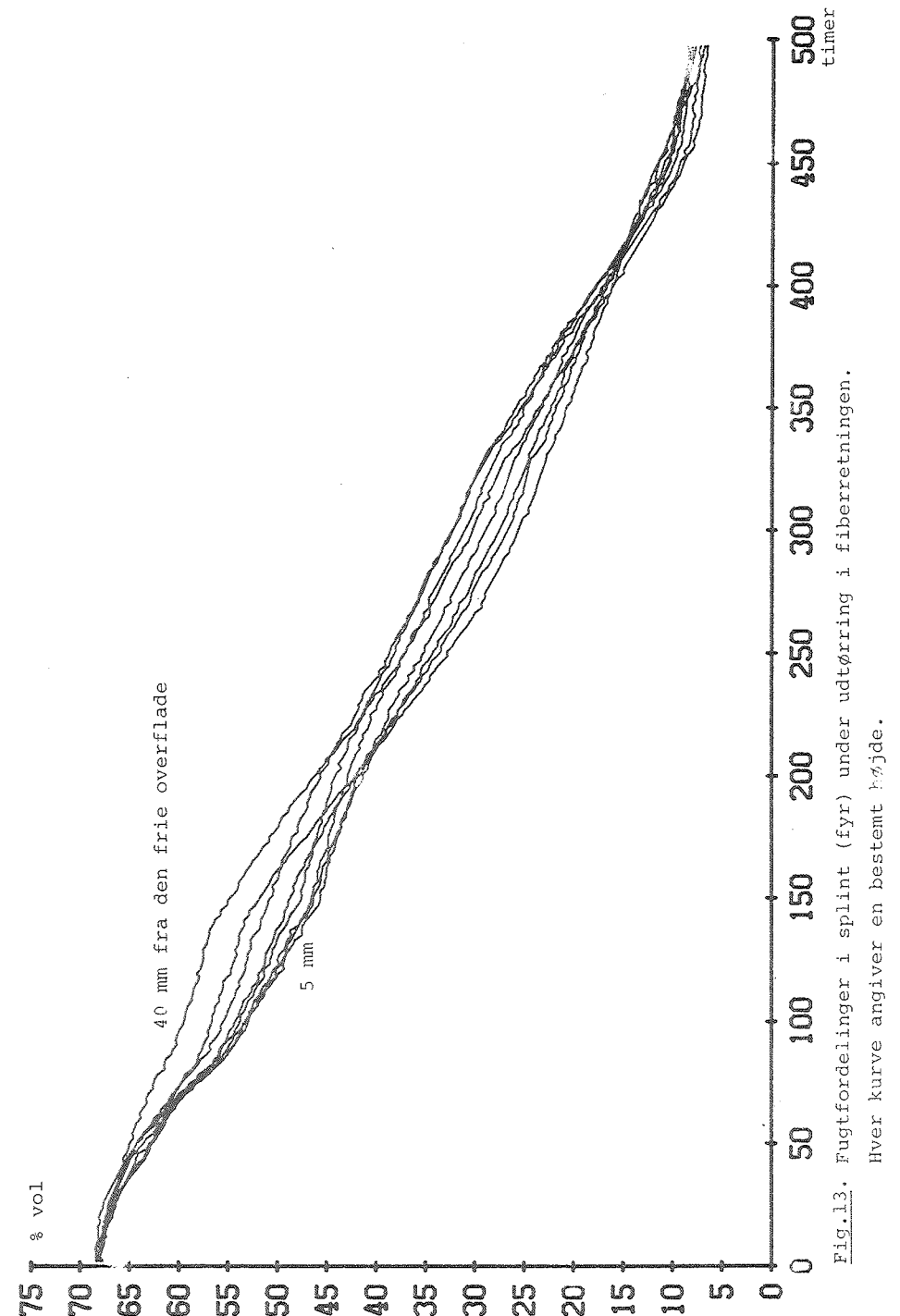


Fig.13. Fugtfordelinger i splint (fyr) under udtørring i fiberretningen. Hver kurve angiver en bestemt højde.

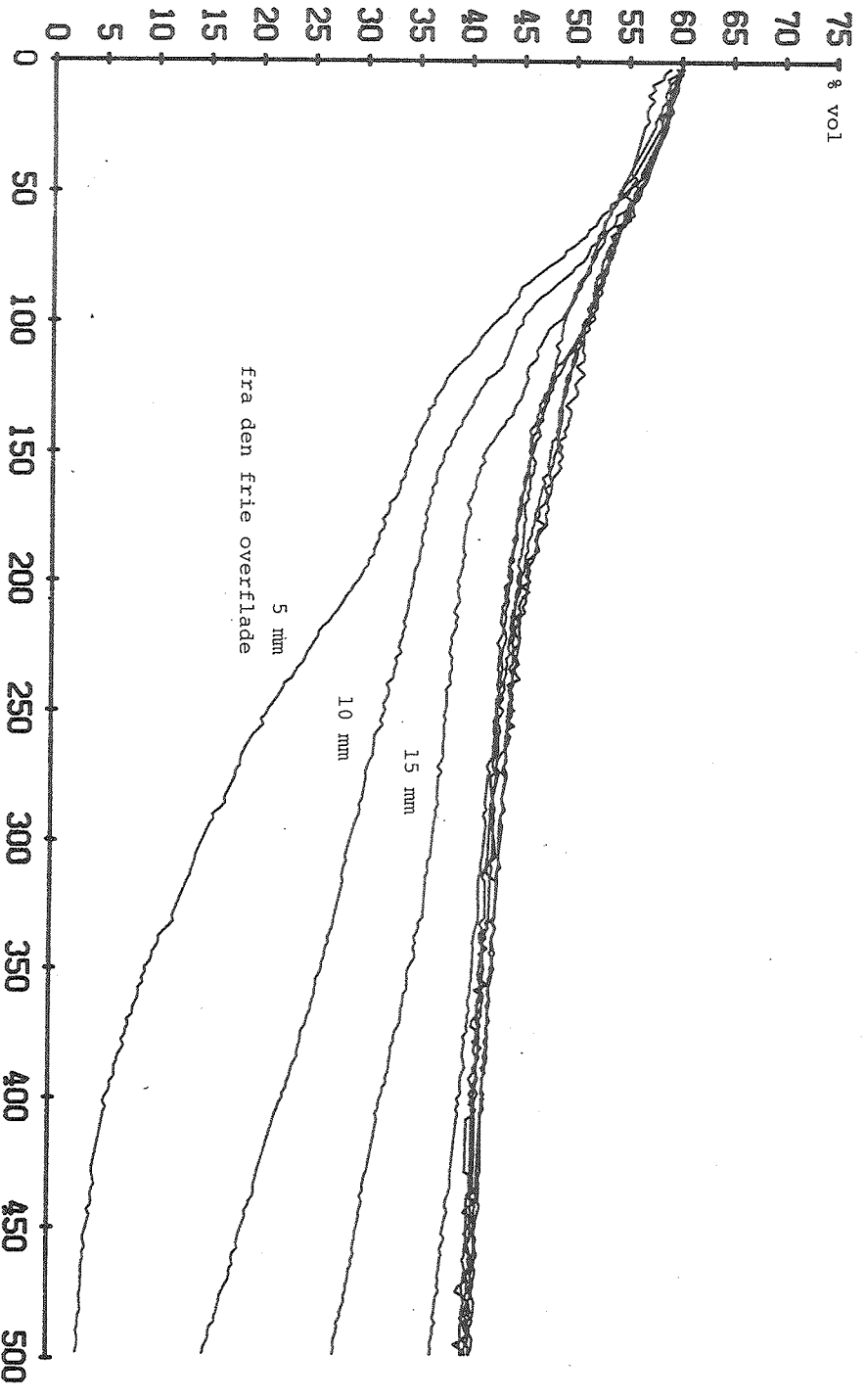
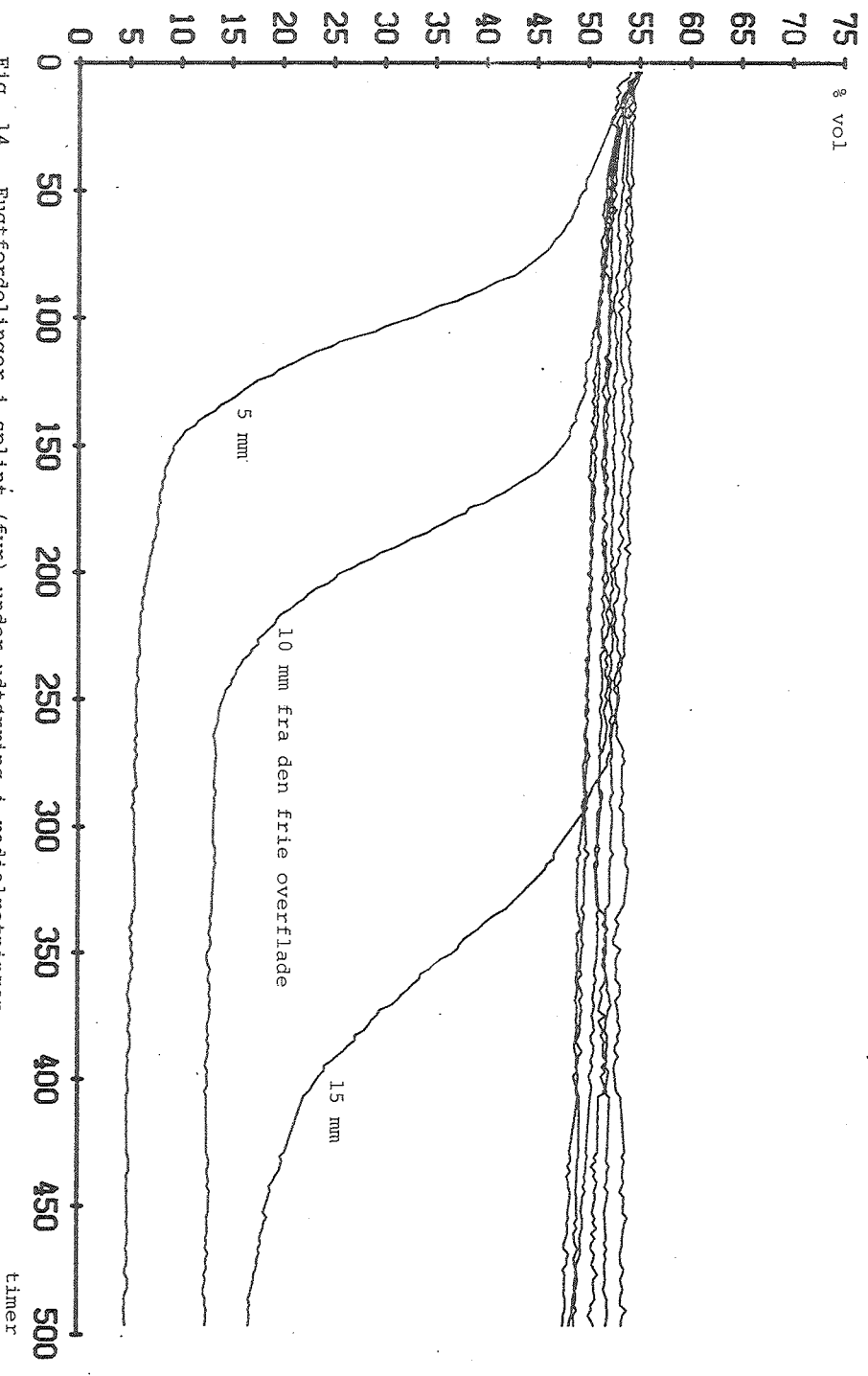


Fig. 15. Fugtfordelinger i uregelmassig splint (fyr) under udtørring i radialretningen. Hver kurve angiver en bestemt højde.

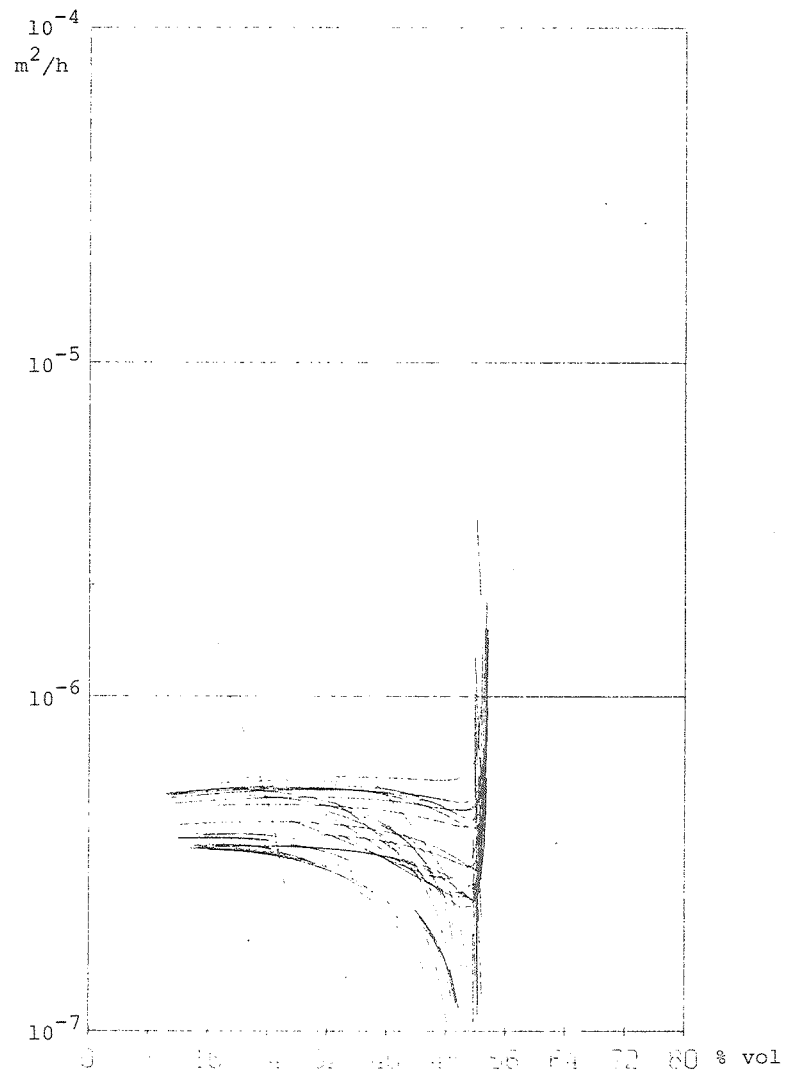


Fig.16. Kapillarledningstallet for splint (fyr) under udtørring i radialretningen. Beregnet ud fra fig.14.

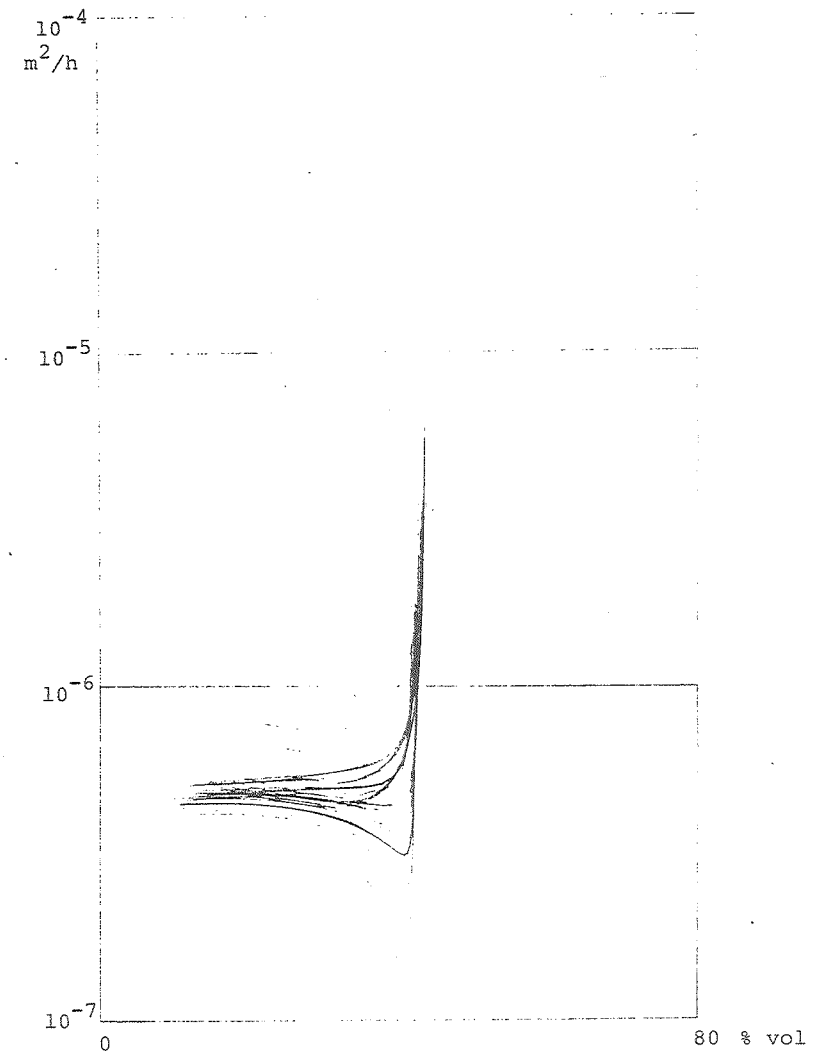


Fig.17. Kapillarledningstallet for splint (fyr) under udtørring i radialretningen. Beregnet ud fra fig.15.

tørret eller nyfældet træ. Men det må slås fast, at resultaterne stammer fra målinger på fyr, og resultaterne må derfor overføres til andre træsorter med en vis forsigtighed.

Henvisning

- [1] Nielsen, A.F.: Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport. Meddelelse nr.29, Laboratoriet for Varmeisolering, D.T.H. (licentiatafhandling).
- [2] Nielsen, A.F.: Måling af fugttransport i teglsten. Intern rapport. September 1976.