

Fuktinducerade deformationer hos trä

EXAMENSARBETE TVBK-5046

Handledare: Annika Mårtensson

LUND MAJ 1990

Anne Månsson

Roberto Caprile

Fuktinducerade deformationer hos trä

FUKTINDUCERADE DEFORMATIONER HOS TRÄ

Roberto Caprile

Anne Månsson

Abstract: This essay describes computer programs for simulation of mechano-sorptive effects in wooden materials, i.e. the interaction between moisture changes and mechanical loading. Further on, three examples of deformation in wooden structures due to moisture variations are presented.

Keywords: mechano-sorption, moisture flow, wood

INNEHÅLLSFÖRTECKNING		sid
FÖRORD		1
SYFTE		2
INLEDNING		3
Fuktegenskaper hos trä, en överblick		3
Mekanosorption - vad är det?		6
Konstitutiv modell för mekanosorption		7
Finit element-modell		9
Datorprogram		11
C - ETT SPRÅK FÖR PC		12
Datatyper, funktioner, styrslingor...		12
PROGRAMBESKRIVNING		13
Programinnehåll		13
JAM-2		13
BATMAKER		15
FILEMAKER		15
MOIST		17
MUSIC		18
FINISH		18
LIMTRÄBALK-SIMULERING		19
Bakgrund		19
Syfte		19
Material		19
Tvärsnitt		19
Lagerindelning		19
Modelluppställning		20
Element- och nodindelning		21
Initiellt fukttillstånd		21
Randvillkor		21
Simuleringstid		21
Tidsintervall		21
Resultat		22

Ånggenomgångsmotstånd för lack	23
Felkällor	23
SPÅNSKIVEFÖRSÖK	24
Bakgrund	24
Syfte	24
Utförande	24
Resultat, försök	25
SPÅNSKIVE-SIMULERING	27
Syfte	27
Material	27
Tvärsnitt	27
Lagerindelning	27
Modelluppställning	28
Element- och nodindelning	28
Initiellt fukttillstånd	29
Randvillkor	30
Simuleringstid	30
Tidsintervall	30
Genomförande	30
Resultat	31
Felkällor	33
Slutkommentar	34
UTTORKNING AV VIRKE	35
Bakgrund	35
Syfte	35
Material	35
Lagerindelning	36
Modelluppställning	37
Element- och nodindelning	37
Initiellt fukttillstånd	37
Randvillkor	37
Simuleringstid	38
Tidsintervall	38
Resultat	38
Felkällor	39

SLUTSATSER	40
Tillförlitlighet hos "FUKT"	40
Framtida förbättringar	41

LITTERATURFÖRTECKNING	42
-----------------------	----

BILAGOR

1. Bilder till text
2. Indatafiler till JAM-2 resp MOIST
3. Manual for "FUKT"

FÖRORD

Ett examensarbete är ett mångfasetterat begrepp som innefattar en rad företeelser. Att klargöra dess innebörd kan därför göras på flera sätt. Ett är att beskriva arbetets framåtskridande, en vandring i tid och rum som inleds hemmavid den soliga sommaren 1989 med studier i C-språkets besynnerligheter, fortsätter under hösten i ett dystert rum i en bortglömd del av V-huset, avancerar till en egen datorplats hos Byggmek på fjärde våningen, och når slutligen toppen med en nyinköpt IBM PS/2 uppe hos Bärande på femte våningen.

Ett annat sätt är att berätta om den långa rad av trevliga personer, utan vars hjälp vi ej kunnat genomföra detta examensarbete. Vi vill därför först och främst tacka vår handledare Annika Mårtensson, som förutom uppvisande av en stor portion tålamod skrivit det ena av de två datorprogram som examensarbetet grundas på; Jesper Arfvidsson, som alltid vänligt besvarat frågor medan hans proffs-program misshandlats av två amatörer; Sven Thelandersson, som varit examensarbetets andliga ledare och uppmuntrat oss genom sin entusiasm för ämnet; folket på Byggnadsmekanik, som inhyste oss en tid; Bertil Enquist, för all hjälp vid vårt laborerande; Anders Peterson och Anders Follin för datorteknisk hjälp.

Lund, april 1990

Roberto Caprile

Anne Månsson

SYFTE

Examensarbetets huvuduppgift är att sammankoppla ett fuktberäkningsprogram med ett program som studerar mekanosorptivt beteende hos trämaterial. Programpaketet beräknar deformationer och spänningsvariationer under en tidsperiod i en balk, utsatt för mekanisk belastning och omgivande klimat. Vid beräkningen kan balkar med tvärsnitt bestående av högst tre olika material användas. Resultatet av simulationen presenteras på skärm och sparas på fil, om användaren så önskar.

För att utvärdera programpaketet har tre simuleringar genomförts:

- * limträbalkars deformation i varierande inomhusklimat
- * spånskivegolv utsatt för fukt
- * uttorkning av virke

INLEDNING

Hög fuktighet och stora fuktvariationer försämrar funktionen hos träkonstruktioner. Fuktvariationer ger upphov till fuktrörelser, dvs svällning eller krympning, i synnerhet tvärs fiberriktningen. Därmed kan sprickor uppstå, ett problem som är särskilt aktuellt vid uttorkning av virke. När fuktrörelserna blir olika i olika delar av en konstruktion kan besvärande deformationer och formförändringar uppträda.

Vid fuktvariationer i trä som samtidigt är utsatt för yttre last blir fuktrörelserna väsentligt annorlunda än i obelastat material. I detta avseende är materialets beteende ännu ofullständigt känt, vilket gör det svårt att förutsäga konsekvenserna av fuktpåverkan.

Fuktegenskaper hos trä, en överblick

Nilsson [7] beskriver faktorer som är av betydelse för fukttillståndet hos trä. Då fuktflödet till respektive från en punkt i ett material är olika ändras fuktinnehållet i punkten. En första förutsättning för att kunna beskriva hur t ex fukthalten [$\text{kg H}_2\text{O} / \text{m}^3$ material] kommer att förändras är sålunda att bestämma storlek och riktning av fukttransporten i materialet. Detta görs som regel med hjälp av någon fuktpotential Ψ , vilken utgör en drivkraft för fuktflödet q enligt

$$q = k_{\Psi} * \frac{\Delta\Psi}{\Delta X}$$

Vanligen används som fuktpotential ånghalt [$\text{kg H}_2\text{O} / \text{m}^3$], fukthalt eller fuktkvot [$\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg material}$] vid isoterma förhållanden. I formeln ovan betyder Δ en förändring, x anger läget och k_{Ψ} är en fukttransportkoefficient, se nedan.

Då fukthalten ändras p g a fukttransport, ändras oftast också fuktpotentialens storlek. För att kontinuerligt kunna beskriva fukttransport och ändring av fukthalt behövs ett samband mellan fuktinnehåll och fuktpotential. Normalt är detta jämviktssamband den s k sorptionskurvan. Härur kan utläsas ett materials fuktbindningsförmåga. För träbaserade material är denna i allmänhet välkänd och har ett visst temperaturberoende.

Jämviktssamband vid uttorkning (desorption) och uppfuktning (absorption) är något olika, och desorptionskurvan ligger högre än absorptionskurvan. Denna skillnad kallas sorptionshysteresis.

Fuktkapaciteten, dvs sorptionskurvans lutning, beskriver ett materials förmåga att ändra fuktinnehåll vid en ändring av fukttillståndet. Trä har en hög fuktkapacitet.

Den övervägande delen av studier av fukttransport i trä har gjorts under isoterma förhållanden. Som nämnts ovan kan olika beskrivningssätt användas för isoterm fukttransport. De ger alla samma fukttransportriktning och transportkoefficienterna kan översättas till varandra. Koefficienten är inte någon konstant, utan varierar med fukttillstånd och temperaturnivå. Med ökande temperatur ökar materialets fukttransportförmåga.

En materialyta mot omgivande luft strävar efter att uppnå en temperatur- och fuktjämvikt med luftens temperatur och relativa fuktighet. När jämvikt uppnåtts ges fuktinnehållet i materialytan av sorptionskurvan. Ibland är dock fukttransporten fram till ytan så stor att all fukt inte hinner avdunsta i samma takt. Det finns då vid ytan ett övergångsmotstånd Z för fukttransport, vilket framför allt påverkas av lufthastigheten vid ytan.

Sammanfattning av erforderliga faktorer för beskrivning av fuktillståndet hos trämaterial:

- * fukttransportegenskaper hos materialen
 - # fukttransportpotential
 - # fukttransportkoefficient (fukt- och temp.beroende)

- * jämviktssamband mellan fuktinnehåll och fuktpotential
 - # sorptionskurvor, fuktkapaciteter

- * randvillkor
 - # omgivande klimat : relativ fuktighet, temperatur, lufthastighet
 - # annat material

- * begynnelsevillkor för fuktfördelningen

Mekanosorption - vad är det?

Mårtensson [6] förklarar begreppet mekanosorption såsom interaktion mellan fuktförändringar och mekanisk last.

Mekanosorptiva effekter har beskrivits sedan början av 1960-talet. Litteraturstudier ger följande upplysningar:

- * en steady-state fuktgradient ger ej upphov till mekanosorption
- * en förändring i tiden av fukttinnehåll ger mekanosorptiva effekter
- * tryck ger större mekanosorptiva effekter än drag

Fukttinnehållet hos träet påverkar dess mekaniska egenskaper. Fuktvariationer ger ofta upphov till större nedböjningar än de orsakade av mekanisk last, och en samverkan häremellan kan medföra betydande deformationer hos träkonstruktioner.

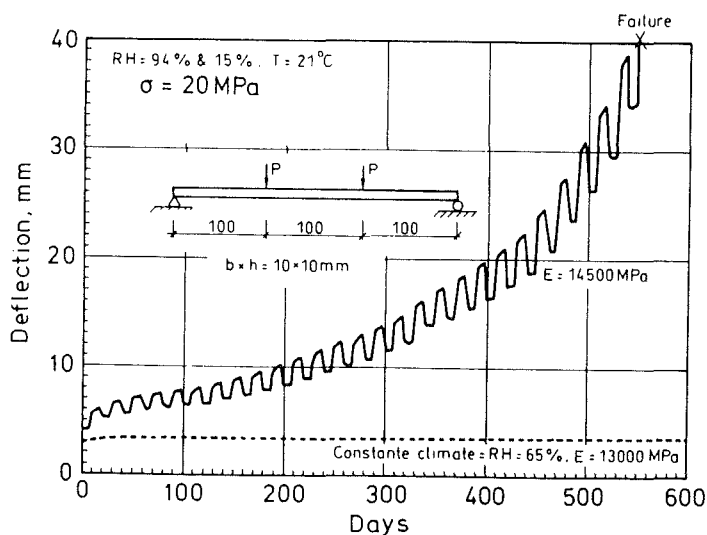


Fig 1. Mekanosorptiva effekter hos balk utsatt för cykliskt varierande klimat (övre kurvan). Den undre kurvan gäller för balk i konstant klimat.

S. Mohager [5] vid KTH i Stockholm har genomfört försök som påvisar detta, se fig 1. De två balkarna har lika

stor konstant last. Den ena balken vistas i konstant klimat, medan den andra utsätts för fuktvariationer. Som synes är nedböjningen betydligt större hos balken utsatt för det varierande klimatet. Denna ökning i nedböjning är ett resultat av mekanosorption.

Trä har alltid varit ett vanligt material i byggnadskonstruktioner. Här utsätts trä för både varierande klimat och mekaniska belastningar. För att trä även i framtiden skall vara ett konkurrenskraftigt material i dessa sammanhang, krävs ökade kunskaper om träets egenskaper och beteende. Sålunda är det t ex av betydelse om man på ett enkelt sätt kan förutsäga deformationer och inre spänningar i bärande element av trä, samtidigt utsatta för fuktvariationer och mekanisk belastning.

Konstitutiv modell för mekanosorption

Mårtensson [6] presenterar i sin licentiatavhandling en endimensionell, konstitutiv modell för mekanosorptiv interaktion. Materialets beteende beror på såväl spännings- som fukthistoria, och den totala töjningen per tidsenhet, $\dot{\epsilon}_x$, beskrivs med hjälp av sambandet

$$\dot{\epsilon}_x = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_c + \dot{\epsilon}_s$$

där $\dot{\epsilon}_e = \dot{\sigma}_x/E(w) + \dot{\sigma}_x \frac{d}{dt}[1/E(w)]$, fuktberoende töjning per tidsenhet p g a last, w = fuktkvot

$\dot{\epsilon}_c = \sigma_x/\eta(w)$, fuktberoende töjning per tidsenhet p g a krypning, $\eta(w)$ = viskositet

$\dot{\epsilon}_s = \dot{\epsilon}_{so} + \kappa [\sigma_x/E(w_{ref})]|\dot{\epsilon}_{so}|$, fuktberoende töjning per tidsenhet p g a aktuell spänning, aktuellt fuktinnehåll samt förändring i fuktinnehåll

$\dot{\epsilon}_{so}$ = fri fuktinducerad töjning per tidsenhet

κ = materialparameter för mekanosorption

$E(w_{ref})$ = elasticitetsmodul vid vald referensfuktkvot

En linjär spänningsfördelning antages, vilket medför att modellen är giltig endast för måttliga spänningsnivåer. Elasticitetsmodulen $E(w)$ beror av fukttillståndet, och har bestämts från försök med provkroppar utsatta för korttidsbelastning vid olika, konstanta fuktnivåer.

Krypningen beskrivs av en linjär viskoelastisk formulering. Här används en rheologisk modell bestående av fjädrar och dämpare, s k Kelvinelement. Denna beskrivning gör att man får ett något mer komplicerat uttryck för ϵ_c än tidigare. Den totala krypningen vid en viss tidpunkt t ges då av

$$\epsilon_c(t) = \sum_{n=1}^N J_n \int_0^t [1 - \exp(-\frac{\xi(t) - \xi(t')}{\tau_n})] d\sigma(t')$$

där J_n är kompliancen för element n i Kelvinmodellen, τ_n är retardationstiden för element n och ξ är materialtid. Krypningsskompliancen $J(t)$ är en materialberoende storhet som innehåller information om hur mycket och hur snabbt materialet svarar på pålagd spänning. Ju högre fuktinnehållet är desto snabbare utvecklas krypningen, en effekt som beskrivs med hjälp av materialtiden ξ . Materialparametrarna J_n och τ_n bestäms från krypförsök vid olika, konstanta fukttillstånd.

Samverkan mellan spänning och fuktinnehåll beskrivs av materialparametern κ . Mekanosorptiva effekter har störst betydelse under den första fuktcykeln, och κ ges då ett värde skilt från noll. Efterföljande fuktförändringar ger ingen effekt förrän fuktinnehållet antar icke tidigare noterade värden, och tills dess sätts κ till noll. En starttid måste definieras, t_{ex} som den tid då betydande spänningar uppnås för första gången. Värdet på κ är olika för tryck och drag eftersom mekanosorptiva effekter är mer uttalade vid tryck än vid drag.

Den beskrivna modellen är enkel, men ett av målen är just att få fram en modell som är lätt att använda i praktiska sammanhang. För vidare information hänvisas till Mårtensson [6].

Finit element-modell

Nästa steg är att införa den konstitutiva modellen i ett FEM-program för balkelement utsatt för såväl mekanisk belastning som fuktvariationer.

Finita element-metoden är allmänt sett en metod för att hitta numeriska lösningar till differentialekvationer på ett approximativt sätt. Differentialekvationerna, som beskriver det avsedda fysiska problemet, förutsätts gälla för ett visst område, vilket kan vara en-, två- eller flerdimensionellt. Området indelas i mindre delar, s k finita element, och en approximation för hur variabeln förändras över elementet antas. Detta innebär en interpolering, t ex linjär, kvadratisk, kubisk etc, över elementet där värdena i vissa punkter, s k noder, antas vara kända. Noderna är vanligen lokaliserade på elementets rand, och via dessa noder kopplas elementen ihop till ett nätverk som beskriver det ursprungliga området.

För en utförlig beskrivning av finita element-metoden vid numerisk lösning rekommenderas läroböcker i detta ämne, [4].

I det aktuella programmet gäller följande:

- * Balkteori enligt Euler-Bernoulli ger förenklingarna:
 - # små förskjutningar antages
 - # skjuvdeformationer försummas
 - # plana tvärsnitt förblir plana
- * Nodvariabler väljs enligt fig 2:

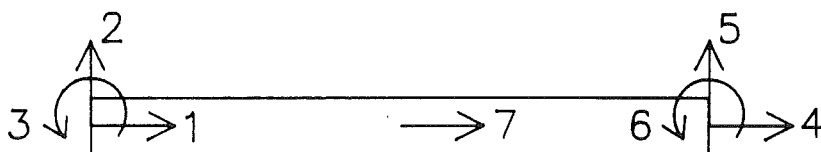


Fig 2. Definition av nodvariabler

- * Som approximerande funktioner används interpolerande polynom. Dessa väljs även som viktsfunktioner enligt Galerkins metod.
- * Vid numerisk integration har Simpsons formel använts.
- * Fiktiv last p g a fuktförändringar i materialet beräknas utgående från fukttillstånden i vart och ett av tvärsnittets 8 lager, se fig 3.

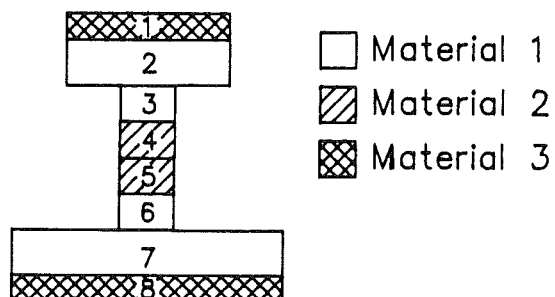


Fig 3. Exempel på tvärsnittsindelning i 8 lager.

Datorprogram

Utgångspunkt för detta examensarbete utgörs av två datorprogram, dels ett fuktberäkningsprogram skrivet i Turbo-Pascal, dels ovannämnda beräkningsprogram som utifrån fuktdata och yttre mekaniska belastningar bestämmer deformationer och spänningstillstånd i konstruktionen. Detta sistnämnda program samt de program för ihopkoppling och resultatpresentation, vilka utvecklats under examensarbetets fortskridande, är skrivna i det alltmer populära språket C. En närmare presentation av C följer i nästa kapitel. Därefter återfinns ett kapitel som beskriver samtliga ingående program.

För den intresserade kan omnämnas att till programpaketet hör även en utförlig manual, "Manual for FUKT" (se bilaga 3).

C - ETT SPRÅK FÖR PC

C är ett programmeringsspråk som är på stark frammarsch. I samband med utvecklingen av operativsystemet UNIX skapade Dennis Ritchie vid Bell Laboratories 1972 C, utgående från kollegan Ken Thompsons programmeringsspråk B, som i sin tur bildats ur BCPL, utvecklat av Martin Richards.

1983 startade "the American National Standards Institute" (ANSI) en kommitté för att framarbete en standard för C. Målet är att få fram en entydig och maskinberoende definition av C-språket [2].

Datatyper, funktioner, styrslingor...

C är ett relativt litet språk som kan beskrivas på ett litet utrymme samt snabbt inläras. De fundamentala datatyperna som förekommer i C är 'character', samt 'integer' och 'floating point' med varierande, maskinberoende storlekar. Härledda datatyper skapas med pekare, strängar, strukturer och unioner.

Funktioner kan returnera värden på bastyperna, pekare, strukturer eller unioner. De kan finnas i separata källkodsfiler som kompileras var för sig.

För att få välstrukturerade program tillhandahåller C konstruktioner för villkor (if-else), val av ett alternativ om flera möjligheter finns (switch), slingor med test i början (while, for) eller i slutet (do), samt möjlighet att bryta slinga (break).

Input och output tillhör inte själva C-språket, utan dessa funktioner hör till ett standardbibliotek. Här finns även en rad andra funktioner, och m h a direktiv till förprocessorn blir de tillgängliga för programmet.

PROGRAMBESKRIVNING

Med kommandot "FUKT" startas ett paket om 6 program. All inmatning sker i det inledande fuktberäkningsprogrammet JAM-2. Utdata härifrån bildar indata till ett FEM-program för simulering av mekanosorption, MOIST. Sammankopplingen sker med hjälp av programmen BATMAKER och FILEMAKER. Paketet avslutas med MUSIC och FINISH.

Programinnehåll

JAM-2 : Ett tvådimensionellt fuktflödesprogram, skrivet i Turbo-Pascal [1]. Fukttransporten är tidsberoende och den explicita framåt-differensmetoden används. Man kan även utnyttja ett steady-state tillstånd, då processen accelereras genom överrelaxation. Ingen hänsyn tas till hysteresis eller temperaturgradient. För materialdata och randvillkor gäller följande funktionssamband:

- * sorptionskurvan approximeras som sträckvis linjär inom godtyckliga intervall
- * transportkoefficienten approximeras som sträckvis konstant inom godtyckliga intervall
- * den givna relativa fuktigheten vid ränderna approximeras som sträckvis linjär mellan godtyckligt valda tidpunkter, alternativt som en sinusvariation med godtyckligt valt medelvärde, amplitud och periodtid

Indata: I JAM-2 sker all inmatning som behövs. Detta görs interaktivt via en huvudmeny och flera undermenyer, vilket utförligt beskrivs i "Manual for FUKT", se bilaga 3. Det är även möjligt att använda existerande indatafiler, fil.dat + fill.dat.

Övriga utdata, som FILEMAKER (se nedan) behöver:

- * snittgeometri (bredd, höjd, tyngdpunkt)
- * material i varje lager
- * start- och sluttid för simulering

JAM-2 är ursprungligen skrivet av Jesper Arfvidsson på Institutionen för Byggnadsteknik vid LTH. Vi har modifierat programmet för att få de indata som fordras för FEM-beräkningen. Härvid har vi ansträngt oss för att hålla samma höga standard som i övriga delar av JAM-2.

BATMAKER : Skapar BATCH-fil, skrivet i C.

PC'n klarar ej att hålla en enda stor indatafil med fuktkvoter öppen under en körning. Därför uppdelas fuktutdata från JAM-2 i flera mindre filer och MOIST körs en gång med varje fil. Batmaker skapar en batch-fil som organiserar körningarna av MOIST så att varje ny körning (utom den första) börjar där den föregående slutade.

FILEMAKER : (C) Skapar diverse filer till MOIST m h a utdatafiler från JAM-2 och materialparameterfilerna *.moi, som innehåller följande:

```

densitet
E(y,t0)  epsso(y)  0.0  a(y,t0)
Ewref  sigmau  kappaT  kappaC  wfiber
tau1  tau2  tau3  ....  taun
J1    J2    J3    ....  Jn
nwp
w1  my1  eps1x  a1  eps1y  eps1z
w2  my2  eps2x  a2  eps2y  eps2z
....
....
....
wnwp  mynwp  epsnwpx  anwp  epsnwpy  epsnwpz
konv1  konv2  konv3

```

$E(y, t_0)$	= E-modul för lager y vid tiden $t=0$
$\text{eps}_{s0}(y)$	= startvärde för fri krympning-svällning under tidssteget
$a(y, t_0)$	= time-shift factor, fuktberoende krypningsparameter
E_{wref}	= E-modul vid referensfuktkvot
sigma_u	= draghållfasthet
kappa_T	= mekanosorptionsfaktor vid drag, se sid 8
kappa_C	= mekanosorptionsfaktor vid tryck, se sid 8
w_{fiber}	= fibermättnadspunkt
tau_i	= retardationstid, se sid 8
n	= antal Kelvinelement, se sid 8
J_i	= värde på kompliance, se sid 8
nwp	= antal rader med data enligt nedan, där
w	= fuktkvot
my	= relativ E-modul = E_w / E_{wref}
eps^x	= svällning-krympning i x-riktning, se fig 4
eps^y	= - " - - " - i y-riktning, se fig 4
eps^z	= - " - - " - i z-riktning, se fig 4
konv_i	anger konvergenskriterier, $i=1,2,3$ se nedan under MOIST

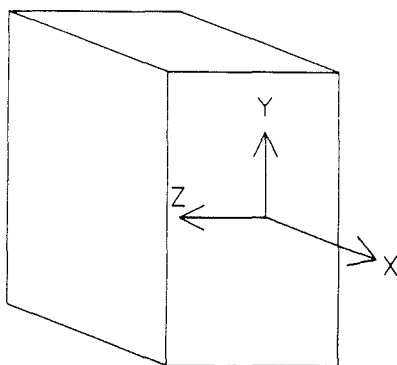


Fig 4. Förklaring av riktningar

Se även bilaga 2, som bl a innehåller exempel på *.moi-filer.

MOIST : (C) Ett program för mekanosorptiv interaktion baserat på finita element-metoden. För varje element beräknas spänningar och nodförskjutningar som en funktion av tiden. Vid beräkningen är tvärsnittet indelat i 8 lager enligt inmatningsavsnittet. Från JAM-2 erhålls fuktkvoter för varje lager vid tidpunkter enligt valda tidsintervall och i varje tidssteg sker följande:

1. uppdatering av fuktberoende parametrar
2. beräkning av elementstyvhetsmatriser och assemblering av systemets styvhetsmatris
3. fiktiva lastökningen dP p g a fuktförändring beräknas och ekvationssystemet löses
4. spänningsökningen beräknas
5. konvergens kontrolleras mot givet kriterium. Om ej detta är uppfyllt, gå tillbaka till 3, annars
6. uppdatera spänningar och förskjutningar

Beräkningen sker stegvis på inkrementell form, dvs man stegar sig fram i tiden. Lösningrutinen har en sådan form att för varje tidssteg måste det kontrolleras att inte något fel introducerats i lösningen. Det finns ett antal konvergenskriterier givna i FEM-litteraturen, och i det aktuella programmet används ett s k förskjutningskriterium. Användaren behöver därför på *.moi-filen, se ovan, ge 3 konvergensvärden:

$konv_1$ = största utböjningen i transversell eller longitudinell riktning, beräknad statistiskt för aktuellt problem

$konv_2$ = största rotationen, beräknad statistiskt

$konv_3$ = tillåten avvikelser för beräknad förskjutning under tidssteget i förhållande till $konv_1$ och $konv_2$

Förutom i fuktdatafiler förekommer indata till MOIST i fill.dat som bildas i samband med inmatningen i JAM-2, samt i de filer som FILEMAKER skapar.

Utdata består av nodförskjutningar resp spänningsfördelning över valt snitt vid tidpunkter som bestäms i JAM-2.

MOIST har ursprungligen skrivits av Annika Mårtensson på Avdelningen för Bärande Konstruktioner vid LTH. Vi har gjort en del modifieringar och tillägg för att anpassa programmet till givna indata och önskade utdata.

MUSIC : (C) Spelar en truddelutt efter sista MOIST-körningen.

FINISH : (C) Presenterar resultat från simuleringen och tar bort intermediära filer.

Välj mellan tre olika presentationer:

- 1) Slutresultat på skärm
- 2) Slutresultat på skärm och fil
- 3) Slutresultat på skärm samt delresultat vid olika tidpunkter på fil

För varje element redovisas

- * nodförskjutningar
- * största spänning i varje position (1-3) vid simuleringens slut

Väljes 3) redovisas på fil nodförskjutningar resp spänningsfördelning över valt snitt vid olika tidpunkter, enligt vad användaren har angivit vid inmatningsskedet.

Oavsett ovanstående val har användaren möjlighet att plotta diagram över de olika frihetsgraderna som en funktion av tiden.

Har inte användaren sparat indata i samband med inmatningen upprepas nu denna möjlighet. När filnamn för lagring av ut- resp indata ges, kontrolleras om en fil med samma namn redan existerar. Om så är fallet kan användaren ange ett nytt filnamn (som också kontrolleras) eller tillåta överskrivning av den gamla filen.

LIMTRÄBALK-SIMULERING

Bakgrund: Trä är ett krypbenäget material och nedböjningarna blir ofta dimensionerande. Fuktvariationer påskyndar dessutom krypningen. Man borde dock kunna införa mer nyanserade regler för krypning i normerna med t ex skilda koefficienter, så att okänsligare konstruktioner gynnas. En internationellt verksam organisation, RILEM TC 112 "Creep in Timber Structures", sammanställer de kunskaper som idag finns på området.

Syfte: Undersökning av deformationer och spänningar hos belastad limträbalk utsatt för varierande inomhusklimat.

Material: Furu

densitet = 500 kg/m^3

$E = 10400 \text{ MPa}$ vid $w = 20 \%$

$\kappa_{\text{T}} = 800$, $\kappa_{\text{C}} = 700$

$\text{eps}_{\text{x}}/w = 0.016 \text{ \%/}\%$, $\text{eps}_{\text{y}}/w = \text{eps}_{\text{z}}/w = 0.14 \text{ \%/}\%$

Värdena gäller för $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Se bilaga 2 för

övriga materialberoende indata.

Tvårsnitt: Tre olika tvärsnitt används [mm^2]

45 x 195 (A)

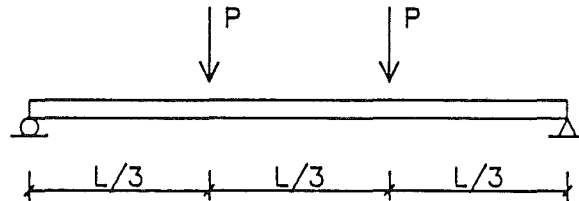
215 x 1260 (B)

215 x 1260 med lackskikt (C)

Lagerindelning:

1
2
3
4
5
6
7
8

Lagertjocklek = $h/8$

Modelluppställning:

- (A) L = 3 m P = 2 kN
 (B), (C) L = 18 m P = 12 kN

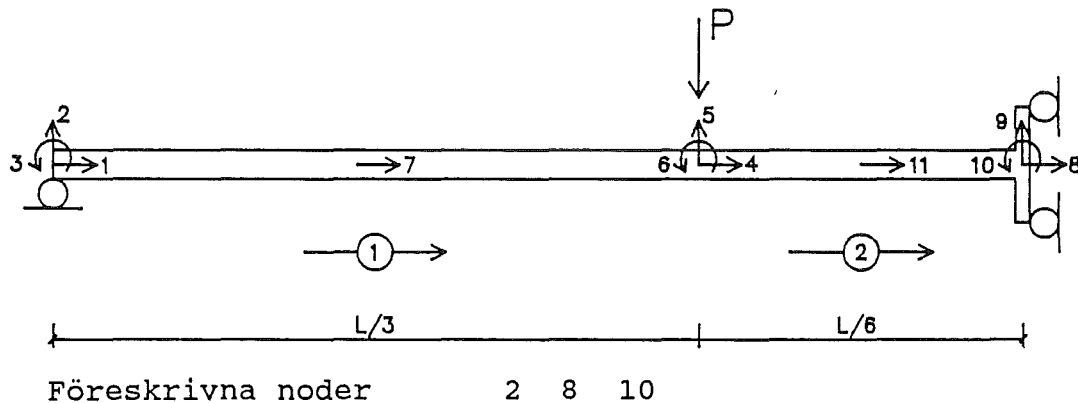
Tvärsnittsmåtten är ca 6 ggr större hos (B) resp (C) jämfört med (A). Därför ökas längder och laster med samma faktor så att den initiella nedböjningen v blir ungefär densamma för de olika balkarna enligt nedan:

$$v = \frac{2PL}{3} * \frac{(3L^2 - 4D^2)}{48EI} = [D = L/3] = \frac{2PL^3}{3*48EI} * \frac{23}{9} = \frac{0.0355PL^3}{EI}$$

45 x 195 P = 2 kN
 L = 3 m
 I = $0.045 * 0.195^3 / 12 = 2.781 * 10^{-5} \text{ m}^4$
 v = $0.0355 * 2 * 3^3 / EI = 6.9 * 10^4 / E$

215 x 1260 P = 12 kN
 L = 18 m
 I = $0.215 * 1.26^3 / 12 = 0.03584 \text{ m}^4$
 v = $0.0355 * 12 * 18^3 / EI = 6.9 * 10^4 / E$

Element- och nodindelning: Symmetri utnyttjas



Initiellt fuktillstånd: 80% relativ fuktighet

Randvillkor: För alla ränder gäller inomhusklimat, som varierar under året enligt (se bilaga 1, fig 1)

$$f(t) = f_1 + f_2 * \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{t_p}\right) = 60 + 20 * \sin\left(\frac{2\pi(t-0.75)}{1 \text{ år}}\right)$$

$f(t)$ = relativ fuktighet (%)

f_1 = medelvärde

f_2 = amplitud

t = tid

t_0 = fas

t_p = periodtid

För balken med lackskikt sätts ytmotståndet till $3.0 * 10^{10} \text{ \%m}^2\text{s/kg}$. Se nedan, sid 23.

För övriga balkar sätts ytmotståndet till 0.

Simuleringstid: 2 år

Tidsintervall:

0 - 15d	: 12h
15d - 1mån15d	: 1d
1mån15d - 2mån15d	: 2d
2mån15d - 4mån15d	: 3d
4mån15d - 8mån15d	: 4d
8mån15d - 2 år	: 5d

h = timme
d = dygn

Man kan ifrågasätta ifall de inledande tidsstegen är för stora för att få ett bra resultat. Vi genomförde därför en kontroll över 4 månader med 12-timmarsintervall, vilken gav mycket god överensstämmelse med de inledande 4 månaderna i alla tre fallen. Se bilaga 1, fig 2.

Resultat: Balken med tvärsnittet $45 \times 195 \text{ mm}^2$ visar störst variation i nedböjningsmönstret. Vid varje uppfuktning sker en ökad nedböjning, som sedan är förhållandevis konstant fram till nästa uppfuktning. Detta gäller även för balken med tvärsnitt $215 \times 1260 \text{ mm}^2$, dock inte lika utpräglad. Limträbalken med lackskikt uppvisar inte detta mönster, utan dess ökande nedböjning med tiden beror nästan uteslutande på krypning. Se bilaga 1, fig 3.

En jämförelse mellan de två större limträbalkarna visar att en klar skillnad föreligger beroende på om balken har ett fuktskyddande lacklager eller ej. Efter två års simulering med ovanstående förutsättningar är nedböjningen hos den lackerade balken 54% av den oskyddade balkens nedböjning. Skillnaden i nedböjning tenderar att öka med tiden p g a fuktvariationerna enligt ovan.

En annan intressant jämförelse är hur de olika balkarnas längder varierar med tiden. De olackerade balkarnas längdvariation uppvisar ett sinusformat mönster i överensstämmelse med klimatvariationerna. Den mindre balken återfår sin ursprungliga längd efter en fuktcykel till skillnad från den större balken. Se bilaga 1, fig 4 - 5. Lägg här märke till att frihetsgrad 1 har positivt värde då balken krymper, jfr Element- och nodindelning enligt ovan. Den lackerade balken krymper något vid torkningsfaserna men ökar ej i längd under uppfuktningfaserna. Se bilaga 1, fig 6. Längdändringen är dock mycket liten (0.13 mm).

I överensstämmelse med nedböjningen har tvärsnittsmåtten stor betydelse för storleken av rotationen vid fritt upplag. Se bilaga 1, fig 7.

Spänningen i den dragna kanten som funktion av tiden framgår av bilaga 1, fig 8.

Ånggenomgångsmotstånd för lack

Som indata till JAM-2 används för ånggenomgångsmotståndet Z_O [$\%m^2s/kg$]. Vanligare är Z_V [s/m] = $Z_O * V_S / 100\%$;
 $V_S = 0.17 * 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ vid $20^\circ C$.

<u>Värde</u>		<u>Material</u>
Z_V (10^3 s/m)	Z_O ($\%m^2s/kg$)	
15000	$9 * 10^{10}$	Klarlack 2-komp polyuretan
14000	$8 * 10^{10}$	Klarlack alkyd
5000	$3 * 10^{10}$	Klarlack akryl

Referens: Nilsson, Lindberg [8]

Vi valde $Z_O = 3 * 10^{10} \text{ \%m}^2s/kg$ vid ovanstående limträbalksimulering.

Felkällor: * Osäkerhetsfaktorer i materialdatafiler.
 Fuktberäkning baserad på data för rödgran (träsplint), framtagna av N H Bertelsen 1988

* Approximationer i beräkningsprogrammen

SPÅNSKIVEFÖRSÖK

Bakgrund: Om golvspånskivor utsätts för fukt under byggskedet och sedan beläggs med ett tätt ytskikt, t ex en linoleum-matta, kan man få problem med deformationer hos golvet och spikar som dras loss p g a lyftning. Försök har utförts vid Statens Provningsanstalt i Borås för att undersöka vilka krafter och deformationer som uppstår i golvspånskivor efter bevattning och torkning i 20 °C vid 40-50 % RH. Mätningarna visade på i princip ingen deformation alls under uppfuktning. Senare vid förhindrad rörelse krävdes det en avsevärd kraft (600-700 N/m) för att hålla kvar skivan i utgångsläget. Vi skall försöka simulera förloppet och inleder med egna experiment.

Syfte: Undersökning av fuktinnehåll och fuktfördelning i en golvspånskiva (22 mm, V20) med fri vattenyta efter 24, 48, 72 resp 96 timmar.

Utförande: Från en 600 x 2400 golvspånskiva utsågades 16 st provplattor med måtten 250 mm x 250 mm. Ovansidan på varje platta markerades för att säkerställa rätt yta för vattenprovets genomförande. Fyra plattor lades undan som kontroll, och de övriga 12 plattorna försågs med en tjock silikonvall längs ovansidans kanter.

Efter tre timmar ansåg vi att silikonet hade stelnat tillräckligt för att tåla vattenbelastning. Plattorna vägdes och placerades därefter på träläktar på golvet i för-rummet till ett klimatrum. På de invallade ytorna hölls vatten och hos fyra prov blandades metylenblått i vattnet för att eventuellt lättare kunna se fuktfronten.

De 12 plattorna indelades i grupper om tre. Med 24 timmars mellanrum avlägsnades vattnet från en plattgrupp och

de fuktiga plattorna vägdes. För att avläsa vattenin-
trängningsdjupet utsågades från mitten av varje platta en
ca 8 cm x 8 cm bit. Till vår stora besvikelse hade inte
färgen nämnbart trängt igenom ytskiktet, men vi kunde
ändå göra en hyfsad uppskattning av vattenfronten. Där-
efter vägdes varje bit och lades tillfälligt undan.

När alla provplattor efter fyra dagar undersökts, place-
rades de resulterande småbitarna och fem kontrollbitar av
samma storlek i en värmeugn med temperaturen 60 °C. Efter
två dygns torkning vägdes åter varje bit och viktskillna-
den, dvs det avdunstade vattnet, beräknades.

Resultat, försök:

Tabell 1: Stora provplattor

Prov	Torr vikt [g]	Tid [dygn]	Våt vikt [g]	Vatteninträngning [mm]
1	962.45	1	1040.90	0.8
2	938.95	1	1025.80	0.8
3	953.25	1	1033.65	0.8
4	952.15	2	1072.90	0.9
5	963.50	2	1084.15	0.9
6	976.40	2	1100.80	0.8
7	997.60	3	1144.40	1.0
8	996.20	3	1155.55	1.1
9	976.70	3	1141.05	1.1
10	978.80	4	1143.75	1.1
11	961.50	4	1137.80	1.0
12	969.55	4	-	-

Kommentarer: Prov 12 Sparas för framtida studier.

Prov 3 Tillägg silikon efter vattentill-
försel (p g a läckage).

Tabell 2: Små provbitar efter torkning 2 dygn i 60 °C

Prov	Tid [dygn]	Vatteninnehåll (viktskillnad/torrsvikt) [kg/kg]
1	1	9.5
2	1	10.0
3	1	9.3
4	2	12.2
5	2	11.8
6	2	11.9
7	3	12.9
8	3	12.7
9	3	13.5
10	4	14.3
11	4	15.5
A	-	6.0
B	-	6.0
C	-	6.6
D	-	5.7
E	-	6.2

Kommentarer: Prov 1-11 kommer från motsv stora prov.
 Prov A, B, C, D, E är kontrollprover.
 Siffrorna är medelvärden för tvärsnittet
 och säger inget om fuktfördelningen.

SPÅNSKIVE-SIMULERING

Syfte: Undersökning av deformationer och spänningar hos golvspånskiva utsatt för fri vattenyta under 4 resp 2 dygn. Endast egentygnd belastar systemet.

Material: Golvspånskiva, 22 mm. Ytterskikten utgörs av tätare material än mittskiktet.

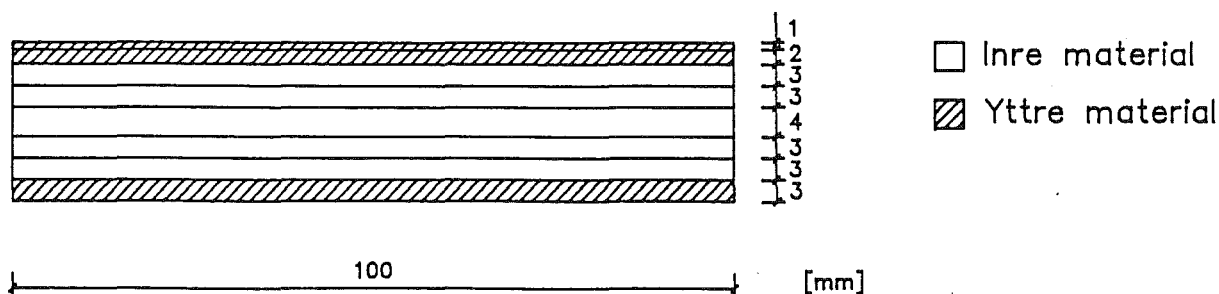
Ytskikt: densitet = 800 kg/m^3
 $E = 3000 \text{ MPa}$ vid $w = 13 \%$
 $\text{kappa}_T = 700$, $\text{kappa}_C = 700$
 $\text{eps}_x/w = \text{eps}_z/w = 0.034 \text{ \%/}$, $\text{eps}_y/w = 0.50 \text{ \%/}$

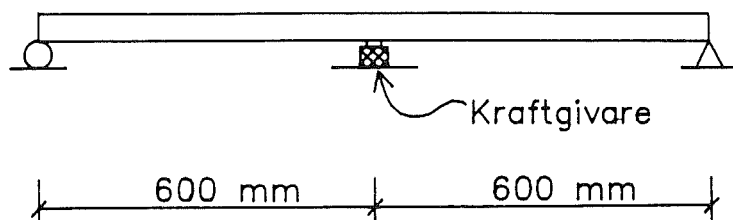
Mittskikt: densitet = 600 kg/m^3
 $E = 1900 \text{ MPa}$ vid $w = 15 \%$
 $\text{kappa}_T = 700$, $\text{kappa}_C = 700$
 $\text{eps}_x/w = \text{eps}_z/w = 0.040 \text{ \%/}$, $\text{eps}_y/w = 0.43 \text{ \%/}$

Värdena gäller för $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Se bilaga 2 för övriga materialberoende indata.

Tvärsnitt: $22 \times 100 \text{ mm}^2$

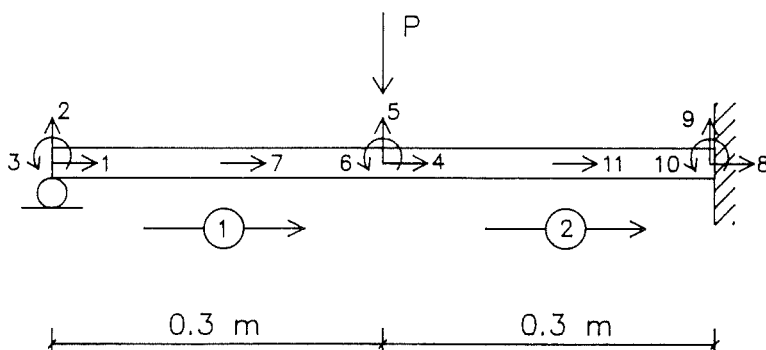
Lagerindelning:



Modelluppställning:

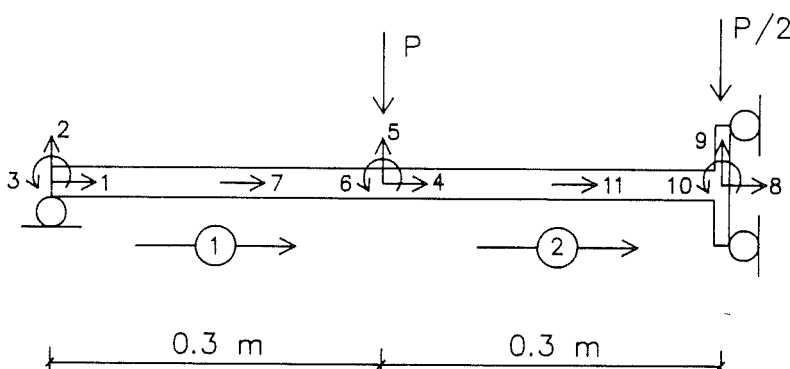
$$\text{Egentyngd} = (1.2 \times 0.1 \times 0.022) \times 640 \times 9.81 = 16.56 \text{ N}$$

Element- och nodindelning: Två fall, symmetri utnyttjas och egentyngden lumpas enligt figur nedan.



Fall A: Fast inspänd i symmetrisnitt, $P = 4.14 \text{ N}$

Föreskrivna noder 2 8 9 10



Fall B: Fri vertikal förskjutning i symmetrisnitt,

$P = 4.14 \text{ N}$

Föreskrivna noder 2 8 10

Initiellt fukttillstånd: JAM-2 klarar ej helt blöta material. Därför skapar vi med hjälp av tabell 2, sid 26, en fil för beskrivning av fuktvariationerna hos den bevattnade spånskivan under de första fem dyggen. Hänsyn tas till olika densiteter i ytter- och mittskikt.

Tabell 3: Fuktkvot [kg/kg]

Dygn										
0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
4.9	17.6	20.9	20.9	20.9	20.9	20.9	20.9	20.9	19.7	18.4
4.9	9.6	15.9	16.9	17.8	18.6	19.4	20.0	20.6	19.5	18.4
6.1	8.0	14.0	15.5	17.0	18.0	19.0	20.8	22.5	22.3	22.0
6.1	6.1	8.0	11.2	14.3	15.1	15.8	17.4	19.0	18.9	18.8
6.1	6.1	6.1	8.3	10.5	11.3	12.0	13.9	15.8	15.8	15.8
6.1	6.1	6.1	6.6	7.0	7.3	7.5	8.1	8.7	8.7	8.7
6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.3	6.4	6.4	6.4
4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9

Kommentarer: Rad 1 = lager 1 osv

Vid simuleringen då spånskivan utsätts för fri vattenyta under 2 dygn utnyttjas endast data t o m dygn 2. Därefter inleds torkningsfasen.

Från och med dag 5 (resp 3 enligt ovan) har fuktkvoten sjunkit till nivåer som JAM-2 kan hantera. Som initiellt fukttillstånd ges

Tabell 4: JAM-2 fuktindata

Lager	RH [%]
1	94.0
2	94.0
3	93.0
4	91.0
5	86.7
6	55.7
7	50.0
8	40.0

Randvillkor: Alla ränder utom den fuktiga har konstant klimat på RH 40 %. För den fuktiga randen sker en stegvis uttorkning enligt följande:

Tabell 5: Stegvis uttorkning av fuktiga randen

Dag	RH [%]
5	95
8	85
9	75
10	65
11	55
12	50
13	45
14	40

Vid simuleringen då spånskivan utsätts för fri vattenyta under 2 dygn ändras dag 5 till 3, osv. Ytmotståndet sätts till noll hos de två fria ytorna och till $10^{20} \text{ } \mu\text{m}^2\text{s/kg}$ hos de två övriga ränderna. Därmed förhindras att fukt transporteras ut från sidorna och sålunda vandrar fukten enbart i vertikal riktning.

Simuleringstid: 30 dygn

Tidsintervall: 12 timmar

Genomförande: Simuleringen genomförs för 5 olika fall:

- * vatten under 4 resp 2 dygn, fast inspänd i symmetrisnitt (fall A)
- * vatten under 4 resp 2 dygn, fri vertikal förskjutning i symmetrisnitt (fall B)
- * vatten under 4 dygn, fall B men med ändrade värden på κ -parametrarna i *.moi-filerna enligt sid 15, detta för att om möjligt mer efterlikna SP's försök, dvs undvika att skivan böjer upp vid uppfuktning.

Resultat: Jämförelser mellan simulering med vatten i 4 resp 2 dygn visar att uppböjning och svällning under blöta perioden blir större i det första fallet, vilket inte är särskilt förvånande. Se bilaga 1, fig 9 - 11. Efter 30 dygn är deformationerna i de två fallen jämnstora.

Då κ -parametrarna ändrades minskade uppböjningen under blöta perioden från 47 mm till 15 mm, medan nedböjningen under torkningsperioden ökade från 11 mm till 47 mm. Se bilaga 1, fig 12. För att motverka denna nedböjning fordras en kraft P_{upp} ;

$$P_{\text{upp}} = P_{\text{egen}} + 48EIv/L^3$$

$$P_{\text{egen}} = 0.5 \times (1.2 \times 0.1 \times 0.022) \times 640 \times 9.81 = 8.28 \text{ N}$$

$$E = 2500 \text{ MPa}$$

$$I = 0.1 \times 0.022^3 / 12 = 8.873 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$L = 1.2 \text{ m}$$

$$48EI/L^3 = 6161.81 \text{ N/m}$$

v = vertikal förskjutning

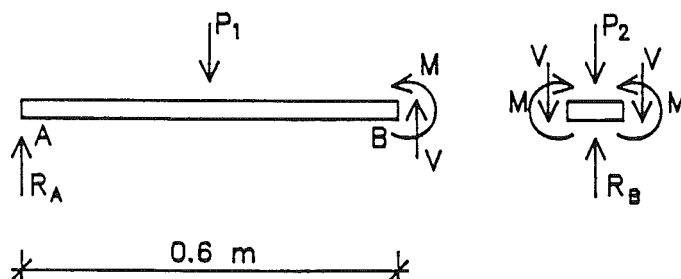
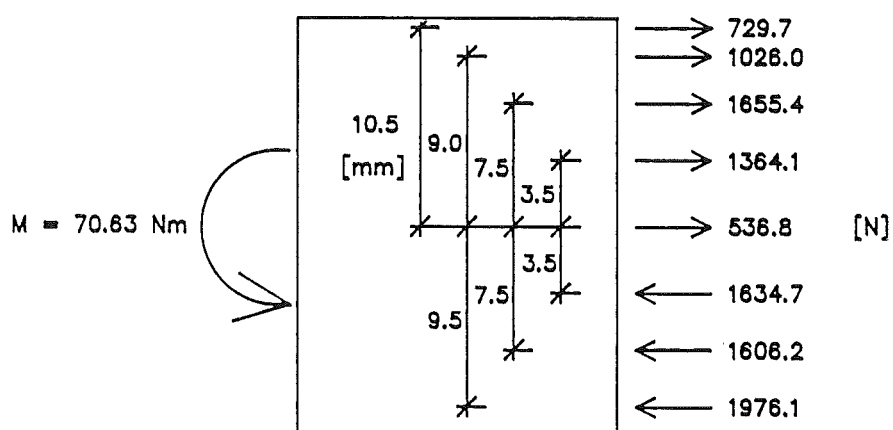
$$\kappa = 10000 \quad : \quad P_{\text{upp}} = 8.28 + 6161.81 \times 0.0474 = 300.3 \text{ N}$$

$$\kappa = 700, 4 \text{ dygn} : P_{\text{upp}} = 8.28 + 6161.81 \times 0.0111 = 76.6 \text{ N}$$

$$\kappa = 700, 2 \text{ dygn} : P_{\text{upp}} = 8.28 + 6161.81 \times 0.0129 = 88.0 \text{ N}$$

Som en jämförelse beräknas upplagskraften vid simulering med fast inspänning i symmetrisnitt, se fig 5 och 6.

Krafterna i respektive figur har beräknats såsom spänning x area för varje lager.

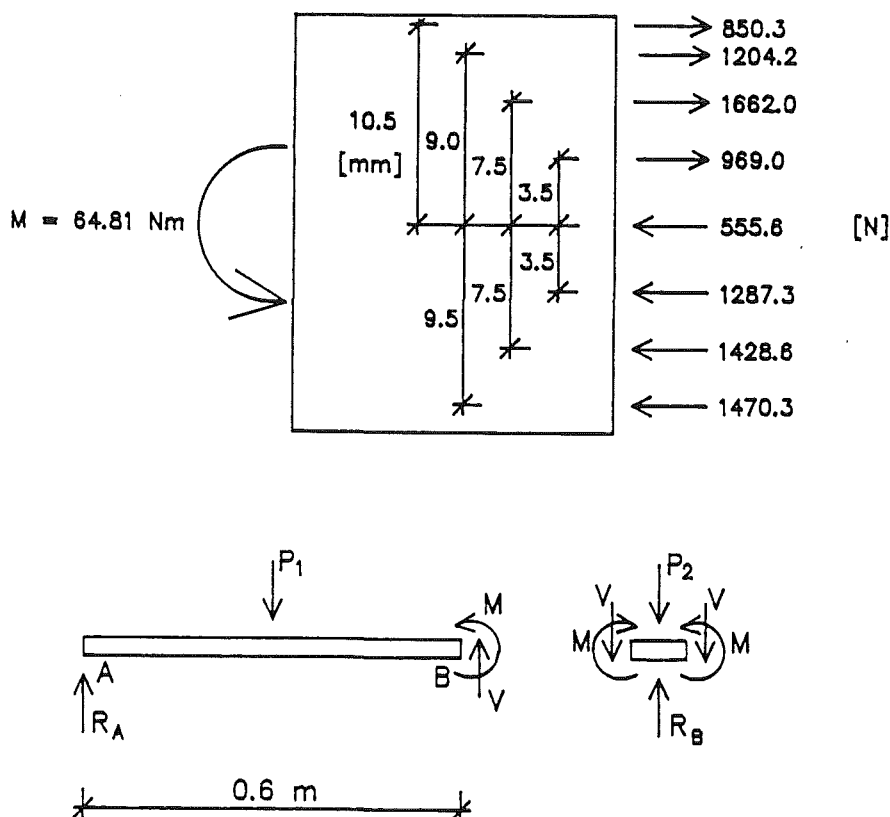


$$P_1 = P_2 = 4.14 \text{ N (Egentyngd)}$$

$$V = (4.14 \times 0.3 + 70.63) / 0.6 = 119.8 \text{ N}$$

$$R_B = 2 \times 119.8 + 4.14 = 243.7 \text{ N}$$

Fig 5. Kraftfördelning över tvärsnitt efter 30 dygn hos balk med 4 dygns bevattning.



$$P_1 = P_2 = 4.14 \text{ N (Egentyngd)}$$

$$V = (4.14 \times 0.3 + 64.81) / 0.6 = 110.1 \text{ N}$$

$$R_B = 2 \times 110.1 + 4.14 = 224.3 \text{ N}$$

Fig 6. Kraftfördelning över tvärsnitt efter 30 dygn hos balk med 2 dygns bevattning.

Felkällor: * Fuktdata under den blöta fasen grundas på experiment som gav fuktmedelvärden över tvärsnittet. Förfinade försöksmetoder hade eventuellt kunnat ge en sannare fuktfördelning än den vi approximerat fram. Även det uttorkningsförlopp som används i JAM-2 är en uppskattning.

- * Osäkerhetsfaktorer i materialdatafiler.
Fuktberäkning i JAM-2 baserad på data för
22 mm spånskiva, densitet 640 kg/m^3 .
Referens A-C Andersson 1988

- * Approximationer i beräkningsprogrammen

Slutkommentar

Spånskivor är ett vanligt förekommande byggnadsmaterial. Dess relativt stora fuktrörelser kan skapa problem då man vid byggnation inte alltid tar hänsyn till dem. Beräkningarna här visar att det kan bli stora rörelser i skivorna och därmed kan också betydande krafter uppstå vid infästningarna.

Med en bra materialdatabas vore det enkelt att uppskatta vad olika belastningssituationer, både vad gäller mekanisk last och fukt, kan leda till i form av deformationer och spänningstillstånd.

UTTORKNING AV VIRKE

Bakgrund: Enligt Söderström [9] krävs grundläggande kunskaper i trämekanik och träfysik på ett stort antal områden i träindustrin. Det viktigaste området ekonomiskt sett torde vara trätorkningen. Skogsindustrin går varje år miste om miljonbelopp, då 15-20 % av virket måste kasseras p g a deformationer och sprickbildning som uppkommer i samband med torkningsprocessen. En förändring av torkningsschemat kan eventuellt förhindra att ytsprickor uppstår och även minska kupningen, som idag ger stora volymsförluster p g a den borthyvlning som fordras för att hålla stipulerade mått. Även mycket små ökningar av volymsutbytet ger betydande ekonomiska vinster.

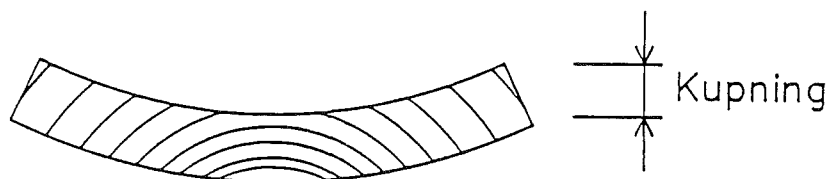


Fig 6. Kupning hos trä

Syfte: Undersökning av deformationer och spänningar vid uttorkning av virke med två olika torkningsscheman. Ingen hänsyn tas till krypning.

Material: Furu. För att få en realistisk bild av tvärsnittet används tre olika materialfiler för resp tangentiell fiberriktning, radiell fiberriktning och mellanliggande fibrer. Den sistnämnda filen är bildad från medelvärden av de två övriga filerna.

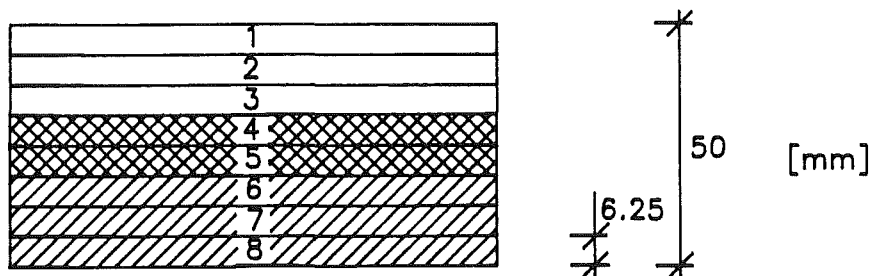
Tangentiella fibrer : densitet = 430 kg/m^3
 $E = 100 \text{ MPa}$ vid $w = 26 \%$
 $\kappa_{\text{T}} = 50, \kappa_{\text{C}} = 50$
 $\text{eps}_{\text{x}}/w = 0.31 \text{ \%/}$
 $\text{eps}_{\text{y}}/w = 0.15 \text{ \%/}$
 $\text{eps}_{\text{z}}/w = 0.015 \text{ \%/}$

Radiella fibrer : densitet = 430 kg/m^3
 $E = 200 \text{ MPa}$ vid $w = 26 \%$
 $\kappa_{\text{T}} = 130, \kappa_{\text{C}} = 130$
 $\text{eps}_{\text{x}}/w = 0.15 \text{ \%/}$
 $\text{eps}_{\text{y}}/w = 0.31 \text{ \%/}$
 $\text{eps}_{\text{z}}/w = 0.015 \text{ \%/}$

Medelvärde : densitet = 430 kg/m^3
 $E = 150 \text{ MPa}$ vid $w = 26 \%$
 $\kappa_{\text{T}} = 90, \kappa_{\text{C}} = 90$
 $\text{eps}_{\text{x}}/w = 0.23 \text{ \%/}$
 $\text{eps}_{\text{y}}/w = 0.23 \text{ \%/}$
 $\text{eps}_{\text{z}}/w = 0.015 \text{ \%/}$

Värdena gäller för $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Se bilaga 2 för övriga materialberoende indata.

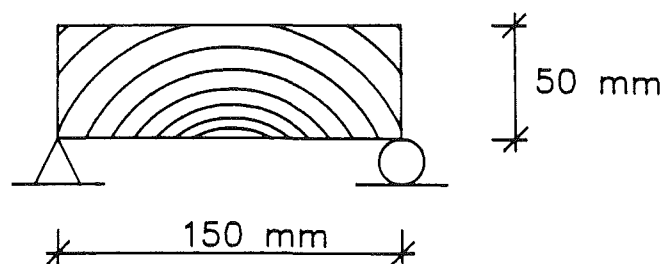
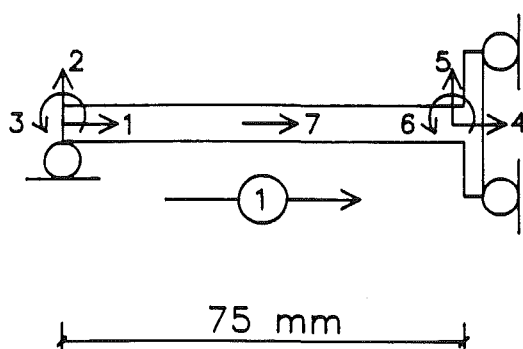
Lagerindelning:



Lager 1-3: Tangentiella fibrer

Lager 4-5: Medelvärde mellan tangentiella och radiella fibrer

Lager 6-8: Radiella fibrer

Modelluppställning:Element- och nodindelning: Symmetri utnyttjas

Föreskrivna noder 2 4 6

Initiellt fuktillstånd: Fibermättnad

Randvillkor: Uttorkning sker på två olika sätt enligt bilaga 1, fig 13 och fig 14. Torkningskurva A innebär att den relativa luftfuktigheten inledningsvis sänks från 84 % ner till 56 % på 12 timmar. Därefter sker en uppfuktning under 20 timmar till 67.5 %, varefter uttorkningen åter vidtar, nu med ett jämnt förlopp under 50 timmar ner till 23 % relativ luftfuktighet. Denna nivå bibehålls i 50 timmar och ger en slutfuktkvot hos träet på 10 %. Torkningskurva B däremot har ett konventionellt förlopp och saknar sålunda uppfuktningssfasen.

Ytmotståndet för ovan- och undersida sätts till 3×10^6 $\% \text{m}^2 \text{s/kg}$, vilket svarar mot 1 cm diffusion i fri luft vid 60°C . För att enbart få fukttransport i vertikal riktning sätts ytmotståndet hos de övriga två ränderna till 10^{20} $\% \text{m}^2 \text{s/kg}$.

Simuleringstid: 132 timmar

Tidsintervall: 20 minuter

Resultat: De torkningskurvor som använts vid simuleringen ger i praktiska sammanhang en slutfuktkvot hos träet på 10 %. En medelvärdesberäkning av snittets fukttinnehåll visade att träet ej hunnit torka ut till denna nivå utan endast till 18.1 %, se bilaga 1, fig 15. Detta beror antagligen på att den materialdatafil som använts vid fuktberäkningen gäller för fuktflöde vid 20 °C, vilket är lägre än det aktuella temperaturområdet, dvs runt 60 °C. En sänkning av ytmotståndet från 3×10^6 %m²s/kg till 0 gav ingen signifikant inverkan på uttorkningen eller spänningsfördelningen.

Denna ofullständiga uttorkning medför att kupningskurvan ej har planat ut efter 132 timmars torkning, och kupningen torde bli större än våra beräknade 0.98 mm, se fig 16. Då torkningsschema enligt alternativ A utfördes i praktiken av Bergkvist, Insjön, blev kupningen ca 3 mm.

Av samma anledning som ovan blir krympningen troligen större än 1.2 mm enligt bilaga 1, fig 17. Rotationen som funktion av tiden visas i bilaga 1, fig 18.

De två torkningsalternativen tycks inte ge någon större skillnad då det gäller deformationerna. Som framgår av bilaga 1, fig 19 - 20, blir den maximala dragspänningen något mindre om torkningskurvan har en knyck enligt torkningsschema A jämfört med en jämn kurva enligt schema B. Här bör finnas intresse för fortsatta studier med nya torkningsalternativ, då en reduktion av dragspänningen ger mindre risk för sprickor.

Spänningsfördelningen över tvärsnittet vid tiden då maxspänning uppträder samt efter 132 timmar redovisas i bilaga 1, fig 21 - 22.

Felkällor: * Osäkerhetsfaktorer i materialdatafiler.
Fuktberäkningen är baserad på data för röd-
gran (träsplint, 20 °C) i alla tre fiber-
riktningarna. Datafilen har extrapolerats
från 95 % RH till 100 % RH.
Referens: N H Bertelsen 1988

* Approximationer i beräkningsprogrammen

SLUTSATSER

Tillförlitlighet hos "FUKT"

De tre problemställningarna som redovisats ovan har varit bra som demonstrationsexempel på vad programpaketet "FUKT" kan användas till. Resultaten som erhållits har varit rimliga så beräkningsrutinerna tycks fungera tillfredsställande. Överensstämmelsen med verkligheten är dock beroende av att materialparameterfilerna dels för fuktberäkningen (*.mat), dels för spänningsberäkningen (*.moi), noggrant bestäms för de aktuella materialen. Detta kan göras genom egna experiment eller med hjälp av litteraturstudier.

Som exempel på materialdatabasens betydelse för resultatet hänvisas till spånskive-simuleringen, där olika värden på mekanosorptionsparametrarna gav helt annorlunda utböjningar, se bilaga 1, fig 12.

Har man inte bröd får man ta limpa, så t ex i beräknings-exemplet om virkesuttorkning är materialdata för fuktflödet hämtade från rödgran, medan övriga materialdata gäller för furu. Man kan dock utifrån resultaten göra en kvantitativ bedömning av de två olika torkningsalternativen.

Vid fuktberäkningar bör man noggrant undersöka de verkliga klimatvariationerna och de aktuella övergångsmotstånden. Limträbalk-simuleringen visade att övergångsmotståndet har stor betydelse för fuktflödet och därmed på utböjningens storlek.

Vidare bör inte intervallindelningen av simulationstiden göras för grov vid beräkning med snabba klimatvariationer.

Framtida förbättringar

Fuktberäkningsprogrammet JAM-2 håller en hög klass, medan FEM-programmet MOIST kan vidareutvecklas. Aktuell upplaga av MOIST är begränsat till balkar bestående av högst tre material. En ökning av materialantalet skulle möjliggöra mer nyanserade indelningar av tvärsnittet, t ex vid simulering av virkesuttorkning. En ökning av antalet lager är av liknande anledning önskvärd.

En annan utvidgning av MOIST är att genomföra en tvådimensionell beräkning av spänningar och deformationer genom att dela in tvärsnittet i småceller, och inte bara i lager som nu. Detta skulle främst gynna uttorkningsrelaterade problem, där man önskar beräkna kupningens storlek.

Avslutningsvis kan vi bara konstatera att PC'n kommit för att stanna även inom träforskningen.

LITTERATURFÖRTECKNING

- [1] Arfvidsson J. Computer Model for Two-dimensional Moisture Transport, Manual for JAM-2 Version 1.0. Lund 1989.
- [2] Kernighan B, Ritchie D. The C Programming Language. New Jersey 1988.
- [3] Kollmann F, Côté W. Principles of Wood Science and Technology I, Wood. New York 1968.
- [4] Kompendium i Finita Element-Metoden, Byggnadsmekanik. Lund 1989.
- [5] Mohager S. Studier av krypning hos trä. Stockholm 1987.
- [6] Mårtensson A. Interaction Between Moisture and Stress in Wooden Materials. Lund 1988.
- [7] Nilsson L-O. Fukttransportegenskaper hos trä och träbaserade skivor. Göteborg 1988.
- [8] Nilsson, Lindberg. Ytbehandling av trä del 3, T7 - 78 M (tabeller). 1978.
- [9] Söderström O. Trämekaniska modeller och materialegenskaper. 1990.

BILAGA 1, INNEHÅLL

Limträbalk-simulering

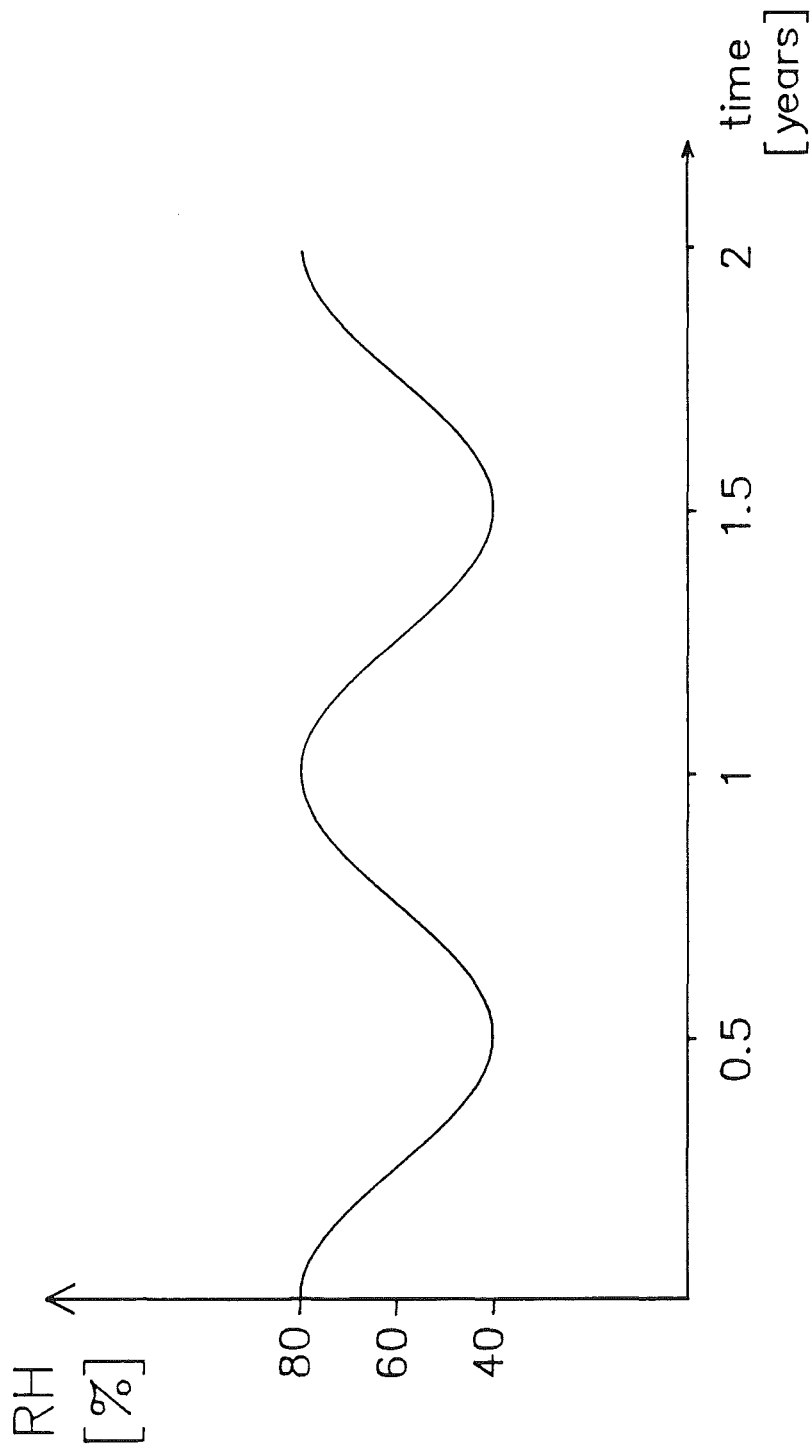
- Fig 1 Fuktvariationer under året i inomhusklimat
- Fig 2 Kontroll av tidsstegens betydelse
- Fig 3 Nedböjning, frihetsgrad 9
- Fig 4 Krympning, frihetsgrad 1
- Fig 5 Krympning/längdenhet
- Fig 6 Krympning hos balk med lackskikt
- Fig 7 Rotation, frihetsgrad 3
- Fig 8 Spänning i balkens underkant som funktion av tiden

Spånskive-simulering

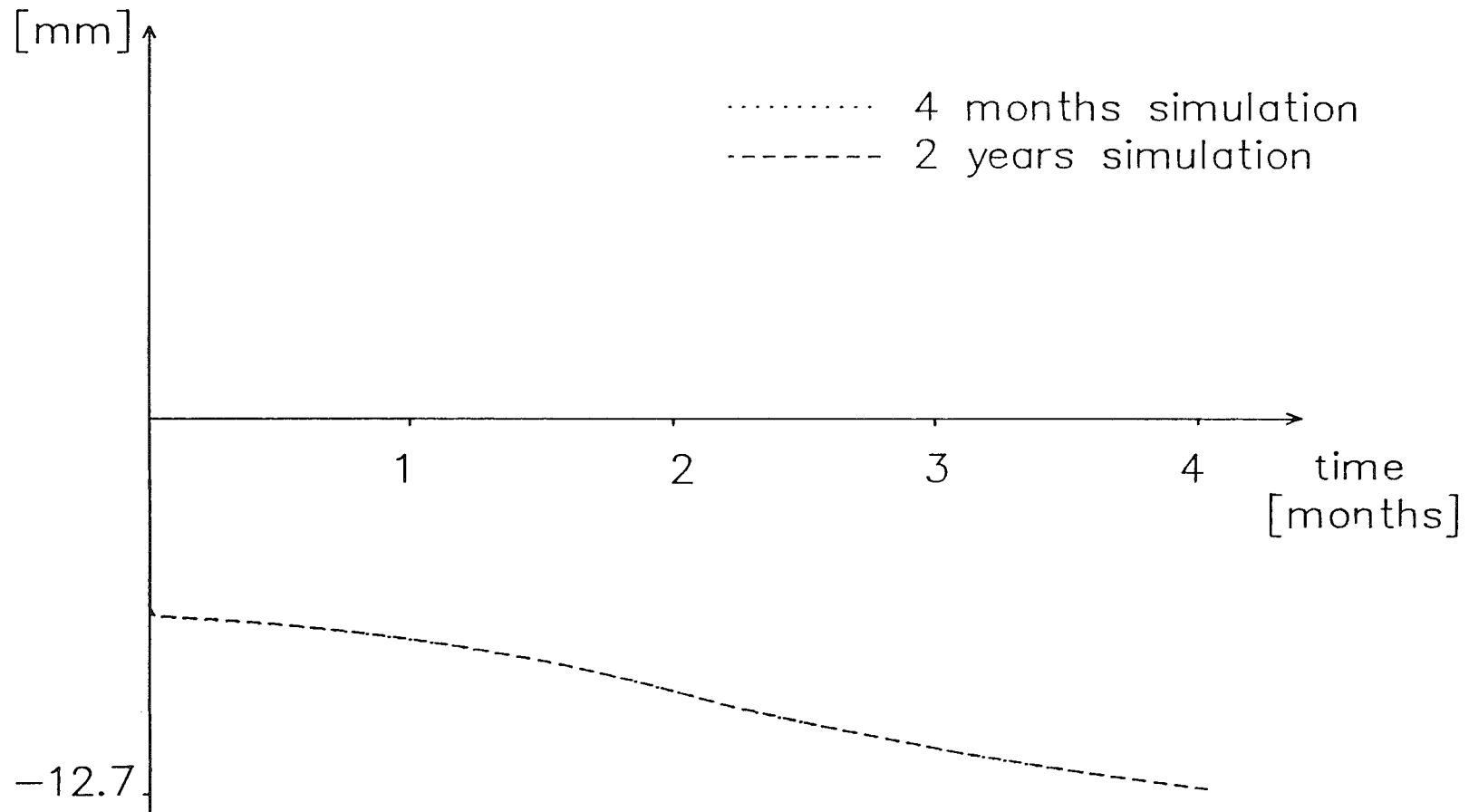
- Fig 9 Krympning, fritt upplagd balk, frihetsgrad 1
- Fig 10 Nedböjning, fritt upplagd balk, frihetsgrad 9
- Fig 11 Nedböjning, fast inspänd balk, frihetsgrad 5
- Fig 12 Nedböjning, jämförelse mellan olika κ -parametrar

Uttorkning av virke

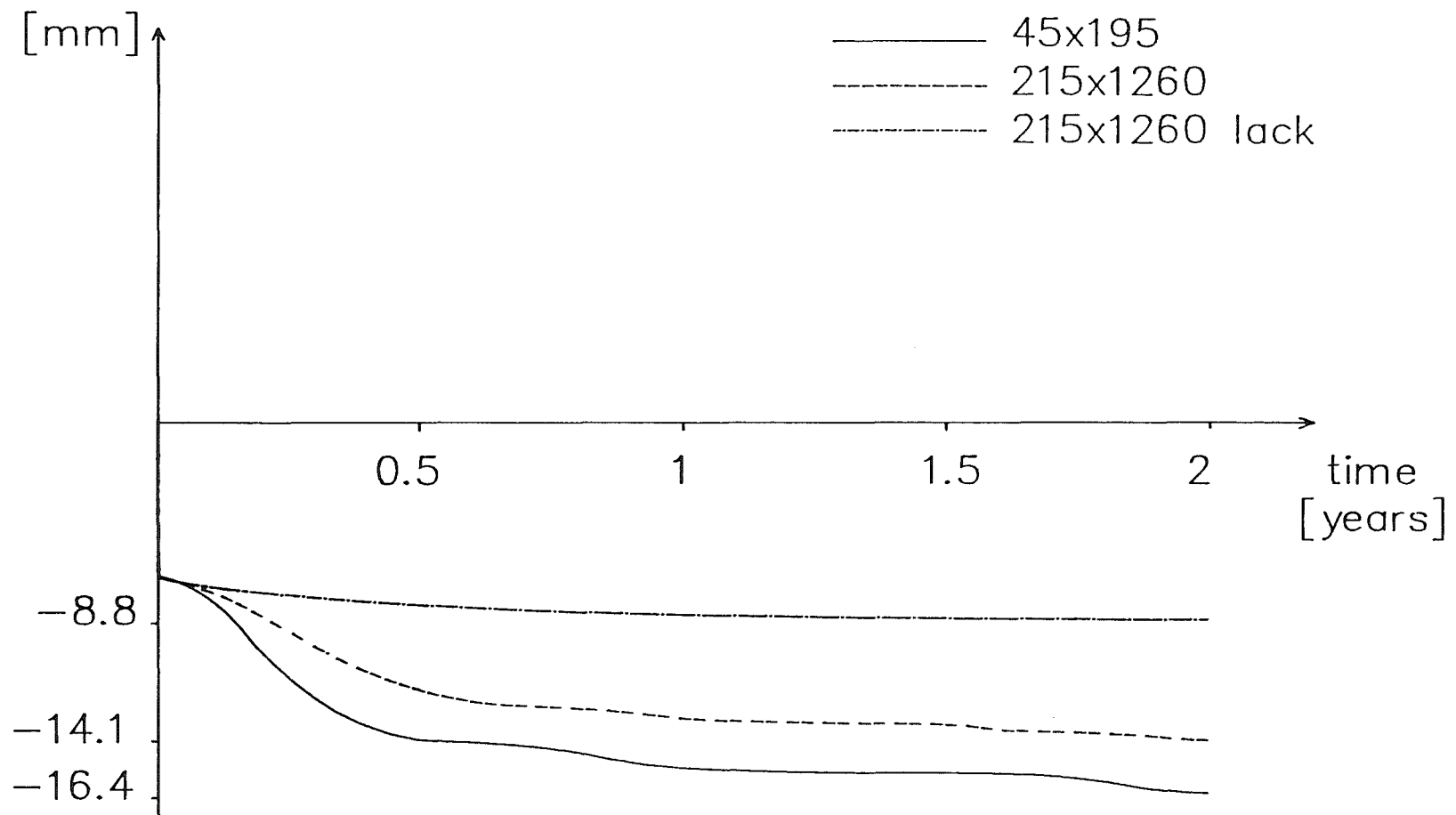
- Fig 13 Torkningsschema A
- Fig 14 Torkningsschema B
- Fig 15 Medelvärde av snittets fukttinnehåll
- Fig 16 Nedböjning, frihetsgrad 5
- Fig 17 Krympning, frihetsgrad 1
- Fig 18 Rotation, frihetsgrad 3
- Fig 19 Spänning i tangentiella fibrer, funktion av tiden
- Fig 20 Spänning i radiella fibrer som funktion av tiden
- Fig 21 Maximal spänningsfördelning över tvärsnittet
- Fig 22 Spänningsfördelning över tvärsnittet, tid = 132 h



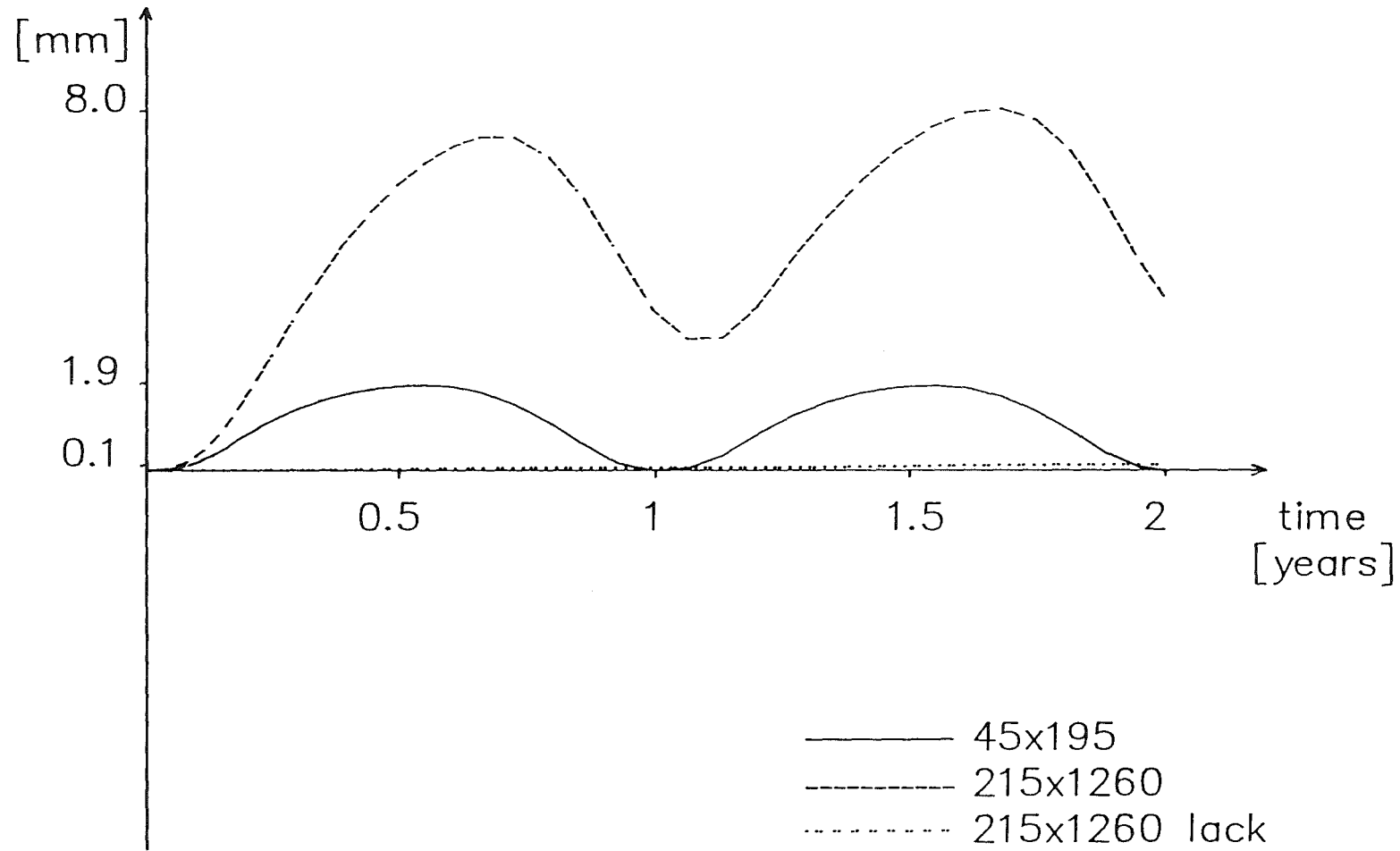
Variations of Relative Humidity, indoor climate
Glulam beam



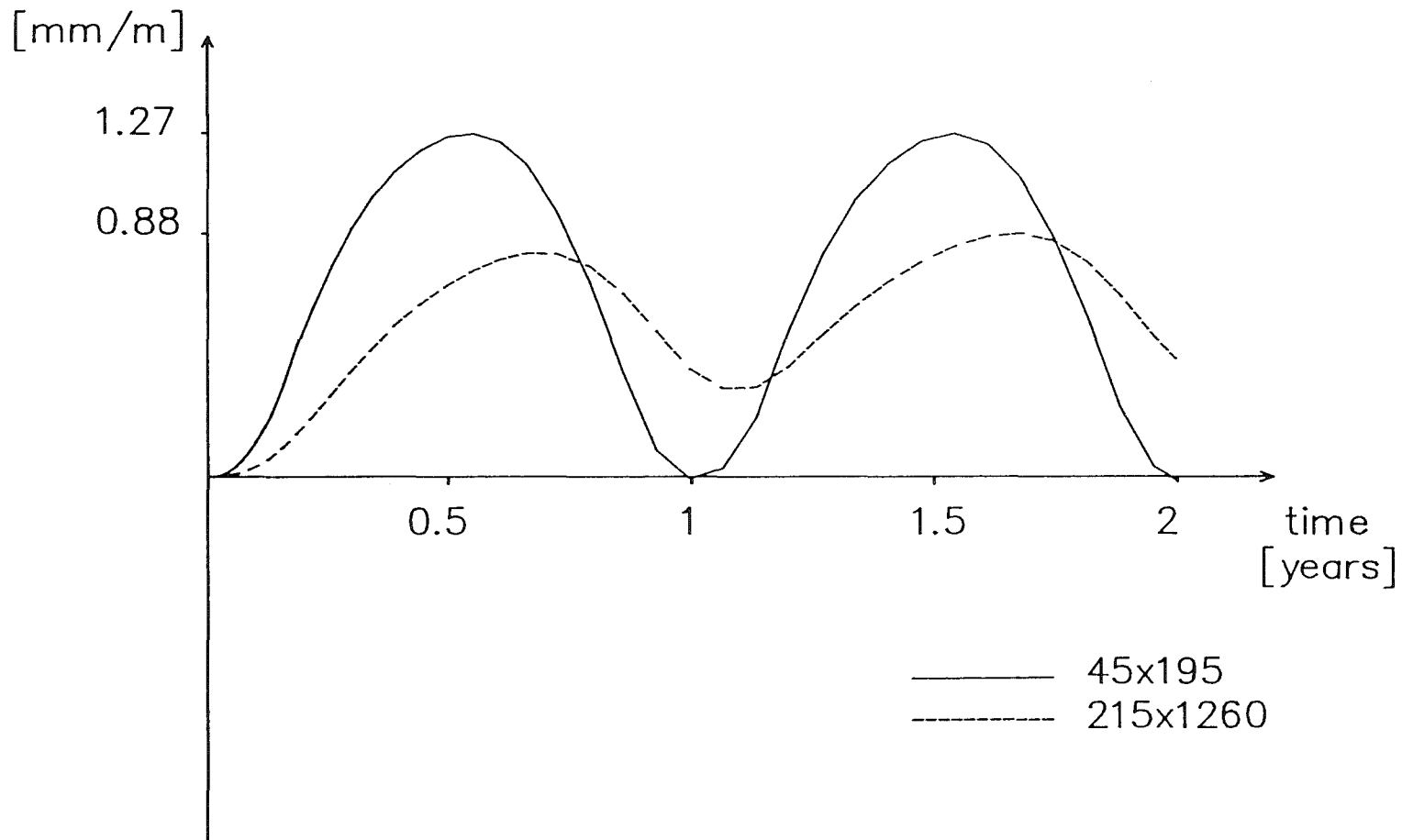
Degree of freedom no. 9
Vertical displacement, glulam beam 45x195



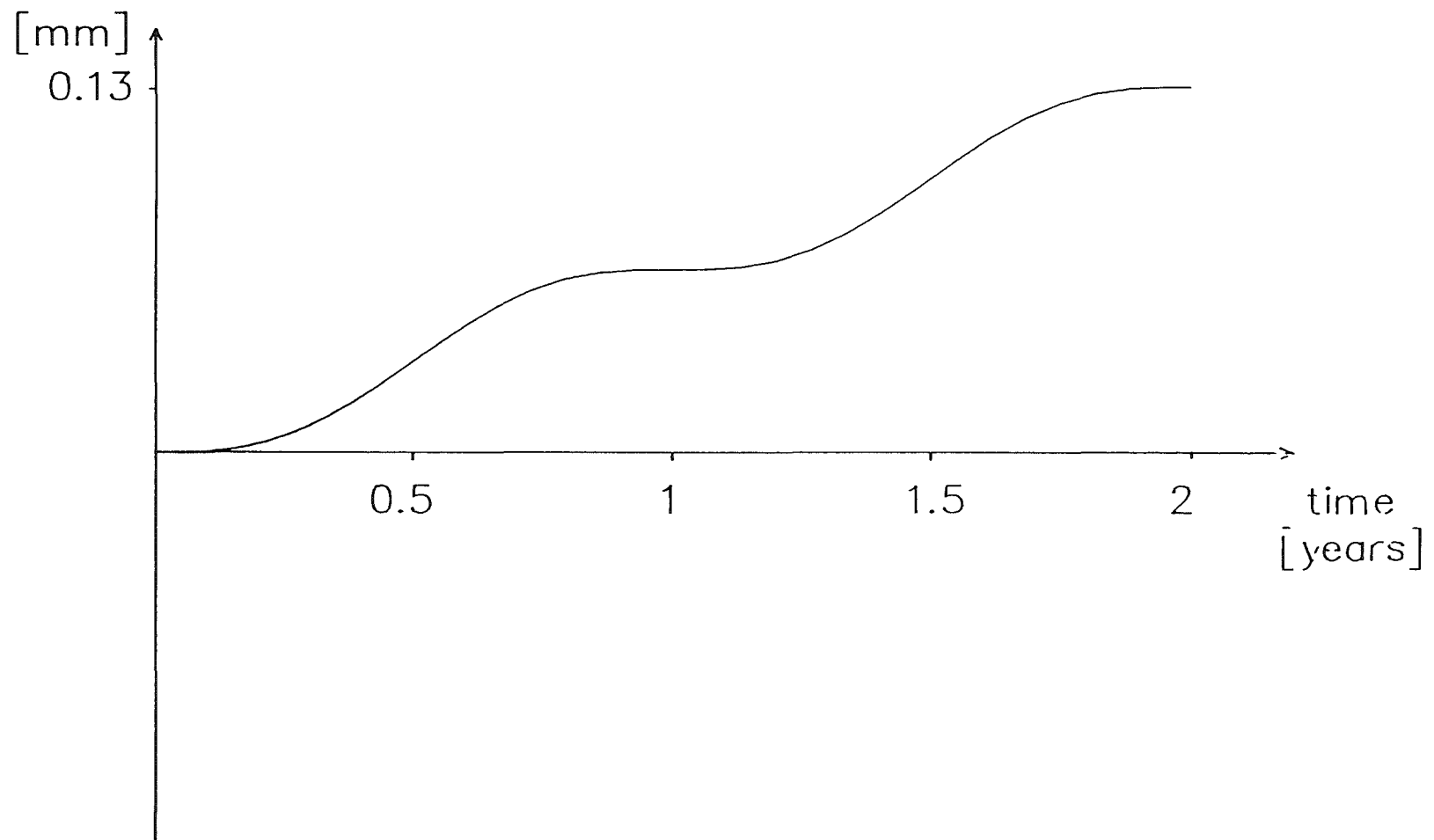
Degree of freedom no. 9
 Vertical displacement, glulam beam



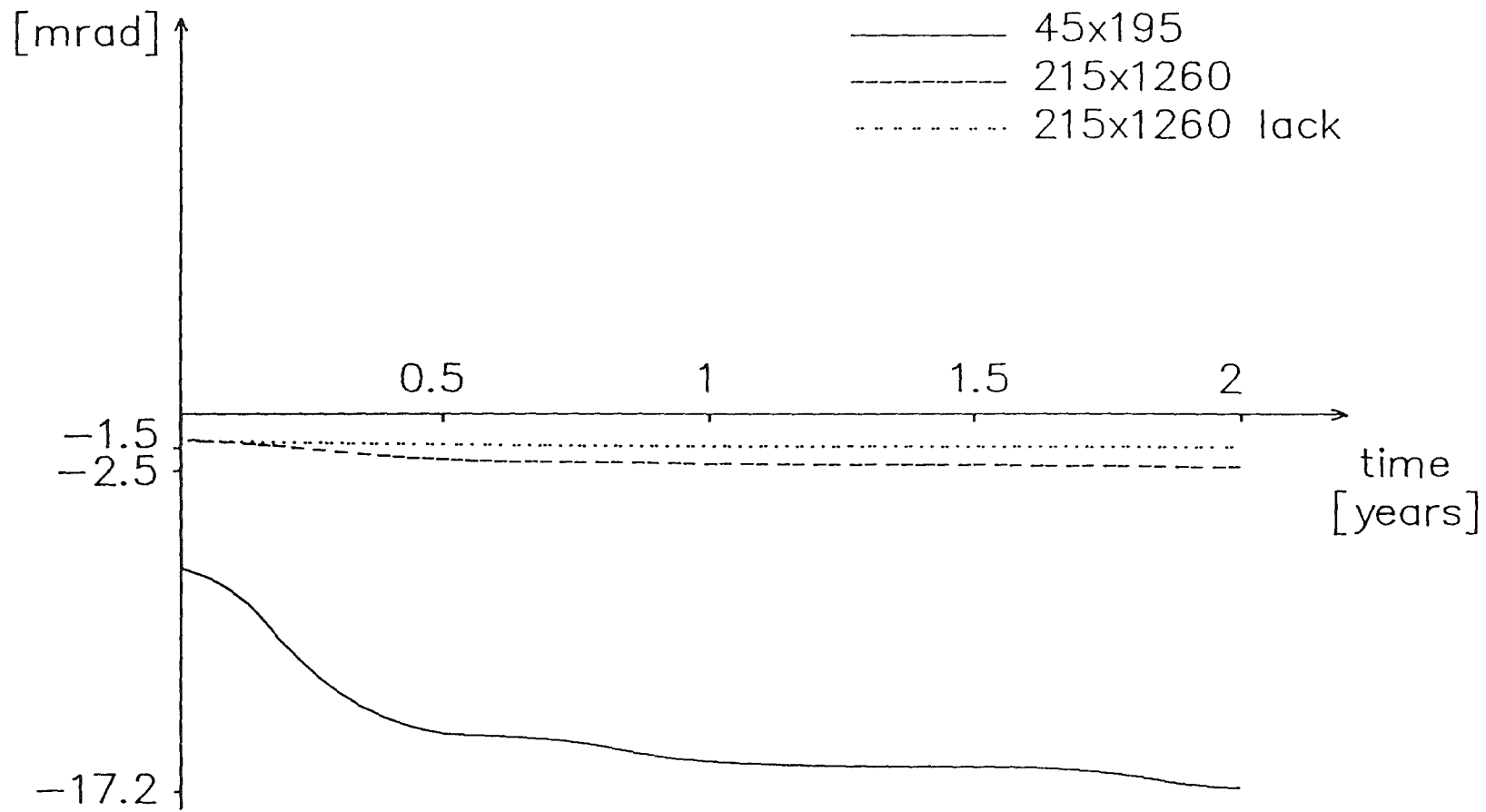
Degree of freedom no. 1
Shrinkage, glulam beam



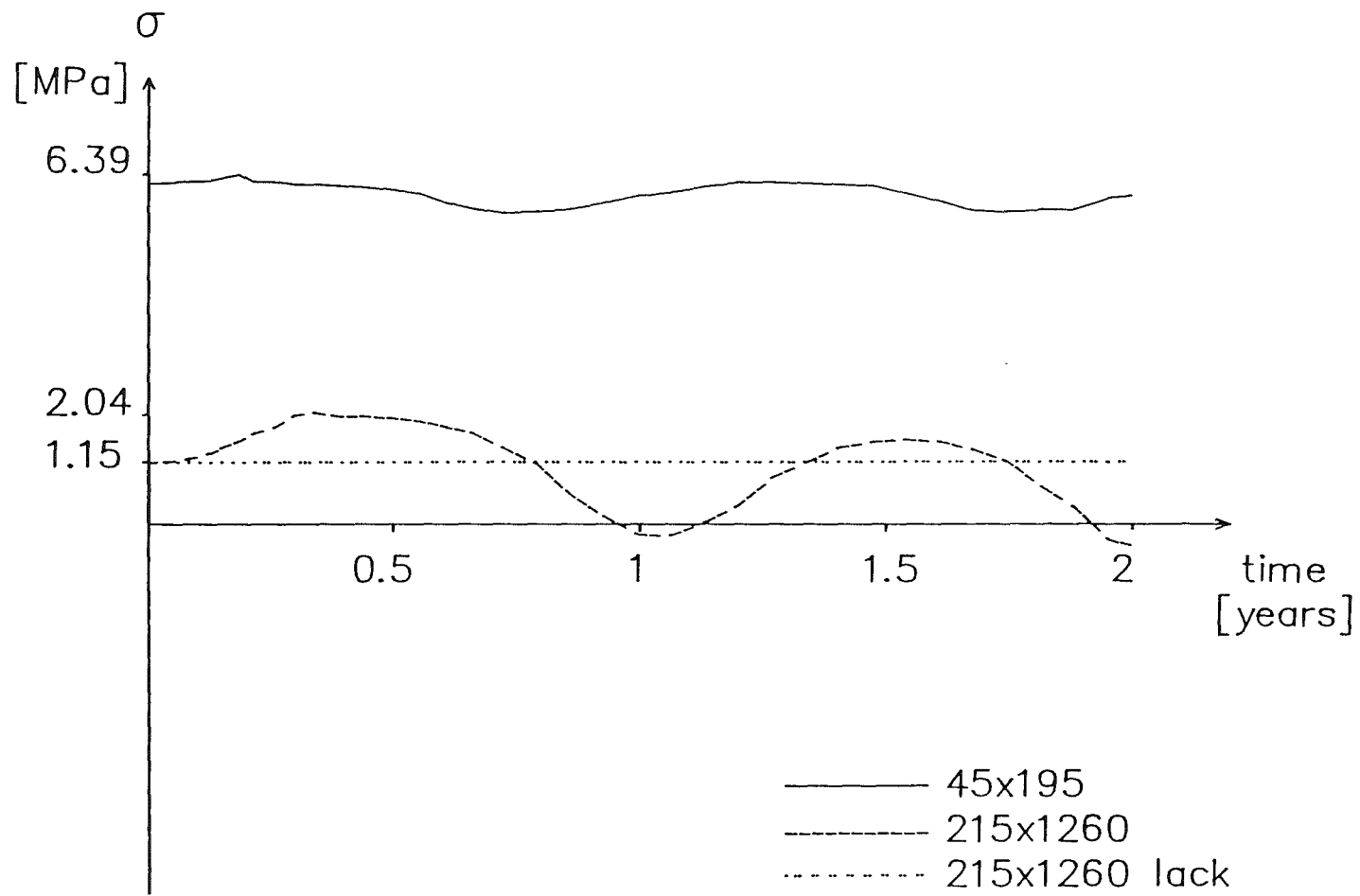
Degree of freedom no. 1
 Shrinkage, glulam beam
 Values are divided by length of resp. beam



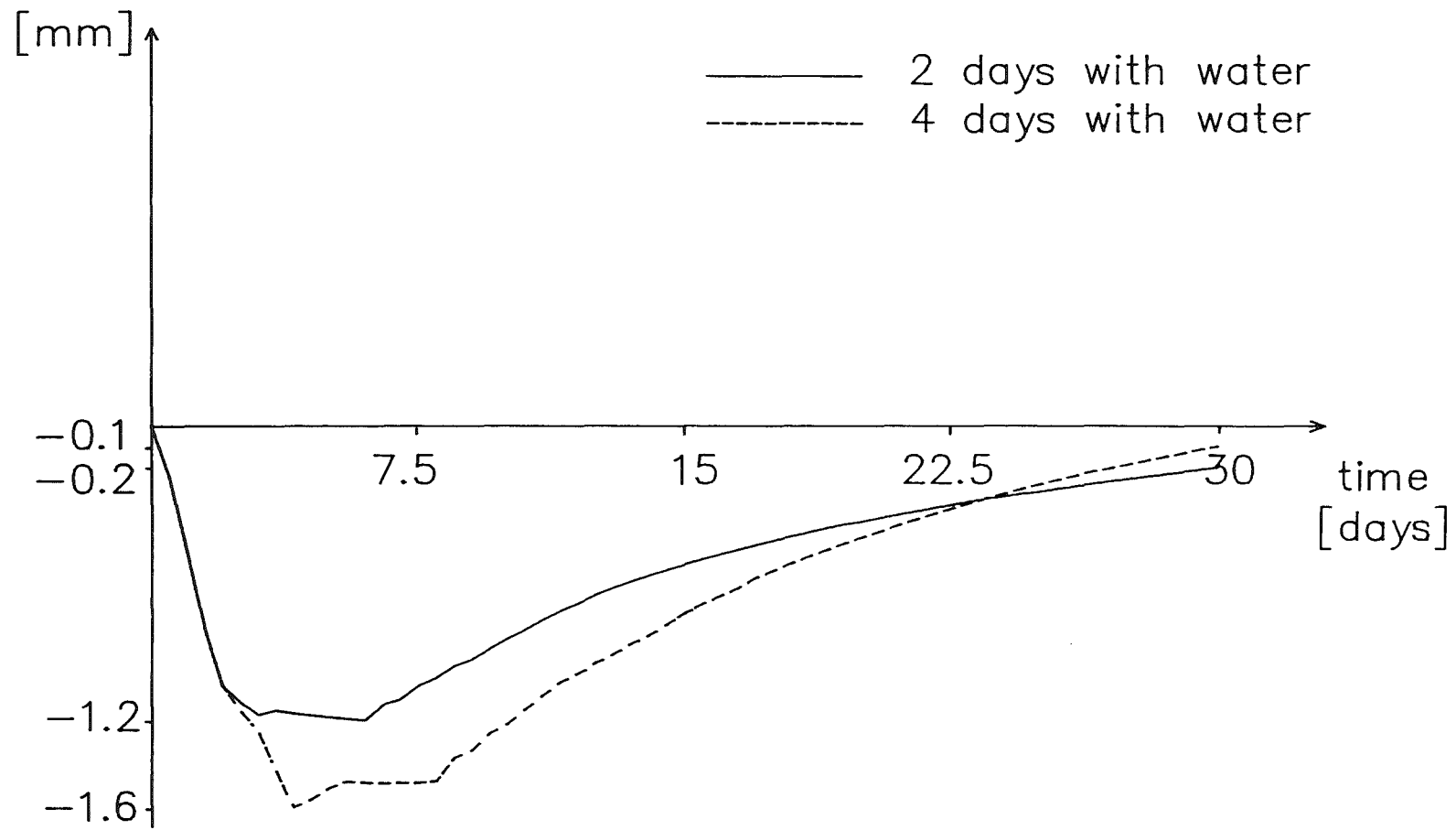
Degree of freedom no. 1 215x1260 lack
Shrinkage, glulam beam



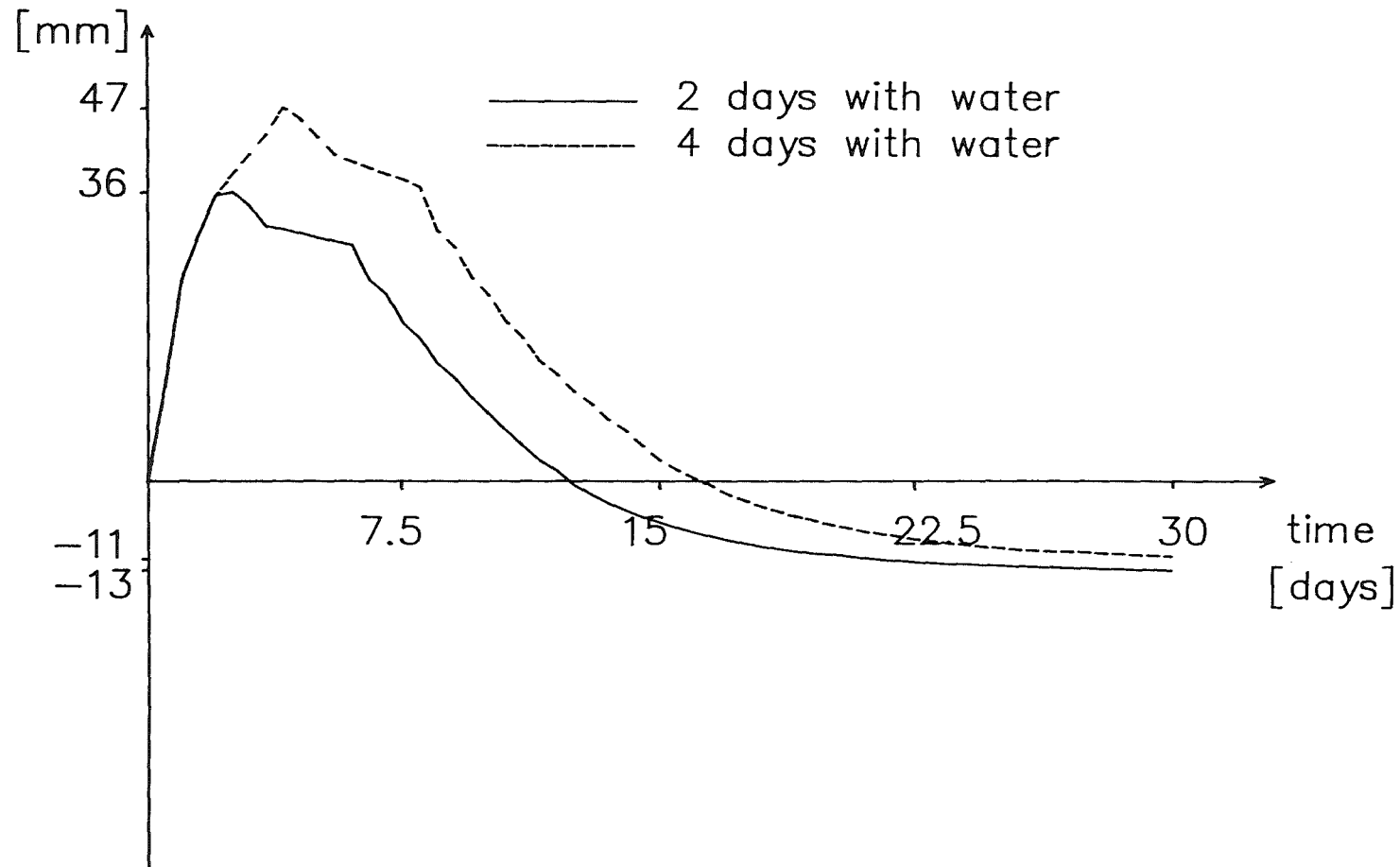
Degree of freedom no. 3
 Rotation at support, glulam beam



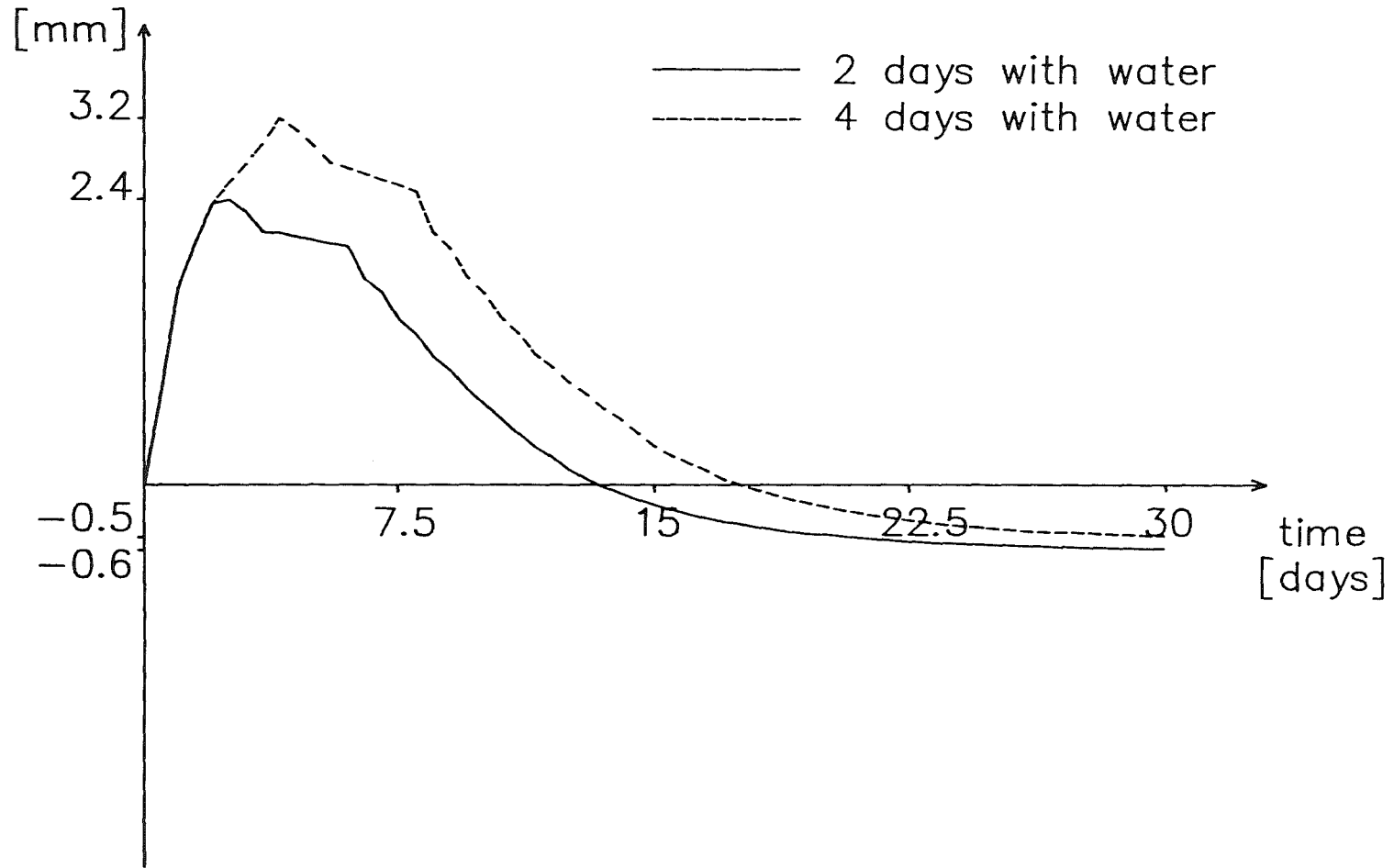
Stresses at lower layer
Glulam beam



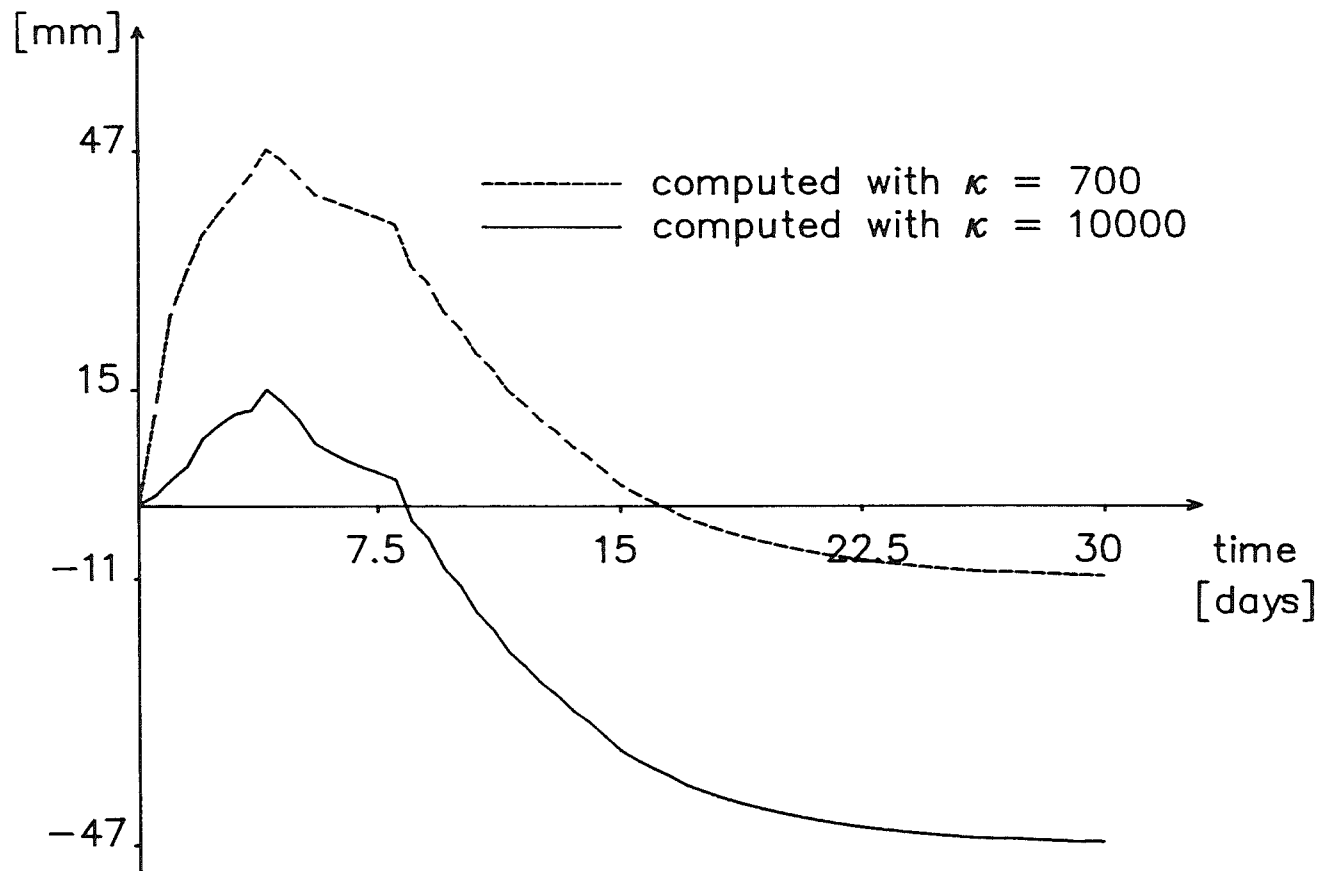
Degree of freedom no. 1
Shrinkage
simply supported particle board



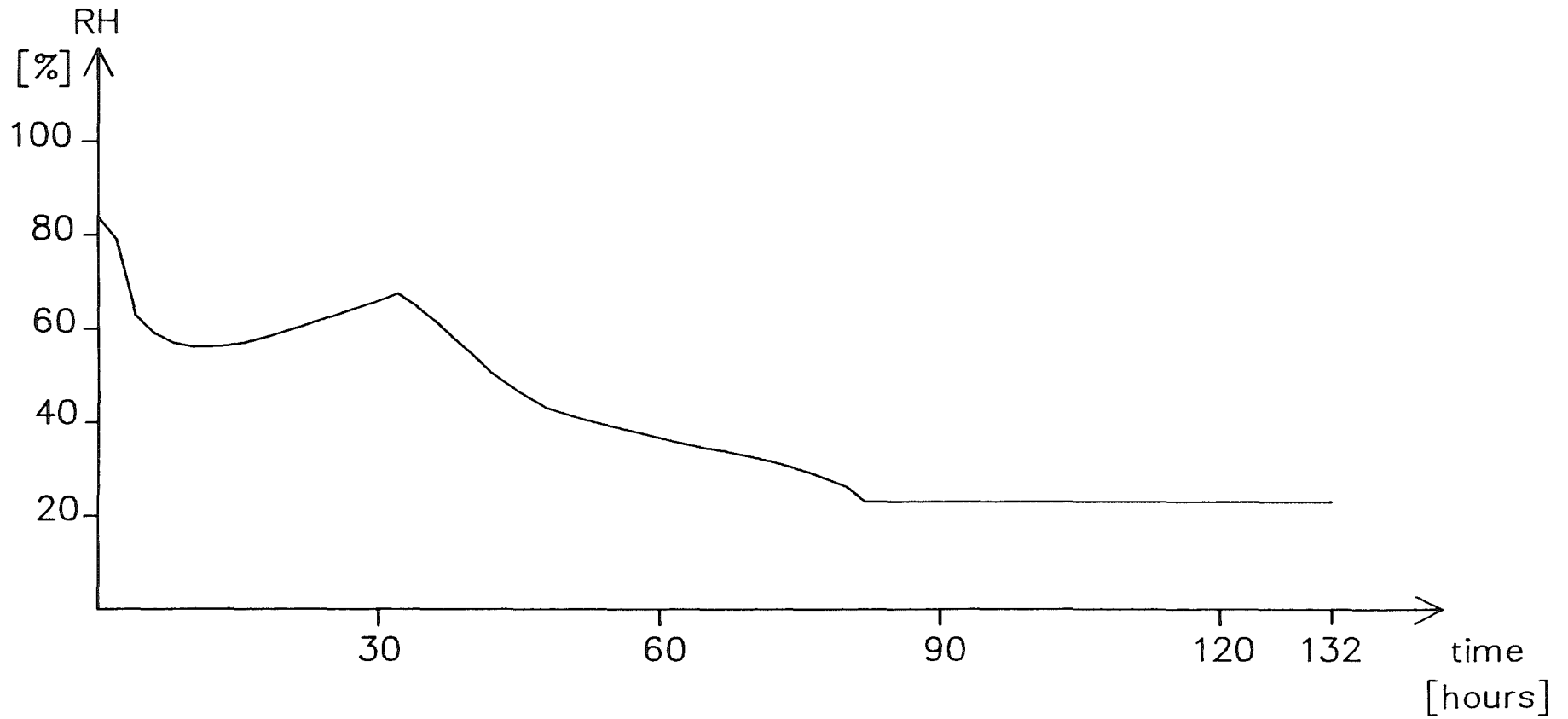
Degree of freedom no. 9
 Vertical displacement
 simply supported particle board



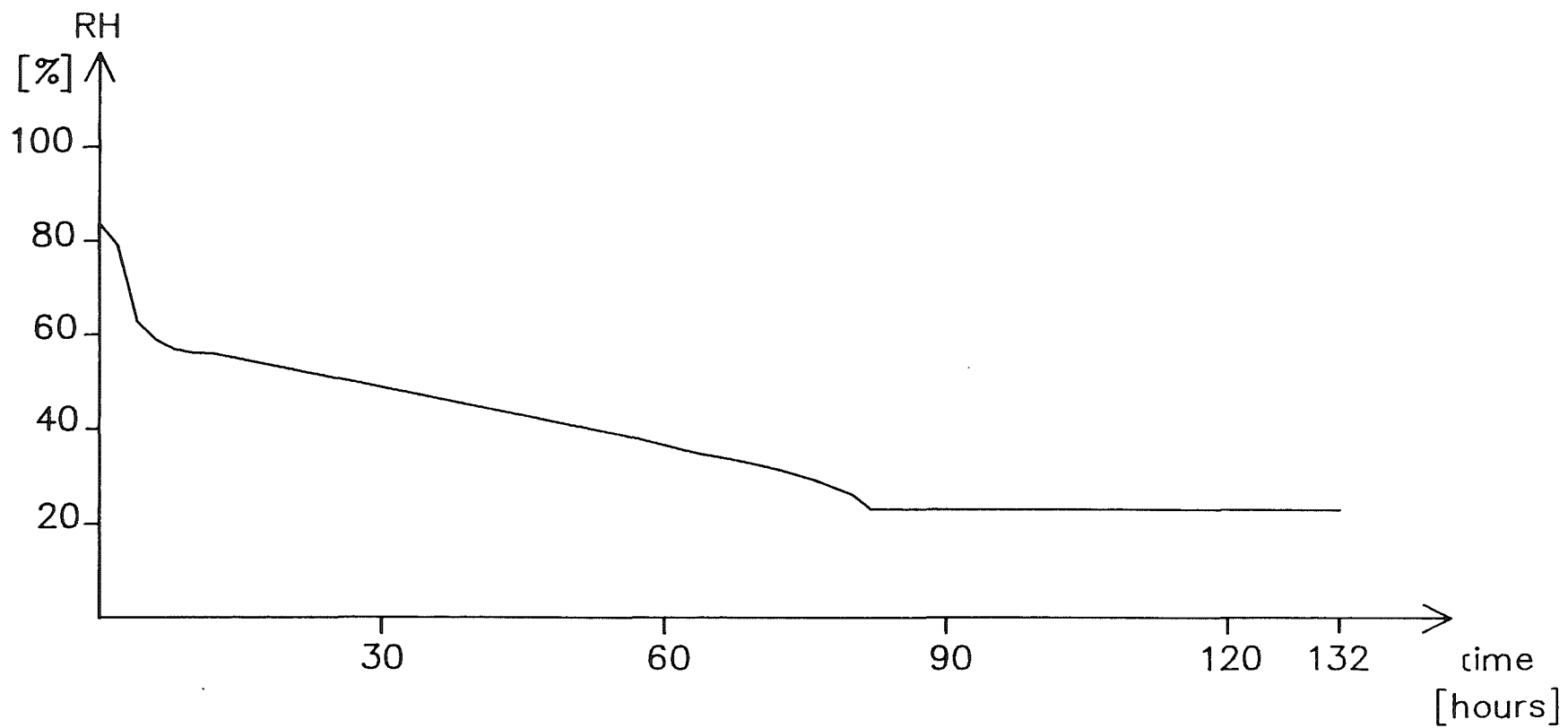
Degree of freedom no. 5
Vertical displacement
particle board on three supports



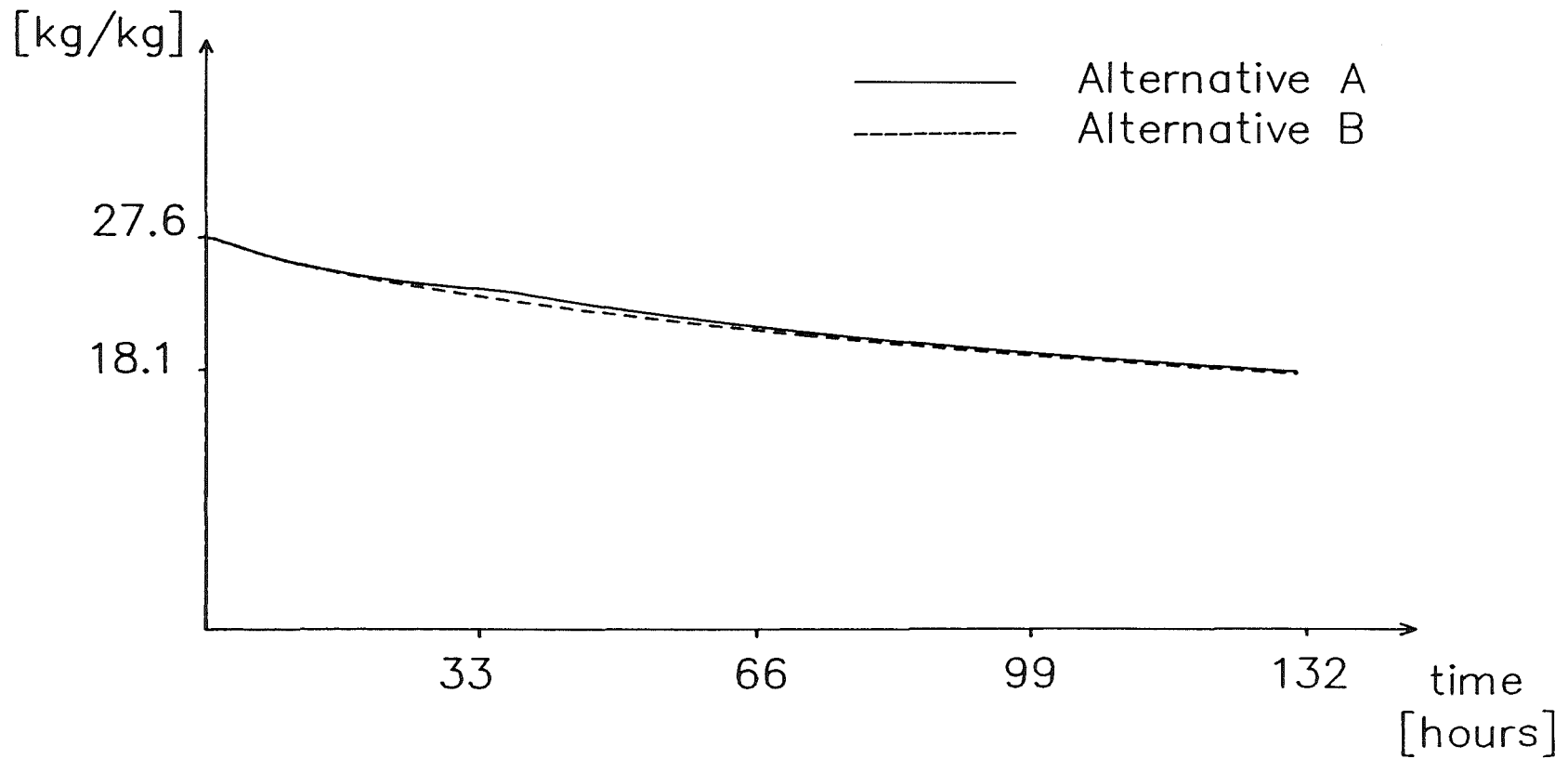
Degree of freedom no. 9
Vertical displacement
simply supported particle board,
4 days with water



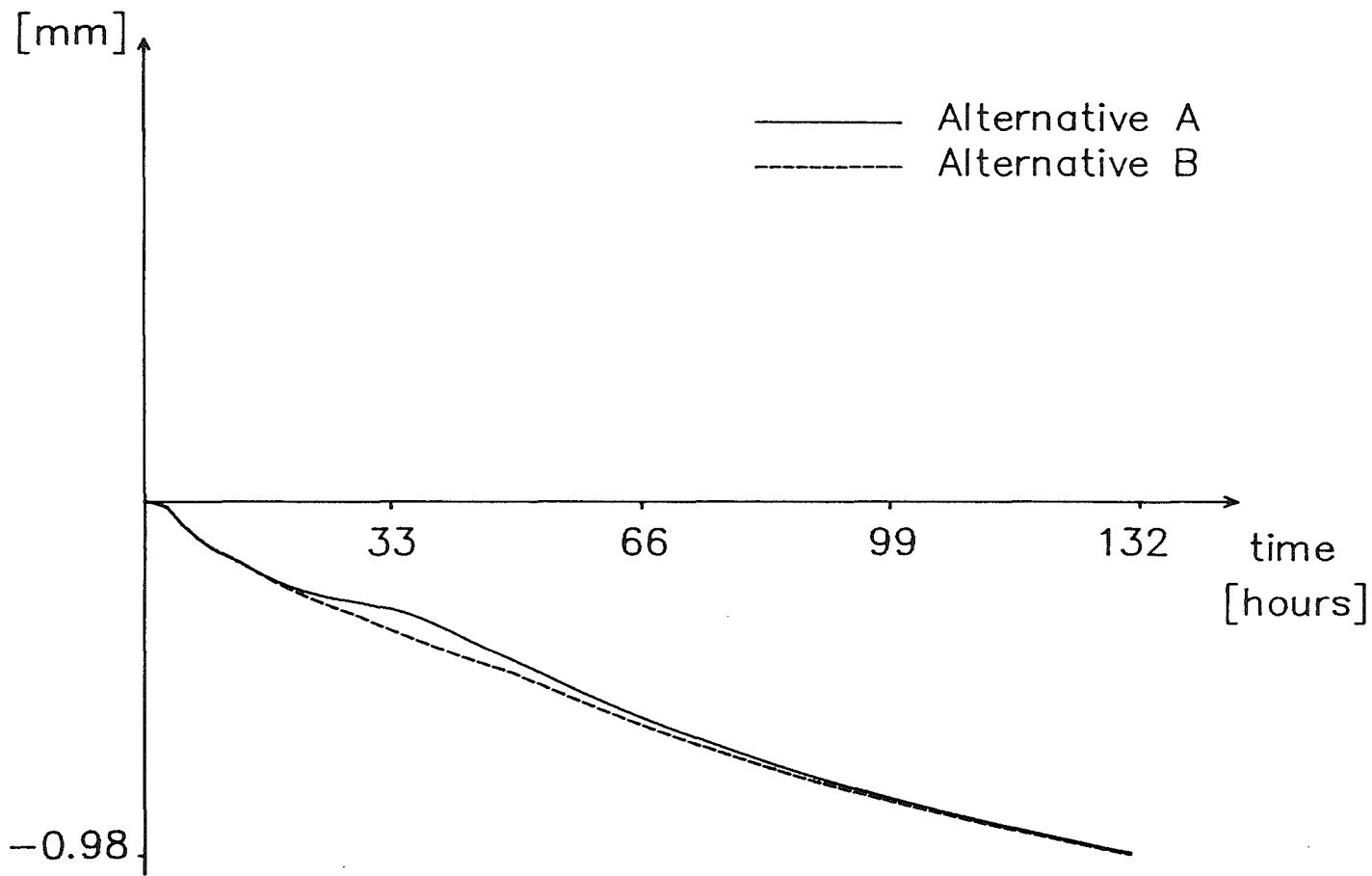
Variations of Relative Humidity, drying of timber
Alternative A



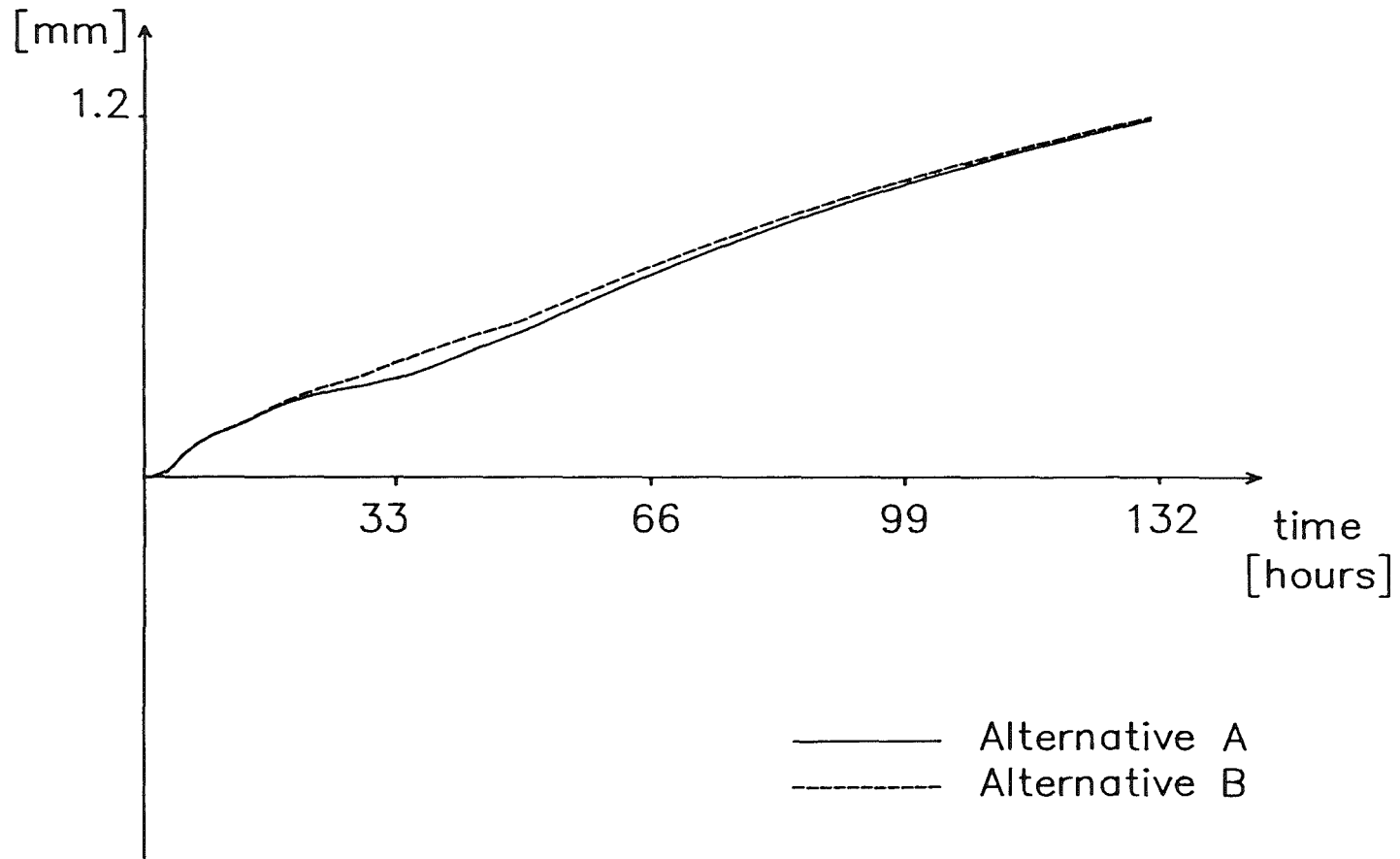
Variations of Relative Humidity, drying of timber
Alternative B



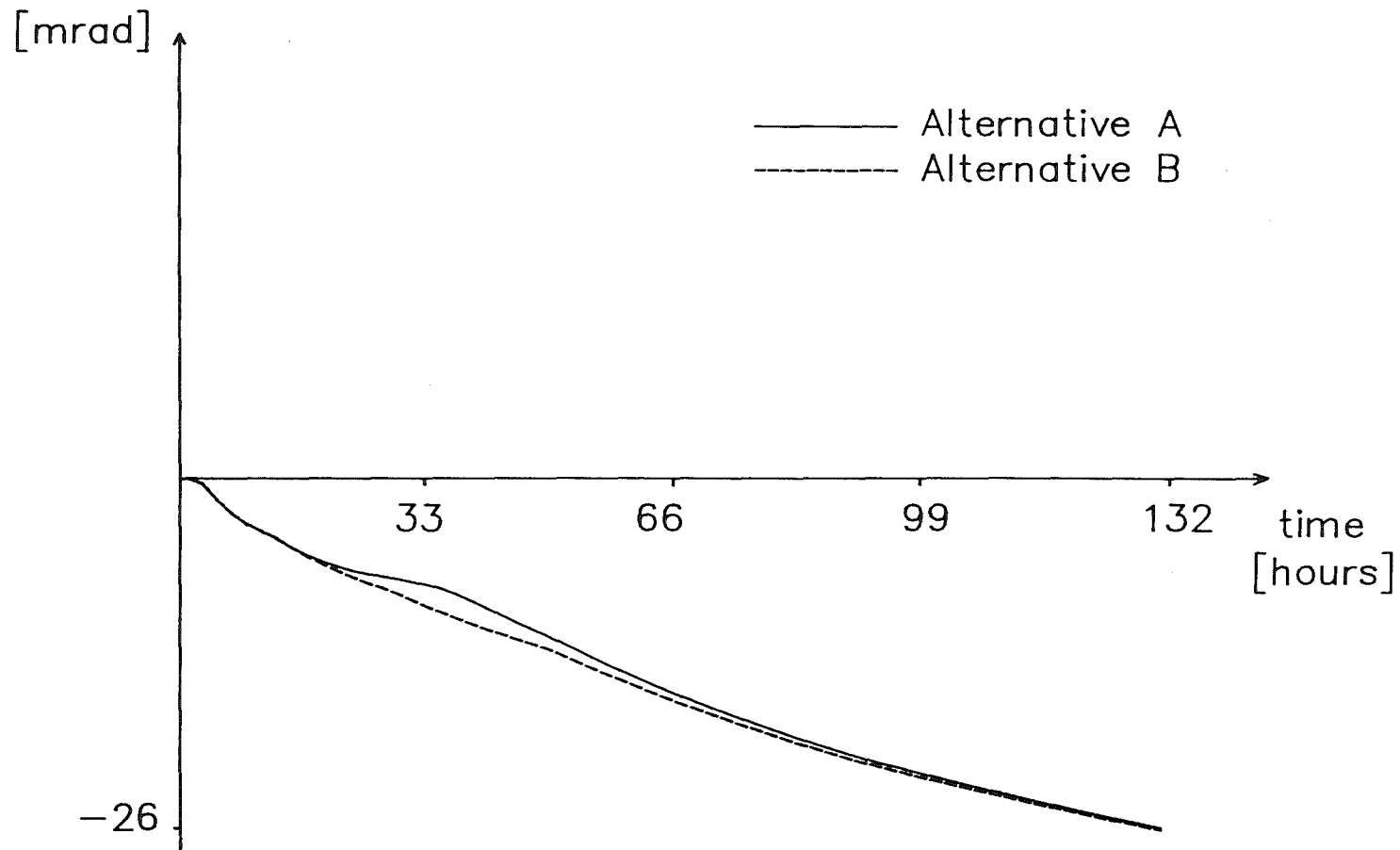
Average of moisture content, drying of timber



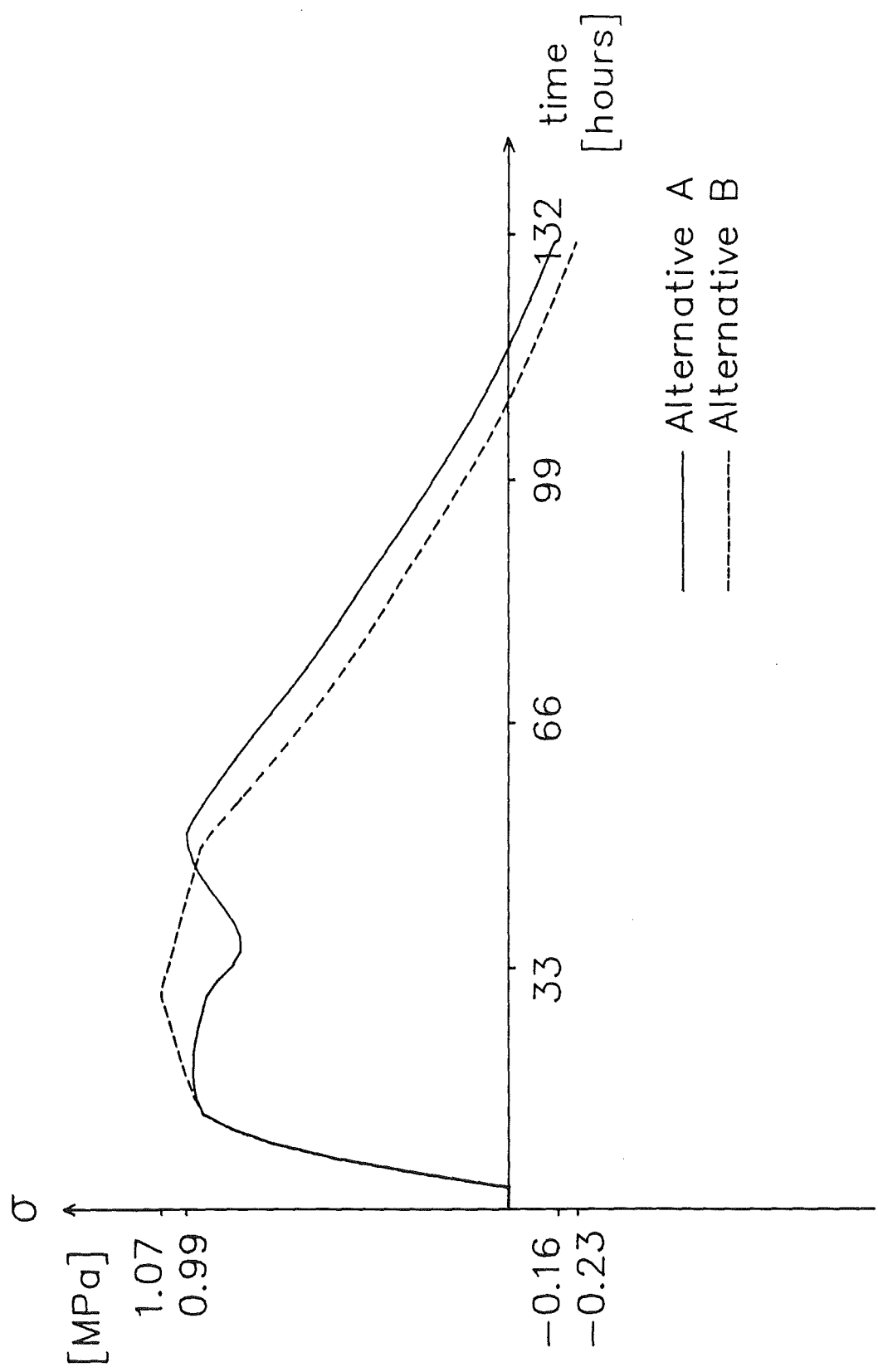
Degree of freedom no. 5
Vertical displacement, drying of timber



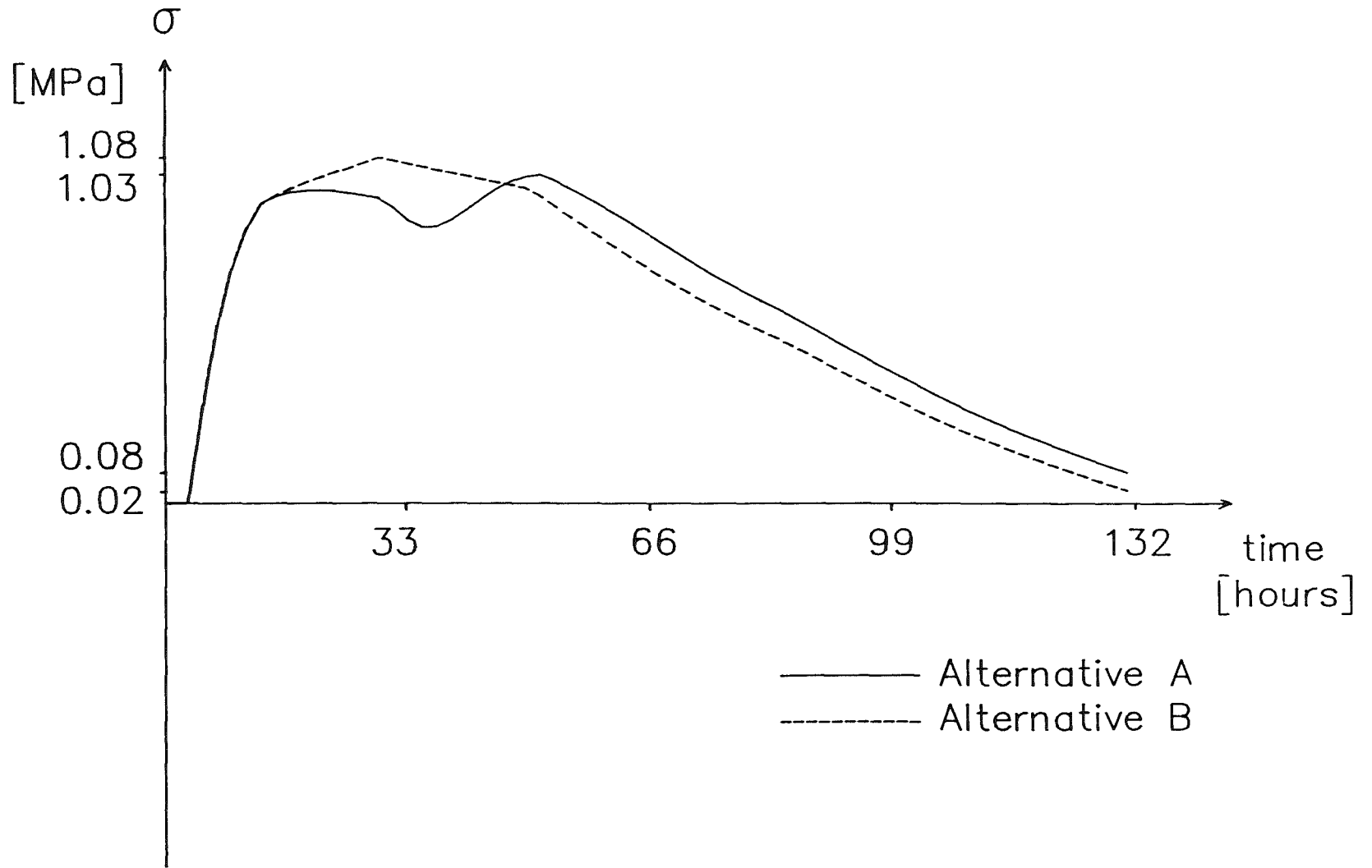
Degree of freedom no. 1
Shrinkage, drying of timber



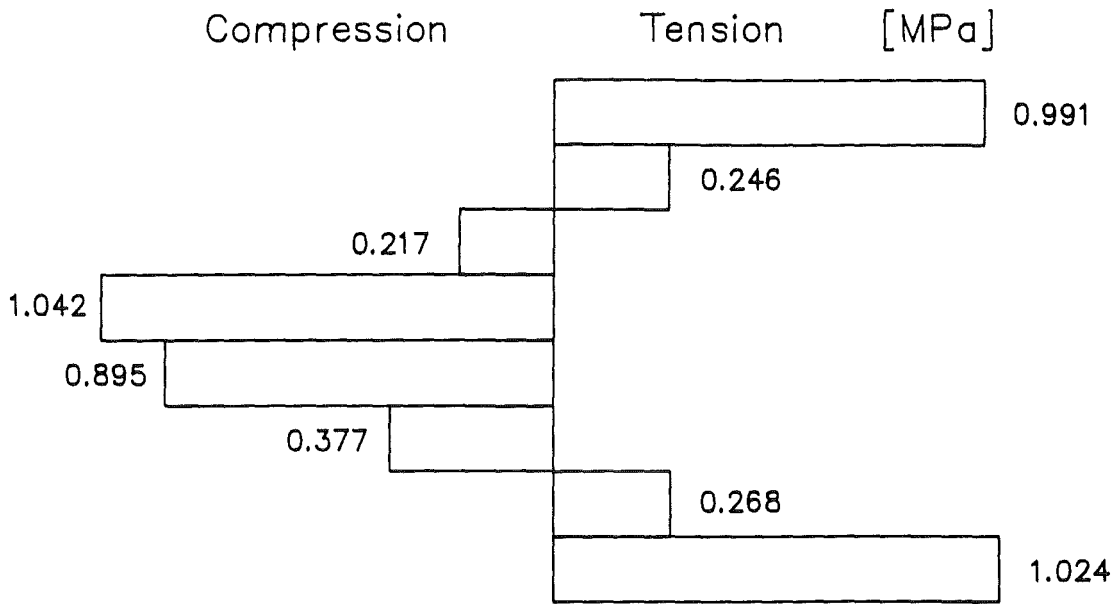
Degree of freedom no. 3
Rotation on support, drying of timber



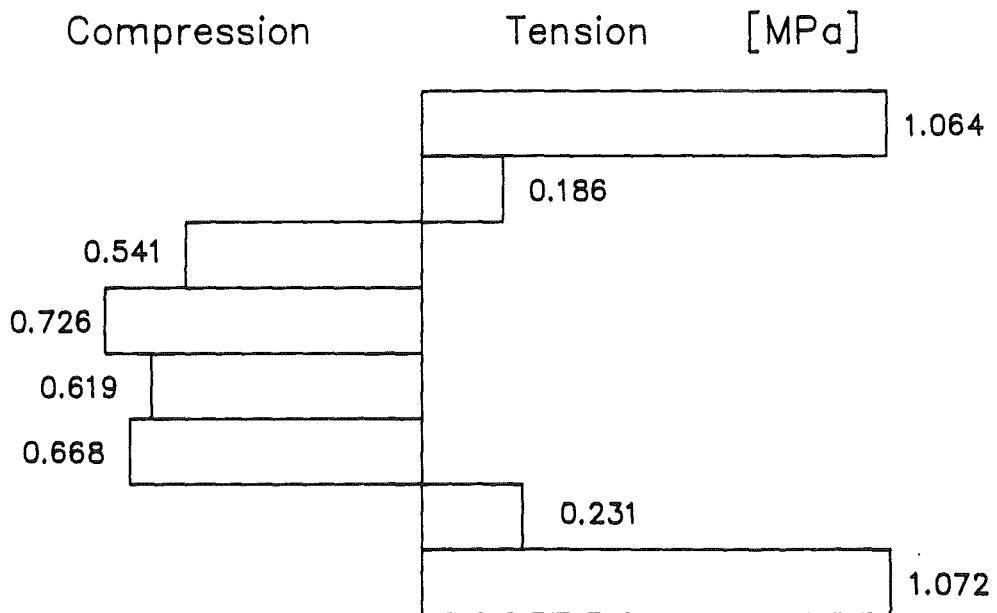
Stress at upper layer, drying of timber



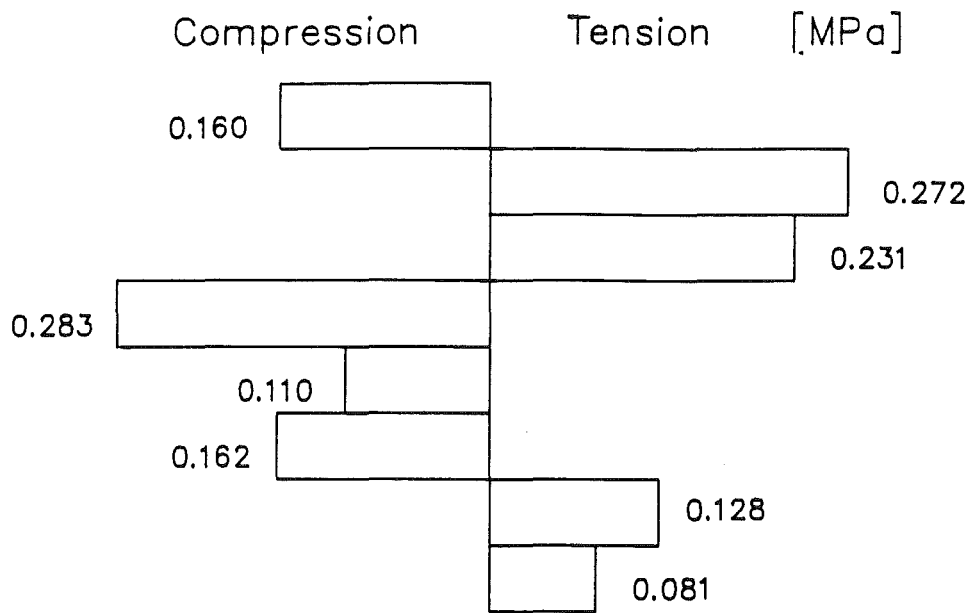
Stress at lower layer, drying of timber



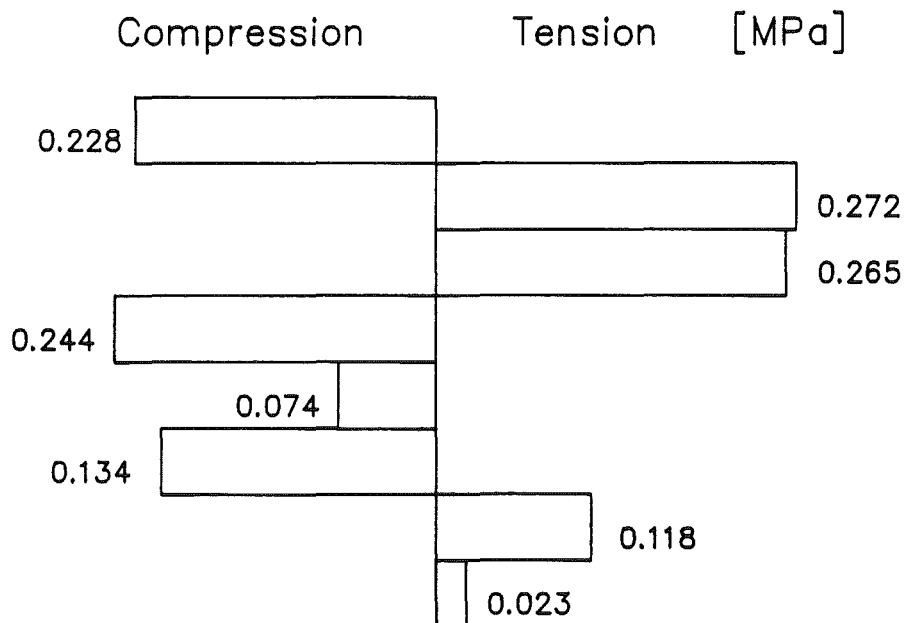
Stressdistribution after 50 hours, alternative A



Stressdistribution after 30 hours, alternative B
Drying of timber



Stressdistribution after 132 hours, alternative A



Stressdistribution after 132 hours, alternative B

Drying of timber

BILAGA 2, INNEHÅLL

Materialfiler för fuktflödesberäkning

* spruce.mat, används i limträbalk-simuleringen resp vid torkning av virke

* pboard.mat, används i spånskive-simuleringen

Beteckningar: Phi = relativ fuktighet [%]
 W = fukthalt [kg H₂O/m³]
 Psi = fuktpotential [kg H₂O/m s]
 Dw = transportkoefficient
 Dphi = transportkoefficient
 Cpsi = fuktkapacitet

Materialfiler för mekanosorptionsberäkning

* spruce.moi, limträbalkar

* pboard.moi, spånskiva, yttre lager
 pboardm.moi, spånskiva, inre lager

* tangent.moi, virkestorkning, tangentiella fibrer
 radiell.moi, virkestorkning, radiella fibrer
 medelv.moi, virkestorkning, intermediära fibrer

TWO-DIMENSIONAL MOISTURE FLOW < Press any key >

Filename = spruce2.MAT

spruce
Reference: extrapolerad bertelsen
Date: 90-04-12

Notes:

Phi	W	Psi	Dw	Dphi	Cpsi
20.000	2.9E+0001	0.0E+0000	2.9E-0011	2.3E-0011	3.5E+0010
30.000	3.7E+0001	2.3E-0010	3.7E-0011	3.0E-0011	2.7E+0010
35.000	4.1E+0001	3.8E-0010	6.0E-0011	4.8E-0011	1.7E+0010
40.000	4.5E+0001	6.2E-0010	1.2E-0010	7.4E-0011	8.1E+0009
45.000	4.8E+0001	9.9E-0010	1.4E-0010	1.1E-0010	7.3E+0009
50.000	5.2E+0001	1.5E-0009	2.7E-0010	1.6E-0010	3.8E+0009

TWO-DIMENSIONAL MOISTURE FLOW < Press any key >

Filename = spruce2.MAT

spruce
Reference: extrapolerad bertelsen
Date: 90-04-12

Notes:

Phi	W	Psi	Dw	Dphi	Cpsi
55.000	5.5E+0001	2.3E-0009	2.8E-0010	2.2E-0010	3.6E+0009
60.000	5.9E+0001	3.4E-0009	3.0E-0010	3.0E-0010	3.3E+0009
65.000	6.4E+0001	4.9E-0009	3.3E-0010	4.0E-0010	3.0E+0009
70.000	7.0E+0001	6.9E-0009	3.7E-0010	5.2E-0010	2.7E+0009
75.000	7.7E+0001	9.5E-0009	4.6E-0010	6.5E-0010	2.2E+0009
80.000	8.4E+0001	1.3E-0008	4.0E-0010	8.0E-0010	2.5E+0009

TWO-DIMENSIONAL MOISTURE FLOW < Press any key >

Filename = spruce2.MAT

spruce
Reference: extrapolerad bertelsen
Date: 90-04-12

Notes:

Phi	W	Psi	Dw	Dphi	Cpsi
70.000	7.0E+0001	6.9E-0009	3.7E-0010	5.2E-0010	2.7E+0009
75.000	7.7E+0001	9.5E-0009	4.6E-0010	6.5E-0010	2.2E+0009
80.000	8.4E+0001	1.3E-0008	4.0E-0010	8.0E-0010	2.5E+0009
85.000	9.4E+0001	1.7E-0008	7.6E-0010	9.1E-0010	1.3E+0009
90.000	1.0E+0002	2.1E-0008	7.1E-0010	1.1E-0009	1.4E+0009
95.000	1.1E+0002	2.7E-0008	5.6E-0010	1.3E-0009	1.8E+0009
100.000	1.2E+0002	3.4E-0008			

TWO-DIMENSIONAL MOISTURE FLOW ———< Press any key >—

Filename = spånskiva

Reference: A-C Andersson
Date: 88-04-27

Notes: Data från 22 mm spånskiva, densitet 640 kg/m3

Phi	W	Psi	Dw	Dphi	Cpsi
40.000	4.0E+0001	0.0E+0000			
50.000	5.0E+0001	2.9E-0010	2.9E-0011	2.9E-0011	3.5E+0010
55.000	5.5E+0001	4.4E-0010	3.0E-0011	3.0E-0011	3.4E+0010
60.000	6.0E+0001	5.9E-0010	3.2E-0011	3.2E-0011	3.2E+0010
65.000	6.5E+0001	7.6E-0010	3.4E-0011	3.4E-0011	2.9E+0010
70.000	7.1E+0001	9.5E-0010	3.1E-0011	3.7E-0011	3.2E+0010
			3.0E-0011	4.3E-0011	3.3E+0010

TWO-DIMENSIONAL MOISTURE FLOW ———< Press any key >—

Filename = spånskiva

Reference: A-C Andersson
Date: 88-04-27

Notes: Data från 22 mm spånskiva, densitet 640 kg/m3

Phi	W	Psi	Dw	Dphi	Cpsi
65.000	6.5E+0001	7.6E-0010			
70.000	7.1E+0001	9.5E-0010	3.1E-0011	3.7E-0011	3.2E+0010
75.000	7.8E+0001	1.2E-0009	3.0E-0011	4.3E-0011	3.3E+0010
80.000	8.8E+0001	1.4E-0009	2.5E-0011	5.0E-0011	4.0E+0010
85.000	9.9E+0001	1.7E-0009	2.7E-0011	5.8E-0011	3.8E+0010
90.000	1.1E+0002	2.0E-0009	2.5E-0011	6.9E-0011	4.1E+0010
95.000	1.4E+0002	2.5E-0009	1.6E-0011	8.4E-0011	6.4E+0010

```
500
1.0 0.0 0.0 1.0
10400 50 800 700 26
0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 100000
0.1014e-005 0.3614e-005 0.2096e-005 0.5190e-006 0.1614e-005
0.2318e-004 0.2915e-005 0.3629e-004
```

```
6
0 1.25 0 200 0 0
7 1.2 1.1e-003 40 10e-003 10e-003
12 1.12 1.92e-003 10 18e-003 18e-003
16 1.04 2.6e-003 5 24e-003 24e-003
20 1 3.2e-003 1 30e-003 30e-003
25 0.8 4.0e-003 0.5 38e-003 38e-003
```

```
0.001 0.001 0.005
```

```
*** SPRUCE.MOI = parameterfil för furu
*** värdena för mechano-sorptionsfaktorerna (800, drag; 700, tryck)
*** är valda från försök av Toratti, Mohager och Armstrong/Kingston
```

```
*** övriga materialdata är delvis tagna från Kollmans bok
*** kryp-parameter från Erikson & Noren
```

```
*** sista raden innehåller konvergensparametrar
```

```
*** observera: kolonn 3 i wprop innehåller parametrar för längd-
*** ändring i balkens längsriktning, kolonn 5 innehåller parametrar
*** för ändring i över balkens höjd och kolonn 6 för ändring över
*** bredden om man vrider på balken kan indata på denna fil behöva
*** byta plats
```

800
1.0 0.0 0.0 1.0
3000 10 700 700 20
0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 100000
0.885624e-005 -0.794286e-006 0.164416e-004 -0.744186e-005
0.155048e-003 0.146982e-003 0.44802e-003 0.575062e-003

8
0 1.6 0 500 0 0
6 1.251 2.024e-003 110 3.0e-002 2.024e-003
8 1.087 2.699e-003 9.5 4.1e-002 2.699e-003
13 1 4.3852e-003 1 8.5e-002 4.3852e-003
20 0.84 6.7946e-003 0.1 10e-002 6.7964e-003
24 0.74 7.65e-003 0.07 13e-002 7.65e-003
28 0.63 8.5e-003 0.04 16e-002 8.5e-003
35 0.45 1e-002 0.01 20e-002 1e-002

0.01 0.01 0.05

*** PBOARDE.MOI = parameterfil för spånskiva, yttre lager
*** materialdata från Å. Lundgrens avhandling
*** mechano-sorptionsparametrar från Armstrong & Grossman
*** parametrar även från artiklar av Niemz
*** observera att detta gäller för de yttre lagren av skivan som
*** består av finare partiklar och har högre E-modul men större
*** krypning

*** sista raden innehåller konvergensparametrar

*** observera: kolonn 3 i wprop innehåller parametrar för längd-
*** ändring i balkens längsriktning, kolonn 5 innehåller parametrar
*** för ändring i över balkens höjd och kolonn 6 för ändring över
*** bredden om man vrider på balken kan indata på denna fil behöva
*** byta plats

600
1.0 0.0 0.0 1.0
1900 10 700 700 20
0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 100000
0.1914e-005 0.2614e-005 0.2096e-005 0.5190e-006 0.1614e-005
0.2318e-004 0.2915e-005 0.3629e-004

8
0 1.6 0 300 0 0
4 1.5 1.6e-003 90 1.733e-002 1.6e-003
8 1.4 3.2e-003 3.0 3.467e-002 3.2e-003
12 1.3 4.8e-003 1.8 5.2e-002 4.8e-003
18 0.7 7.9e-003 0.5 8.933e-002 7.9e-003
24 0.6 10.5e-003 0.3 14e-002 10.5e-003
28 0.5 12e-003 0.2 17e-002 12e-003
35 0.4 1.5e-002 0.1 22e-002 1.5e-002

0.01 0.01 0.05

*** PBOARDM.MOI = parameterfil för spånskiva, inre lager
*** materialdata från Å. Lundgrens avhandling
*** mechano-sorptionsparametrar från Armstrong & Grossman
*** parametrar även från artiklar av Niemz och Gressel
*** dessa data gäller för den inre delen av spånskivan som består av
*** spån och har lägre E-modul men mindre krypning än totalt

*** sista raden innehåller konvergensparametrar

*** observera: kolonn 3 i wprop innehåller parametrar för längd-
*** ändring i balkens längsriktning, kolonn 5 innehåller parametrar
*** för ändring i över balkens höjd och kolonn 6 för ändring över
*** bredden om man vrider på balken kan indata på denna fil behöva
*** byta plats

```
430
1.0 0.0 0.0 1.0
100 1.75 50 50 26
0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 100000
0 0 0 0 0 0 0 0
7
4 3.00 -0.0628 1 -0.0330 -3.30e-3
9 2.546 -0.0527 1 -0.0255 -2.55e-3
13 2.182 -0.0403 1 -0.0195 -1.95e-3
17 1.818 -0.0279 1 -0.0135 -1.35e-3
21 1.455 -0.0155 1 -0.0075 -0.75e-3
26 1.00 0.00 1 0.00 0.00
28 1.00 0.00 1 0.00 0.00
```

```
0.001 0.001 0.005
```

```
*** TANGENT.MOI
*** värdena gäller för furu i tangentiell riktning
*** krypning försummas
*** sista raden innehåller konvergensparametrar
```

430
1.0 0.0 0.0 1.0
200 2.50 130 130 26
0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 100000
0 0 0 0 0 0 0 0

7
4 3.00 -0.0330 1 -0.0628 -3.30e-3
9 2.546 -0.0255 1 -0.0527 -2.55e-3
13 2.182 -0.0195 1 -0.0403 -1.95e-3
17 1.818 -0.0135 1 -0.0279 -1.35e-3
21 1.455 -0.0075 1 -0.0155 -0.75e-3
26 1.00 0.00 1 0.00 0.00
28 1.00 0.00 1 0.00 0.00

0.001 0.001 0.005

*** RADIELL.MOI
*** värdena gäller för furu i radiell riktning
*** krypning försummas
*** sista raden innehåller konvergensparametrar

430
1.0 0.0 0.0 1.0
150 2.125 90 90 26
0.01 0.1 1 10 100 1000 10000 100000
0 0 0 0 0 0 0 0

7
4 3.00 -0.0506 1 -0.0506 -3.30e-3
9 2.546 -0.0391 1 -0.0391 -2.55e-3
13 2.182 -0.0299 1 -0.0299 -1.95e-3
17 1.818 -0.0207 1 -0.0207 -1.35e-3
21 1.455 -0.0115 1 -0.0115 -0.75e-3
26 1.00 0.00 1 0.00 0.00
28 1.00 0.00 1 0.00 0.00

0.001 0.001 0.005

*** MEDELV.MOI
*** värdena gäller för furu, medelvärde av tangentiell och radiell
*** riktning
*** krypning försummas
*** sista raden innehåller konvergensparametrar

Manual for

FUKT

version 1.0

TABLE OF CONTENTS

1 INTRODUCTION	2
2 DESCRIPTION OF INPUT AND OUTPUT	3
3 VERSION 1.0	10
4 HOW TO RUN THE PROGRAM	12
5 AN EXAMPLE	13

1 INTRODUCTION

The FUKT packet consists of six programs. A two dimensional moisture flow program and a F.E.M. program are the two main executable codes of FUKT. All programs run under MS-DOS on IBM-PC and compatibles. A *87 math co-processor and 550 kbytes of RAM are needed.

The moisture transport is time-dependent and the explicit forward difference method is used. It is optional to solve also for a steady-state case. Here the process is accelerated by overrelaxation.

The structure of the beam section is generated by rectangles via an input mesh. Thus the computational region is bounded by lines parallel to the x-axis and y-axis. Arbitrary materials and initial relative humidities for different subareas can be specified. Hysteresis and temperature influence are not taken into consideration in version 1.0 .

Varying types of boundary conditons may be simulated. Input data are given interactively via a main menu and several sub-menus and may easily be modified. The displacements and stresses are presented in tables.

2 DESCRIPTION OF INPUT AND OUTPUT

The element properties

The beam element which will be used in the following is shown in figure 1

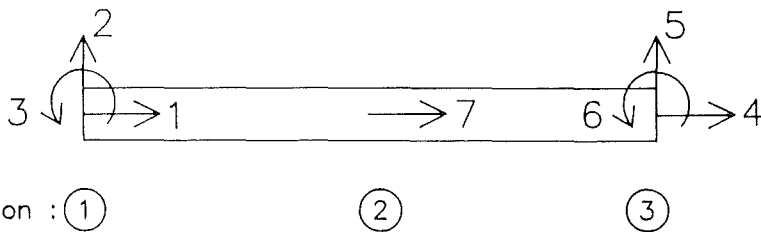


Figure 1. The beam element.

It has seven degrees of freedom (5 displacements and 2 rotations), that can be prescribed to zero only. In figure 2 is shown a statically indeterminate system of three elements in which the nodal variables no 1, 2, 9 and 13 are to be prescribed to zero.

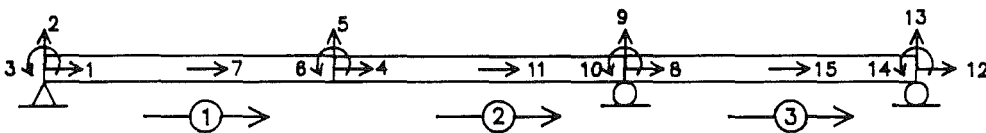


Figure 2. A statically indeterminate system.

The element can be loaded only by concentrated forces [MN] and moments applied at the nodes. The loads are positive in the direction of the degrees of freedom.

The input mesh

All input data connected to the computational region is given via an input mesh. Consider as an example the I-shaped region in figure 3. A suitable input mesh is shown. Here (I,J) are the input mesh coordinates. The mesh segment between $I-1$ and I has the length DX_I . The boundary consists of a number of straight lines, which will be called boundary segments.

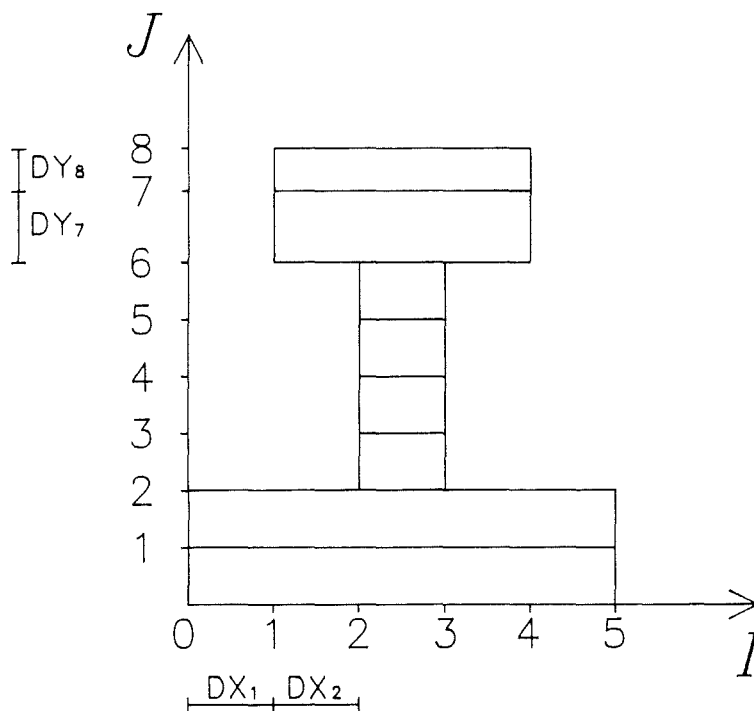


Figure 3. An example of an input mesh.

The number of input mesh intervals in the X-direction is to be given. In the Y-direction there are always 8 intervals, which define 8 layers. In figure 3 there are 5 intervals in the X-direction. The boundaries are enumerated counter-clockwise by giving the input mesh coordinates. It makes no difference which one of the boundaries that is taken as first. In figure 3, if we start at $(0,0)$, we would get $(I,J) = (0,0), (5,0), (5,2), (3,2), (3,6), (4,6), (4,8), (1,8), (1,6), (2,6), (2,2), (0,2), (0,0)$.

The boundaries will be numbered in the order that they are enumerated. In this example the boundary between the input mesh coordinates (0,0) (5,0) is number one and the boundary between the input mesh coordinates (4,8) (1,8) is number 7. The numbers are used when entering the input data of the boundary conditions. E.g. if we want another type of boundary condition on the boundary (2,6) to (2,5) than the type on the boundary (2,5) to (2,2), we simply enter (I,J)=... (1,6), (2,6), (2,5), (2,2), (0,2), (0,0).

The lengths DX_I , DY_J and the number of computation cells N_I , N_J are specified for each mesh segment. The default values of the lengths and the number of computation cells are 1.0 m respectively one cell for each input mesh interval. The lengths of the computation cells in each segment are equal and computed as in figure 4.

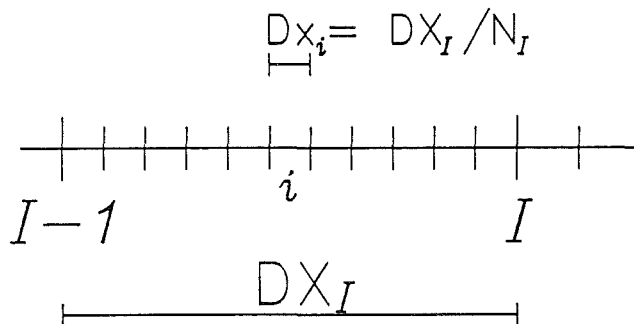


Figure 4 The length DX_i in the computation mesh.

Materials

The maximum number of materials in the section is three. All parameters for the materials are in the *.MAT and *.MOI files. These files must be available in the current directory before running the program. The basic material is specified. This is attributed to the whole region. Other materials can be given to rectangular regions which are defined by their lower left and upper right input mesh coordinates.

Suppose that we have a material A on the area delimited by the rectangle which has the lower left coordinates (2,5) and the upper right coordinates (3,6) in the given input mesh. Suppose further that we have a material B on the area delimited by the two rectangles (0,0) (5,1) and (2,2) (3,3). First the basic material valid for the whole region is given, then the material in the rectangles (2,5) (3,6), (0,0) (5,1) and (2,2) (3,3) is changed to the new materials, i.e. respectively A, B and B.

IMPORTANT : only one material can be used in each of the 8 horizontal layers. See figure 5.

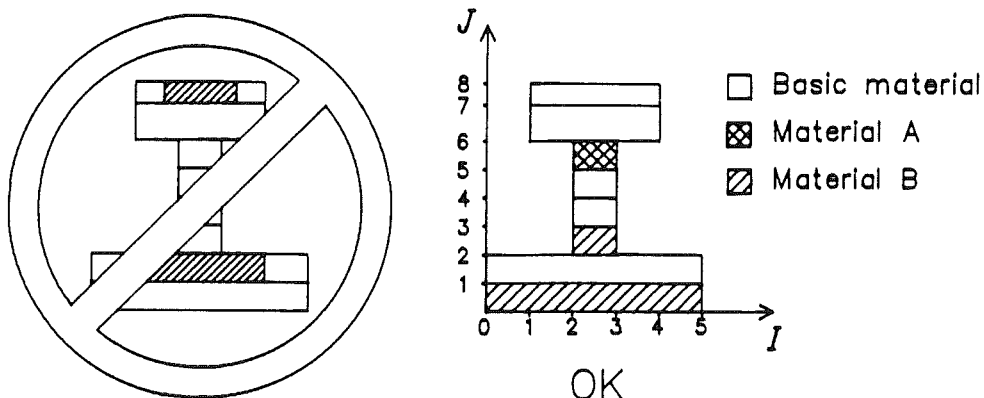


Figure 5. A forbidden section and an allowed one.

Boundary conditions

Different boundary conditions may occur along the sides of the section. Each type is defined by a boundary condition number and a type of function that may be chosen in the list below. All the occurring types are given first. A basic type valid for all boundaries is specified by its number. Then the others are related to their corresponding boundary number. The following types of function $f(t)$ are available : constant, step-wise constant and periodic (sinusoidal).

* $f(t) = \text{constant}$

	0	$t < t_1$
	f_1	$t_1 \leq t < t_2$
* $f(t) =$.	
	.	
	.	
	f_n	$t_n \leq t$

* $f(t) = \text{phi}_0 + \text{phi}_1 \sin(2 \text{pi} (t-t_0)/t_p) \quad t_p > 0$

here is	phi_0	average RH
	phi_1	amplitude of the RH
	pi	3.14
	t_p	period
	t_0	phase

Initial relative humidity

The initial relative humidity is first given as a basic relative humidity distribution, then rectangles with different relative humidity are given. This is similar to the input of materials, but there are no restrictions on these subareas as in figure 5.

Simulation and time intervals

Start and end time for the simulation are given. The simulation time is divided in one or more periods each with a specific time step. This time interval will be used in the F.E.M. program to calculate the displacements and stresses stepwise, thus short time steps are recommended when fast changes in moisture content take place. Each period of equal time interval (except the first one) starts where the previous one ended.

The user may here choose in which section the resulting stress distribution shall be presented by entering element number and position (See fig. 1).

During the simulation of the moisture flow the relative humidity and the moisture content in the beam section may be instantly presented by pressing F1 respectively F2.

Figure 6 shows two periods : one from time 0 to 2 d (2 days) and time interval 12 h and one from 2 d to 4 d and time interval 1 d.

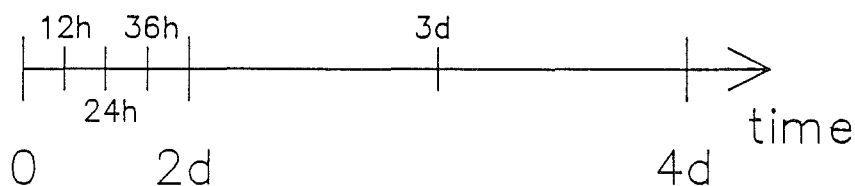


Figure 6. Two periods of equal time interval

A special format for the time input data can be used in order to specify the number of seconds in a shorter way. A sequence of pairs composed of a number and one of the following letters is given.

- * y year (365 days, 31536000 seconds)
- * q month (year/12, 30.417 days, 2628000 seconds)
- * d day (86400 seconds)
- * h hour (3600 seconds)
- * s second (can be omitted)

Examples :

- * 1y14h 1 year 14 hours
- * 14q3d15 1 year 2 months 3 days 15 seconds
- * 86400 1 day

Results

Displacements and stresses at the end of the simulation are presented on screen. Only the maximum stress and the layer in which it occurs is presented for each position. Further the resulting stress distribution over one section is shown on screen.

The final results may be printed on file (*.OUT).

Printing of partial results on file is optional.

The user may easily judge the variations of a nodal variable during the simulated period by plotting a diagram. The diagram has time on the x-axis and the nodal variable on the y-axis. The maximum value of the displacement/rotation is given.

After plotting it is optional to save the input data if it has not been done before starting the simulation.

3 VERSION 1.0**Limits**

MOIST version 1.0 has the following limits

no. of input mesh intervals in the x-direction	25
no. of input mesh intervals in the y direction	8
no. of boundaries	30
no. of computation cells in the x-direction	25
no. of computation cells in the y-direction	60
no. of boundary condition types	30
no. of periodic types	20
no. of step-wise types	20
no. of steps in each step-wise type	50
no. of subareas with different initial relative humidity	20
no. of subareas with different material different materials	8
no. of periods of equal time interval	3
number of time-steps for F.E.M. calculation	10
	20000

Restrictions on input data

In the text below imi stands for input mesh interval.

parameter	description	restriction	unit
I_{\max}	no of imi in x-direction	$1 \leq I_{\max} \leq 25$	
J	no of imi in y-direction	$J=8$	
DX_I	length of imi in x-dir.	> 0	m
DY_J	length of imi in y-dir.	> 0	m
N_I	no of computation cells in each imi in x-dir.	$1 \leq N_I \leq 25$ sum $N_I \leq 25$	
N_J	no of computation cells in each imi in y-dir.	$1 \leq N_J \leq 53$ sum $N_J \leq 60$	
R_{ϕ}	resistance over boundary	≥ 0	$m^2 s/kg$
ϕ	relative humidity	≥ 0	%
Q	moisture flow		$kg/m^2/s$

In version 1.0 the graphic is fitted to a 640x480 color display.

4 HOW TO RUN THE PROGRAM

The FUKT packet is written in TURBO-PASCAL 5.0 (IBM VERSION PC, XT, AT, PS/2 \& True Compatibles) and C 5.10 (MICROSOFT 1988). The executable code requires a computer with an *87 math co-processor and at least 550 kbytes of RAM. To run the program insert the disk into a drive, make that drive the default drive and type FUKT. The program consists of a main menu and several submenus and is practically self-instructive. All input data are checked in order to make the program 'bullet-proof'. It is preferable to use a hard disk if it is available. Copy the flexy disk and then type FUKT.

The Main Menu

The following commands can be used in the main menu

F1	load input data
F2	save input data
ALT-X	Quit (save input data is optional here)
ALT-P	Loads and restart a *.PSE file. It is possible to interrupt the moisture flow simulation and later restart it from the hold-up. The *.PSE file contains all input data. PSE is short for pause.

5 AN EXAMPLE

Figure 7 shows a 2.0 m long simply supported beam loaded by two concentrated loads, at resp 0.5 and 1.5 m from the left support. The beam has a T-section as shown in the figure. If symmetry is used the beam can be divided into two elements of 0.5 m.

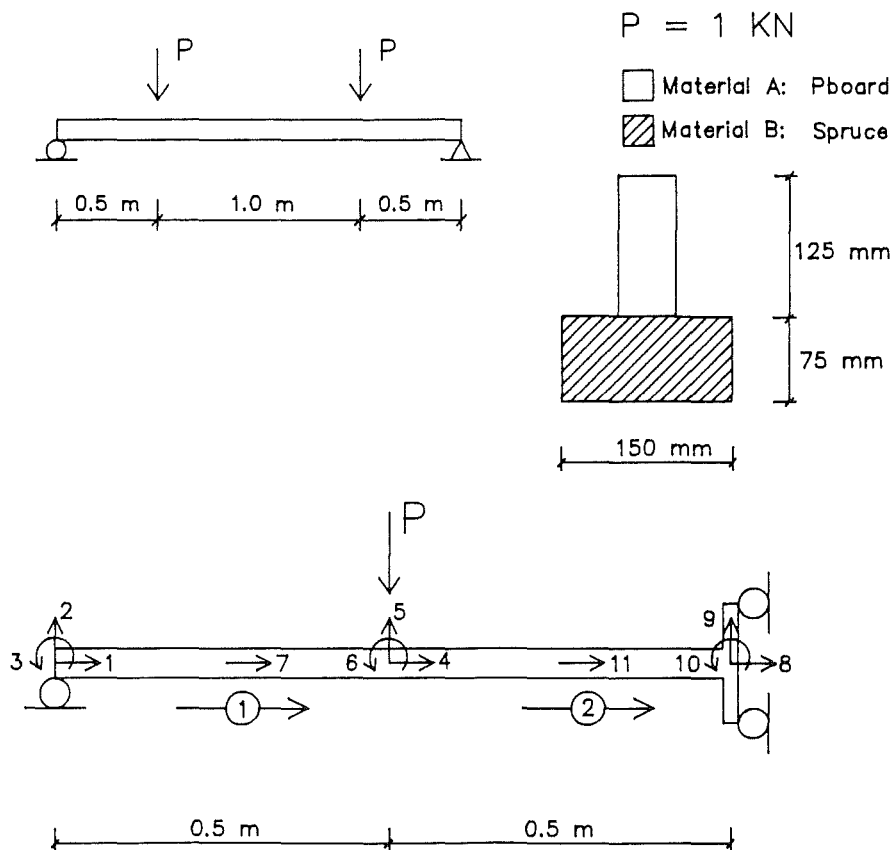


Figure 7. The beam in the example.

The system consists of 11 nodal variables. The boundary conditions of the system are satisfied if the nodal variables no 2, 8 and 10 are prescribed to zero. The vertical load corresponds to variable no 5 and has value -0.001 MN .

Consider figure 8. The section consists of two materials A = pboard and B = spruce. A suitable input mesh generation has been made. The region A has the input mesh coordinates lower left (1,3) and upper right (2,8), while we have material B in the rectangle defined by lower left (0,0) and upper right (3,3).

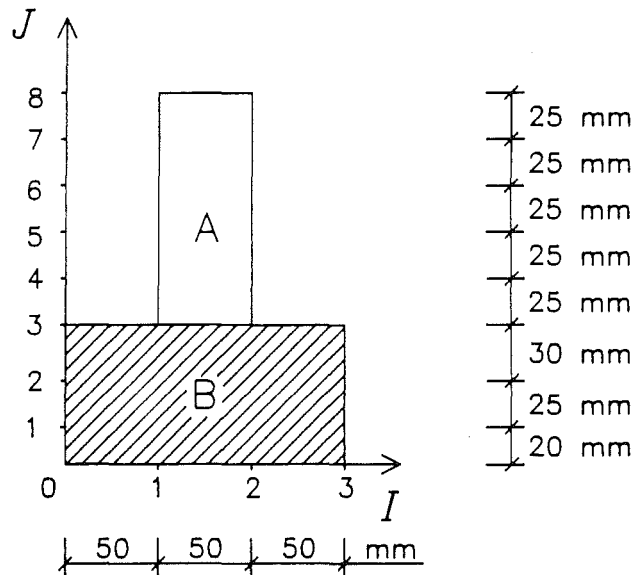


Figure 8. An input mesh suitable to the section.

It makes no difference which one of the boundaries that is enumerated as the first one but the enumeration must be done counter-clockwise. We choose the boundary between (0,0) and (3,0) as the first one, hence the boundary between (2,8) and (1,8) becomes number 5. The boundaries of the computational region will here be given as (0,0) (3,0) (3,3) (2,3) (2,8) (1,8) (1,3) (0,3) (0,0). The lengths in the x-direction and y-direction according to figure 8 are : 0.05 0.05 0.05 resp 0.020 0.025 0.030 0.025 0.025 0.025 0.025 0.025. The number of computation cells between the input mesh points is : 5 5 5 in the x-direction respectively 2 2 3 2 2 2 2 2 in the y-direction.

The generated computational mesh in the example is showed in figure 9.

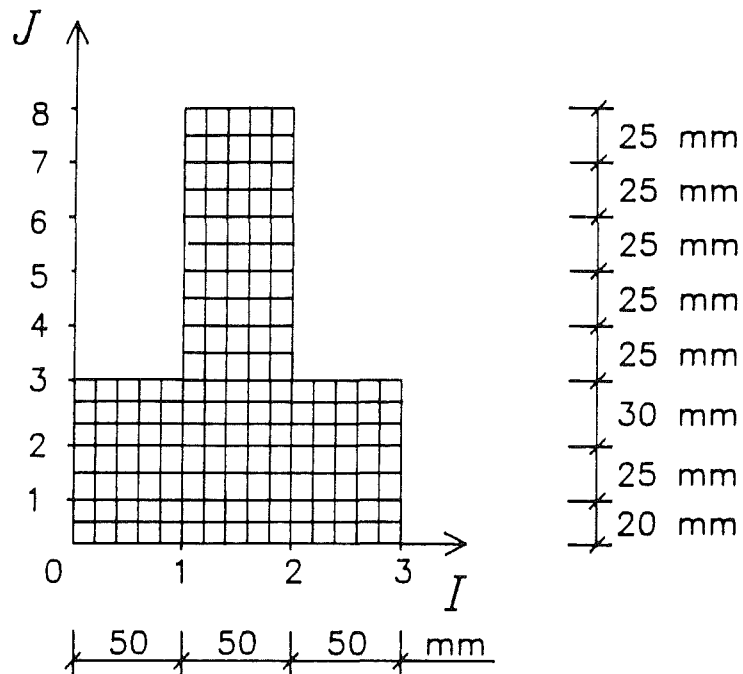


Figure 9. The computational mesh for the example

IMPORTANT : if you in a later stage increase the number of computation cells, remember to save input data (F2) and then load input data (F1) before starting analysis. In case you do not follow this procedure a run-time error will occur.

We have two types of boundary conditions : one is constant relative humidity $RH = 70.0 \%$ and the other is constant $RH = 50.0 \%$. The initial relative humidity is $RH = 70 \%$ over the whole section. See figure 10.

* *i* Constant $\phi = 70.0$ $R = 0$

* *ii* Constant $\phi = 50.0$ $R = 0$

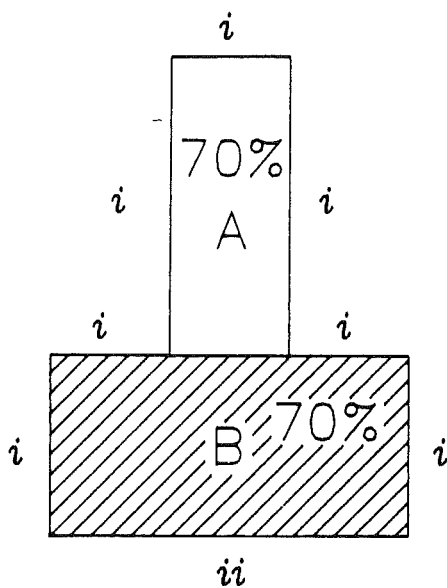


Figure 10. Boundary conditions and initial relative humidities for the example.

The time at the start and the end of simulation are resp 0 and 6q (six months). A 12 hours time step is chosen for the first two months and 1 day for the following 4 months. The maximum stress probably occurs in the section at the middle of the beam, thus the section at element 2 position 3 is chosen for resulting stress distribution. Partial results will be printed every 2 time intervals.

The input step by step for the example is shown in pages 17 to 44.

Start the program by typing 'FUKT'

M a i n M e n u

selection:

- 1 Element geometry
- 2 Geometrical meshes
- 3 Material properties
- 4 Boundary conditions
- 5 Initial relative humidity
- 6 Simulation and printing
- 7 Start analysis
- 8 Options

F1-Load F2-Save ALT X-Quit ALT P-Pause

Enter '1' Element geometry menu

Element Geometry Menu

selection:

- 1 Enter element input data
 - 2 Display element input data
 - 3 Enter nodal loads
 - 4 Display nodal loads

 - 9 Main Menu
-

Enter '1' on the menu and give the data below

Enter number of elements (1-10) : 2

Enter length of element number :

1 : 0.5

2 : 0.5

Enter number

of nodal variables with prescribed values (0-11) : 3

Enter the prescribed nodal variables !

1 of 3 : 2

2 of 3 : 8

3 of 3 : 10

Enter '3' on the menu and give the data below

Enter number of nodal loads (0-11) : 1

Enter nodal variable and corresponding load !

	nodal variable	load [MN]
1 of 1	: 5	: -1E-3

Enter '9' to return to Main Menu and select
Geometrical meshes menu

Geometrical Meshes Menu

selection :

- 1 Enter boundaries of computational region
 - 2 Display boundaries of computational region
 - 3 Enter dimensions of computational region in x-dir
 - 4 Enter dimensions of computational region in y-dir
 - 5 Enter numerical mesh in x-dir
 - 6 Enter numerical mesh in y-dir
 - 7 Draw numerical mesh
 - 9 Main Menu
-

Enter '1' on the menu and give the data below

Give the number
of input mesh intervals in X-direction : 3

Number of input mesh intervals in Y-direction is 8 !!!

Give the data below

Enumerate the boundaries counter-clockwise.

Give start and stop coordinates for each boundary.

bound	from	I	J	to	I	J
1		0	0		3	0
2		3	0		3	3
3		3	3		2	3
4		2	3		2	8
5		2	8		1	8
6		1	8		1	3
7		1	3		0	3
8		0	3		0	0

Enter '3' on the menu and give the data below

Give length in x-direction between

0 and 1 > 0.05

1 and 2 > 0.05

2 and 3 > 0.05

Enter '4' on the menu and give the data below

Give the length in y-direction between

0 and 1 > 0.020

1 and 2 > 0.025

2 and 3 > 0.030

3 and 4 > 0.025

4 and 5 > 0.025

5 and 6 > 0.025

6 and 7 > 0.025

7 and 8 > 0.025

BE CAREFUL : remember that the layer between 0 and 1
is the lowest one.

Enter '5' on the menu and give the data below

Enter number of computation Cells
in X-direction between

0 and 1 > 5

1 and 2 > 5

2 and 3 > 5

Enter '6' on the menu and give the data below

Enter number of computation Cells
in Y-direction between

0 and 1 > 2

1 and 2 > 2

2 and 3 > 3

3 and 4 > 2

4 and 5 > 2

5 and 6 > 2

6 and 7 > 2

7 and 8 > 2

Return to Main Menu and enter Material Properties Menu

Material Properties Menu

selection :

- 1 Enter basic material
- 2 Display basic material
- 3 Enter partial material properties
- 4 Display partial material properties
- 5 Draw material properties

9 Main Menu

Enter '1' on the menu and give the basic material
(The files spruce.MAT and spruce.MOI must be available in the current directory)

Enter basic material for the whole area :

Material : spruce

Enter '3' on the menu and give the data below

Enter number of areas you wish to load : 1

Give the data below

Give corresponding material properties for each area

Area	from lower left		to upper right	
	I	J	I	J
1	1	3	2	8

Material : pboard

Return to Main Menu and enter Boundary Conditions Menu

Boundary Conditions Menu

Selection :

- 1 Enter types of condition
 - 2 Display types of condition
 - 3 Enter basic condition
 - 4 Display basic condition
 - 5 Enter partial conditions
 - 6 Display boundaries and corresponding conditions
 - 7 Add single type of condition
 - 9 Main Menu
-

Enter '1' on the menu and give the data below

Enter number
of different types of boundary conditions : 2

Give the data below

Specify each type of boundary condition.

Typenumber Constant/Periodic/Stepwise
 (C or P or S)

1 C

Enter resistance over boundary : 0

Enter constant relative humidity : 70 [%]

Give the data below

Specify each type of boundary condition.

Typenumber Constant/Periodic/Stepwise
 (C or P or S)

2 C

Enter resistance over boundary : 0

Enter constant relative humidity : 50 [%]

Return to Main Menu and enter Initial Relative Humidity Menu

Initial Relative Humidity Menu

Selection :

- 1 Enter basic relative humidity
 - 2 Display basic relative humidity
 - 3 Enter partial relative humidity
 - 4 Display partial relative humidity
 - 5 Display initial relative humidity
 - 6 Display initial moisture content
 - 9 Main Menu
-

Enter '1' on the menu and give the data below

Enter basic initial relative humidity for whole area :

Relative Humidity : 70 [%]

Display initial relative humidities and moisture contents by typing resp '5' and '6' on the menu.
Return to the Main Menu and select Simulation and Printing Menu

Simulation And Printing Menu

Selection :

- 1 Enter simulation time
 - 2 Display simulation time
 - 3 Enter time interval distribution
 - 4 Display time interval distribution
 - 5 Enter specifications of output data
 - 6 Display specifications of output data
 - 9 Main Menu
-

Enter '1' on the menu and give the data below

Enter time at start of simulation : 0

Enter time at end of simulation : 6q

Enter '3' on the menu and give the data below

Specify each period of equal time intervals

Period :1

Enter start time for period : 0

Enter stop time for period : 2q

Enter time interval : 12h

Another period ? (Y/N) Y

Specify each period of equal time intervals

Period :2

Enter start time for period : 2q

Enter stop time for period : 6q

Enter time interval : 1d

Enter '5' on the menu and give the data below

Enter section for stress distribution results

Element number : 2

Position (1/2/3) : 3

Results will be printed every 2 time steps

The Option Menu

Option Menu

Selection :

- 1 Create material-data file
 - 2 Show diagram and material-data
 - 3 Dir *.MAT
 - 4 Dir *.DAT
 - 5 Dir *.OUT
 - 6 Dir *.PSE
 - 7 Dir *.*
 - 8 Change directory (Default : A:\)
 - 9 Main Menu
-

By entering '1' on the Option Menu you can create material-data files in 5 different ways

M a t e r i a l M e n u

Input Selection :

- 1 L , phi - flow , phi - w
 - 2 flow , phi - x , phi - w
 - 3 phi - Dphi , phi - w
 - 4 w1 , w2 - deltapsi , phi - w
 - 5 w - phi - psi
-
- 9 Option Menu
-

By entering '2' on the Option Menu you get a list of material-data files for the moisture flow simulation.

```
Directory: A:\      Files: *.MAT

PBOARD   MAT      2382   87-10-21  15.48
SPRUCE   MAT      3076   89-04-04   8.10

No More Files
```

Enter name of material-file (*.MAT) : pboard

By entering the name of one of them you can present the material-data in 6 different diagrams
(Possible only if file EGA VGA.BGI is available)

D i a g r a m M e n u

Selection :

- 1 Diagram Phi - w
- 2 Diagram Phi - Psi
- 3 Diagram Psi - w
- 4 Diagram w - Dw
- 5 Diagram Phi - Dphi
- 6 Diagram Psi - Cpsi
- 7 Show material-data
- 9 Option Menu

Here is Phi = Relative humidity
 W = Moisture content
 Psi = Flow potential
 Dw = Moisture flow coefficient
 Dphi = Moisture flow coefficient
 Cpsi = Moisture capacity factor

Start analysis by pressing '7' on the Main Menu.
Here you have the possibility to save the input data
on file, in case you have not done it before answer
'Y' and enter 'example'.
Press enter for transient solving ('1' is default
here)

Choose one alternative : (1)
1 Solve transient
2 Solve steady-state

The answer 'Y' to the question below is default: press
enter

Total time for analysis : 3m 31s

Continue ? (Y) :

The time estimated is only for the moisture flow simu-
lation and is quite optimistic. The calculation time
becomes very long if the system is composed of several
elements.

A red rectangle on cyan screen gives constantly information about how much of the simulation has been done. A melody tells you when the simulation is finished. Enter '3' to write results at end time on screen and partial results (in this case at every 2 time intervals) on file

Choose one alternative (1/2/3) : 3

- 1) Final results printed on screen
 - 2) Final results printed on screen and file
 - 3) Final results printed on screen and partial results on file
-

Enter 'Example'

Enter name of output data file : Example

The results are saved in file Example.OUT

On screen are first presented the final values of the degrees of freedom of each element

NODAL DISPLACEMENTS

Element no 1

u1 = 1.6538e-004
u2 = 0.0000e+000
u3 = 6.1301e-004
u4 = 8.9806e-005
u5 = 8.8270e-005
u6 = -3.3375e-005
u7 = 1.3115e-004

Element no 2

u4 = 8.9806e-005
u5 = 8.8270e-005
u6 = -3.3375e-005
u8 = 0.0000e+000
u9 = 7.9916e-005
u10 = 0.0000e+000
u11 = 4.4903e-005

NO MORE ELEMENTS ! Press ENTER to continue...

Then come the maximum values of the normal stress in each of the three positions in every element. Layer 1 is the upper layer of the section while the lower one is layer 8

MAXIMUM STRESS DISTRIBUTION

Element no 1

Position no	Max Stress	in Layer
1 :	8.476e-001	8
2 :	1.281e+000	8
3 :	1.714e+000	8

Element no 2

Position no	Max Stress	in Layer
1 :	1.714e+000	8
2 :	1.714e+000	8
3 :	1.714e+000	8

NO MORE ELEMENTS ! Press ENTER to continue...

The last table on screen presents the distribution of the stresses over the section chosen previously (element 2 position 3).

STRESSES AT ELEMENT 2 POSITION 3

layer 1 : -4.594e-001
2 : -4.527e-001
3 : -4.426e-001
4 : -4.080e-001
5 : -2.483e-001
6 : -8.252e-001
7 : 2.812e-001
8 : 1.714e+000

Press ENTER to continue ...

Diagrams of the variation of the degrees of freedom during the simulated period may be plotted on screen. If the input data has not been saved before starting the simulation there is here an opportunity to save it before going back to DOS.