

# Hygro-mekaniskt beteende hos trä vid olika klimatförhållanden

Per Ingströmer

Erik Lindblad

Avdelningen för Bärande Konstruktioner  
Väg- och Vattenbyggnad  
Lunds Tekniska Högskola  
Box 118  
221 00 Lund

Division of Structural Engineering  
Department of Civil Engineering  
Lund Institute of Technology  
University of Lund  
Box 118  
S-221 00 Lund  
Sweden

## **HYGRO-MEKANISKT BETEENDE HOS TRÄ VID OLIKA KLIMATFÖRHÅLLANDEN**

Per Ingströmer  
Erik Lindblad

Master of Science in  
Civil Engineering  
Thesis

Lund March 1998

### **Keywords**

Wood, spruce, creep, shrinkage, strain, mechano-sorption, fiber saturation point, humidity, moisture content, elasticity

### **Language**

Swedish

### **Title**

Hygro-mechanical Behaviour of Wood under Different Climate Conditions

Rapport TVBK-5092  
ISSN 0349-4969  
ISRN: LUTVDG/TVBK--5092 --SE

## Examensarbete

Handledare: Staffan Svensson

April 1998

## **FÖRORD**

Detta examensarbete, omfattande 20 poäng, utfördes på civilingenjörsutbildningen Väg- och vattenbyggnad, avdelningen för Bärande Konstruktioner vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet pågick från september 1997 till mars 1998. Initiativtagare till arbetet var Staffan Svensson, Bärande Konstruktioner LTH.

Under arbetets utförande har vi varit beroende av ett stort antal personer. Främst vill vi tacka vår handledare Staffan Svensson, som bidragit med värdefull kunskap och mycket tålamod.

Vid tekniska problem har Per-Olof Rosenkvist alltid funnits till hands. Ingbritt Larsson har alltid varit snäll och trevlig när vi behövt hjälp med några bestyr. Jan-Åke Larsson och Bengt Malm i verkstaden gjorde ett väldigt bra jobb när de svetsade ihop vår laborationsutrustning. Till samtliga dessa personer samt övrig personal på Bärande Konstruktioner vill vi rikta ett stort tack. Utan all deras hjälp hade vi inte klarat av att slutföra arbetet.

---

Lund, mars 1998

Per Ingströmer    Erik Lindblad

---





## SAMMANFATTNING

Detta examensarbete är utfört på institutionen för Bärande Konstruktioner, Lunds Tekniska Högskola.

Examensarbetets mål var att teoretiskt och experimentellt undersöka olika klimats inverkan på de mekaniska egenskaperna hos trä. Med de s.k. hygro-mekaniska egenskaperna avses här krympning, elastisk töjning, krypning och mekanisk-sorption. För att kunna genomföra en del av försöken utformades, konstruerades och tillverkades ny laborationsutrustning.

Till försöken användes provkroppar av gran (*Picea Abies*) som sex åt gången monterades in i försöksanordningen och utsattes för varierande belastning, relativ luftfuktighet och temperatur.

Två olika typer av försök gjordes, dels s.k. torra försök i klimatskåp och dels s.k. våta försök i egen konstruerad laborationsutrustning. Totalt utfördes 6 st lyckade försök i följande klimat:

- 20°C och relativ fuktighet 50% i klimatskåp - motsvarar en slutfuktkvot på 9% i träet
- 60°C och relativ fuktighet 60% i klimatskåp - motsvarar en slutfuktkvot på 9% i träet
- 90°C och relativ fuktighet 73% i klimatskåp - motsvarar en slutfuktkvot på 9% i träet
- Torkande tillstånd i klimatskåp:      cyklade klimat med relativ fuktighet 60-95-60%  
  och konstant temperatur 60°C
- 20°C vått tillstånd, nedsänkta i ett vattenbad
- 60°C vått tillstånd, nedsänkta i ett vattenbad

Vid varje försök registrerades töjningen hos provkropparna i en dator via lägesgivare, som hade monterats på provkropparna. Provdatan bearbetades sen i datorprogram (Microsoft-Excel), vilket gav ett antal kurvor ur vilka följande resultat kunde utläsas.

-Vid de torra försöken krympte de obelastade provkropparna - väntat eftersom fuktkvoten minskade från ca 36% till drygt 9%.

-De belastade provkropparnas totala töjning bestod vid låga temperaturer och låg relativ luftfuktighet främst av den elastiska töjningen (omedelbar) och vid hög temperatur och hög relativ luftfuktighet huvudsakligen av krypningen (fördröjd). Efter avlastning återgick den elastiska töjningen medan delar av kryptöjningen resulterade i kvarstående deformation.

-Den elastiska töjningen ökade med temperatur och relativ luftfuktighet, dock ökade krypningen mer, därav krypningens dominans av den totala töjningen vid varma och fuktiga förhållanden.

-Vid fuktändring under belastning observerades en förstorad deformation hos provkropparna, s.k. mekanisk-sorption.

Slutligen genomfördes en densitetsmätning på samtliga provkroppar och medelvärdet beräknades till 464,5 kg/m<sup>3</sup>.

## **SUMMARY**

This master thesis was carried out at the Division of Structural Engineering, Lund Institute of Technology.

The purpose of the report is to investigate different climate influences on the mechanical behaviour of wood, both theoretical and experimental. Here hygro-mechanical behaviour means shrinkage, elastic strain, creep and mechano-sorption. New laboratory equipment was designed and constructed for experiments where specimen were submerged in water.

For the experiment samples of Norwegian spruce (*Picea Abies*) were used. These were six at a time assembled into the testequipment and then exposed to varying load, relative humidity and temperature.

Two different types of experiment were made, so called dry experiment in a climate chamber and so called wet experiment in our own constructed laboratory equipment. Totally six successful attempts were conducted:

- 20°C and relative humidity 50% in the climate chamber - which corresponds to a finish moisture content of 9%.
- 60°C and relative humidity 60% in the climate chamber - which corresponds to a finish moisture content of 9%.
- 90°C and relative humidity 73% in the climate chamber - which corresponds to a finish moisture content of 9%.
- Drying state in the climate chamber: cycling climate with a relative humidity of 60-95-60% and constant temperature.
- 20°C wet state, submerged in water
- 60°C wet state, submerged in water

At every attempt the total strain of the samples were registrated in a computer by transducers, which were mounted on the samples. The testresults gave, after some work with Microsoft-Excel, the following results:

-For the dry experiment the unloaded samples shrunk. This was expected since the moisture content was reduced from over 30% to about 9%.

-The total strain of the loaded samples at low temperatures and low relative humidity in the air were foremost due to the elastic strain (immediately) and at high temperature and relative humidity in the air principally to creep (delayed). After unloading the specimen the elastic strain recovered but the creep partly remained.

-The elastic strain increased with temperature and relative humidity, but the creep increased even more, which caused a creep-dominance of the total strain in climates with high temperature and high humidity.

-When loaded during a humidity-change the tests showed increasing strain, so called mechano-sorption.

Finally a density control was made on all the samples and the mean value was calculated to 464,5 kg/m<sup>3</sup>.

---



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid.
<b>1</b>	<b><i>Inledning</i>..... 1-3</b>
1.1	Bakgrund..... 1
1.2	Mål..... 2
1.3	Avgränsningar..... 2
1.4	Hypoteser..... 3
<b>2</b>	<b><i>Teori</i>..... 4-18</b>
2.1	Allmänt..... 4
2.2	Trädets uppbyggnad..... 4-6
2.3	Fukt..... 7-10
2.3.1	<i>Allmänt</i> ..... 7-8
2.3.2	<i>Träets olika riktningar</i> ..... 8-9
2.3.3	<i>Definitioner på fuktillstånd</i> ..... 10
2.4	Krympning..... 11
2.5	Krypning..... 12-14
2.6	Elasticitetsmodulen, E..... 15
2.7	Torkning..... 16-18
<b>3</b>	<b><i>Materialbeskrivningar</i>..... 19-24</b>
3.1	Givare – LVDT..... 19-22
3.2	VB6020 – Elpatron..... 23
3.3	Klimatskåpet..... 24
<b>4</b>	<b><i>Metodbeskrivningar</i>..... 25-35</b>
4.1	Försök i klimatskåpet – Torrt försök..... 25-29
4.1.1	<i>Provkropp</i> ..... 25-26
4.1.2	<i>Provnings procedur</i> ..... 26-28
4.2	Försök i egen konstruktion – Vått försök..... 29-30
4.3	Densitetsbestämning..... 31-34
<b>5</b>	<b><i>Resultat av försök</i>..... 35-50</b>
5.1	Försök i klimatskåp vid 20°C, 50% RF..... 35-37
5.2	Försök i klimatskåp vid 60°C, 60% RF..... 38-40
5.3	Försök i klimatskåp vid 90°C, 73% RF..... 41-42
5.4	Försök i klimatskåp vid 60°C, cyklade 60 & 95 % RF..... 43-45
5.5	Försök i vattenbad vid 20°C..... 46-47
5.6	Försök i vattenbad vid 60°C..... 48-49
<b>6</b>	<b><i>Felkällor</i>..... 50</b>
<b>7</b>	<b><i>Tolkning av resultat</i>..... 51-55</b>
7.1	Fuktkvot..... 51
7.2	Obelastade provkroppar..... 51
7.3	Belastade provkroppar..... 52-53
7.4	Kvarvarande deformationer..... 53
7.5	Kurvanpassning..... 54

7.6	Sammanställning i tabellform.....	55
8	<b>Slutsatser.....</b>	<b>56</b>
9	<b>Förslag till fortsatta undersökningar.....</b>	<b>57</b>
10	<b>Ordförklaringar och förkortningar.....</b>	<b>58-59</b>
	<b>Litteraturförteckning.....</b>	<b>60-62</b>
	<b>Innehållsförteckning – Appendix &amp; Bilagor.....</b>	<b>63</b>
	<b>Appendix 1 – Impregneringsskillnader mellan gran och furu</b>	
	<b>Appendix 2 – Elektriska fuktkvotsmätare</b>	
	<b>Appendix 3 – Försök i klimatskåp vid 95°C, 74% RF</b>	
	<b>Bilaga 1 – Sammanställning av in- &amp; utgångsdata</b>	
	<b>Bilaga 2 – Konstruktionsberäkning</b>	
	<b>Bilaga 3 – Konstruktionsritningar</b>	

---

## **1. INLEDNING**

I detta kapitel nämns förutsättningarna och bakgrunden för vårt examensarbete samt de uppställda hypoteser som låg till grund för våra undersökningar.

### **1.1 BAKGRUND**

För att trä ska bli ett mer slagkraftigt alternativ på byggmarknaden krävs att sågverksindustrin och virkestorksleverantörerna kortar ner sina torktider och uppfyller byggbranschens krav på snabba leveranstider. Därför behövs mer kunskap om hur trä uppför sig vid olika klimat.

Som bakgrundsmaterial till vårt examensarbete har vi använt Staffan Svenssons, Institutionen för Bärande Konstruktioner, doktorsavhandling [1] varav här följer en kort sammanfattning:

Till en början beskrivs utrustningen som används för att undersöka hygro-mekaniskt beteende hos trä under torkning, varpå tre olika typer av test utförs; fri krympning, krympning under last och förhindrad krympning. Experimenten genomförs vid olika temperaturer och relativa luftfuktigheter. Testdatan presenteras, som t.ex. spänning och/eller töjning mot tiden, fuktkvot mot tiden, densitet, elasticitetsmodul före och efter torkning.

Vidare studeras långtidsdeformationer och spänningar i trä vinkelrätt fibrerna när träet är utsatt för variationer i fuktighet. Experiment med både drag- och trycklast beskrivs. Effekten av olika fuktighetscykler (t.ex. långsamma och snabba cykler, hög och låg fuktighet) på deformationerna studeras. Deformationerna är något större i tryck än i dragriktningen. Deformationen är mest beroende på storleken av fuktändringen. Hastigheten på fuktighetscykeln uppvisar ingen effekt på de uppkomna deformationerna.

Efter dessa försök tas en grundläggande modell fram där spännings-töjningsrelationerna för trä under olika trätorkningsförhållanden presenteras. Relationerna fungerar för beteendet vinkelrätt mot fiberriktningen i en dimension. Även en tvådimensionell modell utarbetas. Dessa anpassas till ett användbart program där de kan användas för att t.ex. förbättra trätorkning, teknik, kvalitet m.m.

Avslutningsvis visas hur laborations- och teoretiskt arbete på träets grundläggande hygro-mekaniska uppträdande används på konvektiv torkning av sågat virke.



## 1.2 *MÅL*

Examensarbetets mål var att teoretiskt och experimentellt undersöka olika klimats inverkan på de mekaniska egenskaperna hos trä. Med de s.k. hygromekaniska egenskaperna avses främst krympning, elastisk töjning, krypning och mekanisk sorption. För att kunna genomföra en del av försöken utformades, konstruerades och tillverkades ny laborationsutrustning. Examensarbetet är främst riktad till representanter från sågverksindustrin och andra inom träbranschen, men även intresserade i ämnet kan förhoppningsvis ha stort utbyte av den, då grundläggande begrepp förklaras.

## 1.3 *AVGRÄNSNINGAR*

Den första avgränsningen vi gjorde var att endast mäta längdförändringen i träets tangentiella riktning, eftersom det är där den största krympningen vid torkning sker. Träet är samtidigt svagast i denna riktning vilket gör att risken för torksprickor är störst i den här riktningen.

En annan avgränsning var att vi enbart undersökte träprover från en trädart, gran (*Picea Abies*), där samtliga prover var tagna i kärnveden nära roten. Därigenom bortser vi helt från variationer inom trädstammen och mellan olika trädarter, vilket förstås är en stor begränsning.

Inom ramen för detta examensarbete har vi valt att studera följande klimat:

- 20°C och relativ fuktighet 50% i klimatskåp - motsvarar en slutfuktkvot på 9% i träet
- 60°C och relativ fuktighet 60% i klimatskåp - motsvarar en slutfuktkvot på 9% i träet
- 90°C och relativ fuktighet 73% i klimatskåp - motsvarar en slutfuktkvot på 9% i träet
- Torkande tillstånd i klimatskåp: cyklade klimat med relativ fuktighet 60-95-60% och konstant temperatur 60°C
- 20°C vått tillstånd, nedsänkta i ett vattenbad
- 60°C vått tillstånd, nedsänkta i ett vattenbad
- 90°C vått tillstånd, nedsänkta i ett vattenbad

Den begränsade tiden för examensarbetet tillät oss bara att utföra kortare försök. Vi valde att köra försöken under 11 dygn, eftersom krympningen hos träproverna (provade i klimatskåp) så gott som avstannat då.

## **1.4 HYPOTESER**

### *Försök i klimatskåp*

Eftersom fuktkvoten kommer att minska under fibermättnadspunkten (temperatur och relativ fuktighet ställs in så att provkropparna får en fuktkvot på ca 9%, begynnelsefuktkvoten ligger på drygt 30%) kommer provkropparna att krympa.

Med ökad temperatur och relativ fuktighet i de olika försöken kommer belastningen som provkropparna utsätts för att medföra en ökad töjning p.g.a. mjukare trä.

Omedelbart efter belastning kommer en stor töjningsökning att ske, den s.k. elastiska töjningen, som återgår efter avlastning.

Under den resterande delen av lastförloppet kommer det att ske en långsam töjningsökning. Denna försenade töjning kommer delvis att gå tillbaka efter avlastning. Hur stor del av töjningen som går tillbaka beror på inställda klimatparametrar.

Större belastning kommer att medföra större töjning eftersom töjningen kan skrivas som en funktion av spänningen:  $\varepsilon = f(\sigma)$

När provkropparna utsätts för ett cyklande klimat kommer träet att utmattas och töjningen att öka mellan varje cykel.

### *Försök i vattenbad*

Ifall den initiella fuktkvoten är lägre än fibermättnadspunkten kommer provkropparna att svälla.

Töjningen hos de belastade provkropparna kommer att öka med ökad temperatur hos vattenbadet p.g.a. att träet mjuknar.

Provkropparna kommer antagligen att uppvisa stora synliga förändringar p.g.a. ett mycket fuktigt klimat. Med synliga förändringar menas t.ex. färgförändringar och deformationer.

## 2. TEORI

Eftersom det är viktigt att förstå bakgrunden till våra undersökningar, har vi i detta kapitel kortfattat försökt redogöra för träets uppbyggnad och uppförande i olika situationer.

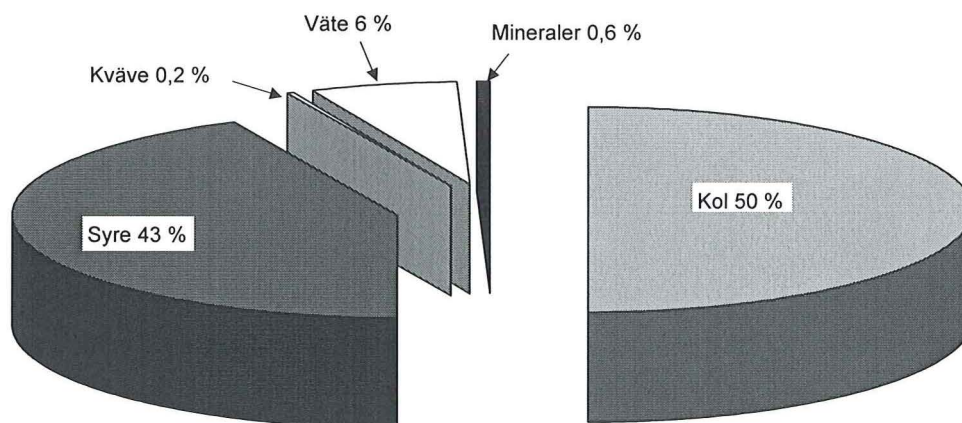
### 2.1 ALLMÄNT

Trä är det material som människan sedan urminnes tider använt som konstruktionsmaterial. Fördelen är att det har en relativt låg egenvikt, god isoleringsförmåga, hög hållfasthet och beständighet, vilket i kombination gör att trä får en unik ställning inom byggbranschen. Som nackdelar räknar man främst fuktkänsligheten, brännbarheten och risken för röt- och insektsangrepp, men med byggtekniskt smarta lösningar kan man minimera och i vissa fall helt eliminera dessa risker.

Det finns över 5000 olika träslag, som är indelade i olika grupper. I Sverige använder man nästan uteslutande gran och furu som konstruktionsvirke. Dessa skiljer sig från varandra främst genom sina olika impregneringsmetoder (se Appendix 1).

### 2.2 TRÄDETS UPPBYGGNAD

De huvudsakliga grundämnena [2] hos trä åskådliggörs i nedanstående sektor-diagram:



Figur 1: Huvudsakliga grundämnena hos trä

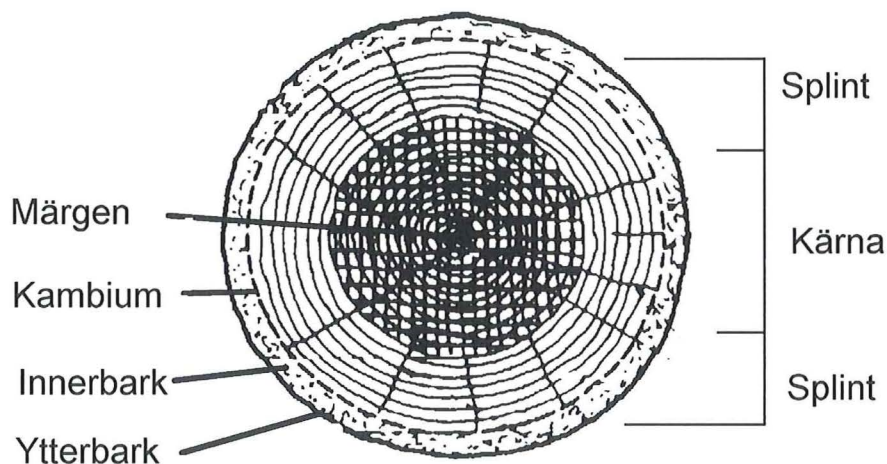
Där de viktigaste föreningarna mellan ämnena är cellulosa ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>, hemicellulosa och lignin. Andra föreningar som ingår är t.ex. harts, fett, äggviteämnen och garvämen.

I mikrostruktur ser man att veden är uppbyggd av långa fibrer orienterade i stammens längdriktning. De är ihåliga med en primärvägg av cellulosa. Denna primärvägg utsöndras från kambiet och när den nått sin slutliga storlek avlagras förtjockningsväggar på insidan, så kallade sekundärväggar, uppbyggda av trådliknande element, fibriller. Sekundärväggarna består av cellulosa, lignin och hemicellulosa. Cellulosa kan ses som armering och hemicellulosa som klistret som binder ihop de olika



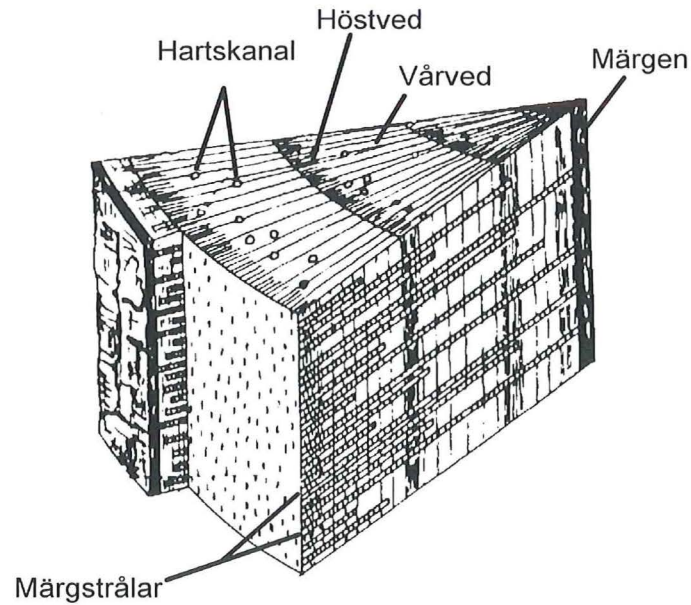
kan ses som armering och hemicellulosan som klistret som binder ihop de olika cellulosasträngarna. Ligninet kan anses utgöra byggstenarna som styvar upp och hindrar cellulosan att knäcka ut vid tryck i fiberriktningen. Tillsammans bygger dessa beståndsdelar upp trädet, som i tvärsnitt kan uppdelas i följande skikt – sett utifrån och in (se Figur 2):

- Ytterbark, består av döda celler och har en skyddande funktion.
- Innerbarken, består av levande celler som sköter om närings-transporten till kronan. Hos lövträd sker denna transport från rötterna till kronan via speciella celler, kärl. Hos barrträden sköts detta av de långsgående cellerna, trakeiderna.
- Kambiet, är ett tunt lager av levande celler som reglerar tjocklekstillväxten och ombesörjer näringstransporten från kronan ned till rötterna.
- Veden, indelas i splinten (den yttre delen) och kärnan (den inre delen). Kärnan bildas först med ökande ålder och består av döda celler. Kärnan är hos många träd (fur, ek, ask) betydligt mörkare än splinten vilket inte gäller för t.ex. gran eller bok där man inte kan se någon skillnad.
- Märgen



Figur 2: Tvärsnitt genom en trädstam [3]

Näringstransporten i sidled ombesörjs av så kallade mäggrålar (se Figur 3) som går från innerbarken och inåt. För barrträd förekommer dessutom hartskanaler som är fyllda med harts. Deras funktion är att skydda trädet om det blir skadat. Hartset, som står under tryck, flyter då ut och bildar en skyddande beläggning. Trädets livsrytm följer årstiderna och yttrar sig i årsringar, där en mörk och en ljus ring kan urskiljas (se Figur 3).



Figur 3: Stam av fyraårigt barrträd [4]

På våren och under försommaren då vätsketransporten är som störst blir veden – vårveden – porös med tunna cellväggar. Under resten av året växer veden – höstveden – långsammare, vilket ger tjockväggiga celler med hög hållfasthet. För hållfastheten är alltså halten höstved bestämmande. För barrträd indikerar breda årsringar större halt vårved och därmed en sämre kvalitet. Det omvända förhållandet gäller för lövträd.

## 2.3 FUKT

Eftersom fuktkvoten är ett frekvent använt begrepp i vårt examensarbete definierar vi det här och nämner samtidigt några andra vanliga definitioner.

### 2.3.1 ALLMÄNT

Fukt i trä förekommer i tre olika former, som fritt vatten, som vattenånga beläget i cellernas hålrum samt som bundet vatten i cellväggen. Fukttransport drivs av två mekanismer; diffusion (vattenmolekylerna rör sig mot avtagande koncentration) och kapillärkraft i kombination med förångning av fritt vatten från virkesytan. Dessa båda påverkas starkt av temperaturen. Kapillärkraften gör att träet mer eller mindre fort kan suga upp vatten i sina porer. Kapillärkraften påverkas dessutom av träslagets permeabilitet (genomsläpplighet). En förutsättning är dock att porerna i träet är förbundna med varandra för att en transport ska ske.

Ett levande träd innehåller normalt en stor mängd vatten, som används för ämnesomsättningen. När ett träd fälls börjar vatteninnehållet att minska eftersom det är hygroskopiskt (sorptionsaktivt), vilket betyder att det absorberar eller desorberar fuktighet ur den omgivande luften om man inte förhindrar det genom t.ex. vattenlagring.

Då torkning initieras på ett rått virke (virke från ett nyss fällt träd med en fuktkvot (se Kapitel 2.3.3) mellan 40 och 160% (för gran) beroende på årstid och lokalisering) avlägsnas först vatten från lumen (cellmellanrummen), vilket gör att fuktkvoten reduceras till ca 27–30%. Denna fuktkvot kallas för fibermättnadspunkten, d.v.s. då cellväggarna är vattenmättade samtidigt som det inte längre finns något fritt vatten i lumen. Detta är väldigt sällan en exakt punkt, utan det är inom ett intervall i fuktkvoten som övergången sker. Man kan säga att fibermättnadspunkten motsvarar det fuktinnehåll som uppträder när träet placeras i en relativ fuktighet på 100%. Det finns hela nio olika metoder beskrivna i litteraturen enligt [5] för bestämmande av fibermättnadspunkten. För fuktkvoter under 27-30% börjar vatten att försvinna från cellväggarna och den fortsatta torkningen kommer då att inverka på träets dimensioner, d.v.s. det krymper.

Att mäta träets fuktinnehåll rätt är viktigt och det finns en mängd olika metoder beskrivna i litteraturen, som man kan använda. Nedan beskrivs två stycken kortfattat – för närmare beskrivning av metoderna se Appendix 2:

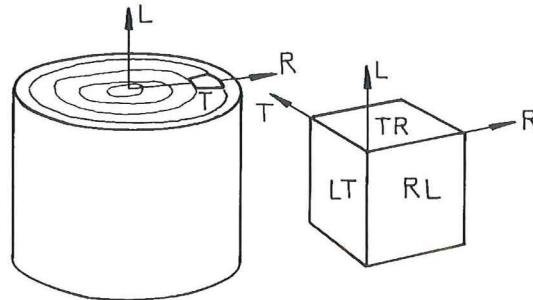
1. Elektriska fuktmätare som delas in i tre olika typer [6]:
  - Instrument som baseras på sambandet mellan virkets fuktkvot och dess likströmsresistans.
  - Instrument som baseras på sambandet mellan virkets fuktkvot och dess växelströmsresistans.
  - Instrument som baseras på sambandet mellan virkets fuktkvot och dess kapacitans, C (vanligen för frekvenser mellan 2 och 100 MHz).
2. Viktminskningen vid torkning i  $103\pm 2^\circ\text{C}$  dividerat med vikten efter torkning hos träprovkroppen (torrviktsmetoden) [6].



Den sista av metoderna kräver utsågning av provkropp (destruktiva), medan den första kan göras på plats (icke destruktiv). Mest noggrann är dock torrviktsmetoden (metod 2).

### 2.3.2 TRÄETS OLIKA RIKTNINGAR

Trä är ett anisotropt material och med det menas att egenskaperna är olika i olika riktningar. För enkelhetens skull skiljer man endast mellan tre karakteristiska riktningar (se Figur 4):



Figur 4: Träets tre karakteristiska riktningar

Longitudinell riktning, L = Stammens längdriktning (= Axiell-, fiberriktning)  
 Radiell riktning, R = Vinkelrätt mot fiberriktningen och vinkelrätt mot årsringarna  
 Tangentiell riktning, T = Vinkelrätt mot fiberriktningen men parallellt med årsringarna

Träets fuktinducerade rörelser är följaktligen också anisotropa. Som man kan se i tabell 1 är rörelserna störst i tangentiell riktning, mindre i radiell och minst i fiberriktningen. Dessa rörelser påverkas enbart av det vatten som fixerats i cellväggarna. Förhållandet mellan träslagets tangentiella och radiella krympning benämns som krympningstal (ett mått på krympningsanisotropi). Krympningstalet ligger mellan 1,9 och 2,2 för svenskt gran- och furuvirke.

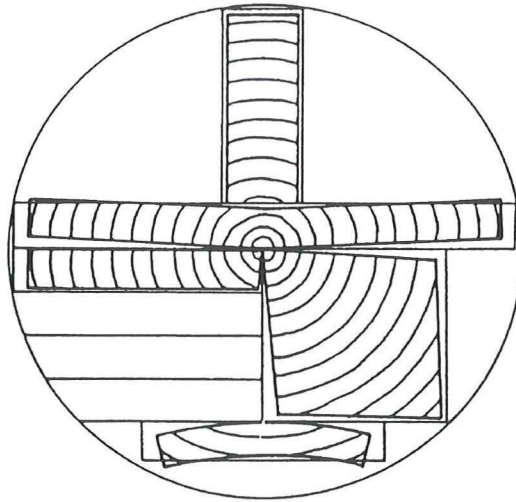
• *Tabell 1<sup>1</sup>*

Riktning	Gran	Bok
Tangentiell	0,34	0,40
Radiell	0,17	0,20
Fiberriktning	0,005	0,01

Tabell 1:  
Differentiell krympning %  
per 1% fuktförändring [7]

En viktig konsekvens av denna anisotropi är att virke deformeras på olika sätt vid uttorkning, beroende på hur de är utsågade, se Figur 5.

<sup>1</sup> Värdena bör bara ses som medelvärden med stor spridning p.g.a. att trä är ett levande material.



Figur 5: Beroende på var i trädstammen virket är utsågad varierar torkdeformationerna.

Ytterligare exempel på träets anisotropi kan också ses i skillnaden mellan andra egenskaper. Se tabell 2 för en relativ jämförelse mellan de karakteristiska materialriktningarna.

• Tabell 2

Egenskaper	Tangentiell	Radiell	Fiberriktning
Hållfasthet, Tryck	11	12	100
Hållfasthet, Drag	2...5	2...5	100
E – Modul, Böj	6	10	100
Värmeledningsförmåga	50	50	100

Tabell 2:  
Skillnader i  
egenskaper mellan de  
olika riktningarna [7]

Det är inte bara riktningen som har betydelse för hållfastheten. T.ex. minskar hållfastheten med ökande temperatur och fuktkvot; detta förhållande är störst för tryckhållfastheten. Detta förklaras genom att det uppstyvande ligninet mjuknar. Dessutom ökar temperatureffekten med ökande fuktkvot. Vid frånvaro av kvistar och andra defekter, d.v.s. på materialnivå, spelar det ingen roll om spänningen är tryck- eller dragspänning.



### 2.3.3 DEFINITIONER PÅ FUKTTILLSTÅND

Man definierar fuktkvot som:

$$u = \frac{m_{Fukt} - m_{Torr}}{m_{Torr}} \quad (1)$$

där  $u$  = fuktkvot  
 $m$  = massa

D.v.s. hur stor andel av träet som är vatten. Torrt trä är ett kvantitativt definierat tillstånd som betyder absolut vattenfritt; alltså en fuktkvot på 0%. I praktiken uppnås den vid längre tids torkning i 103+/-2°C.

Nedan följer en del andra viktiga definitioner på olika fuktkvoter och relativ fuktighet:

- Vattenmättnadspunkt  
 Alla porerna är fyllda med vatten och cellväggarna innehåller maximal fuktighet. Detta tillstånd hittar man endast i splintved hos nyss fällda stammar och i våta kärnor och vid längre tids lagring under vatten. Fuktkvoten varierar mellan 150 och 200% beroende på träslag.
- Vått, genomfuktat, skogsfriskt  
 Ett inte exakt definierat tillstånd – fuktområde mellan fibermättnadspunkten och vattenmättnadspunkten, d.v.s. mellan 40 och 160%. Trä i detta tillstånd är känsligt för svampangrepp.
- Fibermättnadsspunkten  
 Detta tillstånd definieras som maximal fuktighetsupptagning i cellväggen (i cellhålrummen finns det däremot inget vatten). Beroende på träslag och temperatur ligger denna fuktkvot mellan 25 och 35%.
- Lufttorkad  
 Ett inte exakt definierat tillstånd. Ofta benämner man trä lagrad i icke uppvärmda lagerrum såsom om träet är i jämvikt med omgivande temperaturs fuktighet. Fuktkvoten ligger mellan 12 och 20%.
- Rumstorrt  
 Ställs in i uppvärmda rum (d.v.s. rumsklimat) och fuktkvoten ligger mellan 8% (vintertid) och 12% (sommartid).
- Relativ luftfuktighet, RF ( $\varphi$ )  
 Anger förhållandet mellan den aktuella luftfuktigheten,  $V$ , och vad den kan vara maximalt vid rådande temperatur,  $V_s$ . Anges oftast i procent.

$$\varphi = \frac{V}{V_s} \cdot 100 \quad (2)$$

## 2.4 KRYMPNING

Anledningen till att trä krymper vid torkning under fibermättnadspunkten beror på att det bundna vattnet i cellväggen avdunstar eller på annat sätt försvinner.

Krympningen hos trä är rikttningsberoende, i axiell led krymper det minst och mest i tangentiell led. För gran gäller följande [8]:

- Axiell led,  $s_a \approx 0,3\%$
- Radiell led,  $s_r \approx 3,6\%$
- Tangentiell led,  $s_t \approx 7,8\%$

Skillnaden mellan krympning i tangentiell riktning och i radiell riktning kan delvis förklaras enligt [5] genom växlingen mellan vårved och höstved i det radiella planet, som beroende på den större höstvedskrympningen inducerar den vekare vårveden att krympa mer tangentiellt än vad den skulle göra ensam.

Volymkrympningen enligt [5],  $s_v$ , är något mindre än summan av de tre riktningarnas komponenter och anges som:

$$s_v = 100 \cdot (1 - (1 - 0,01 \cdot s_a)(1 - 0,01 \cdot s_r)(1 - 0,01 \cdot s_t)) \quad (3)$$

,där krympningen är given i procent. Approximerat blir uttrycket:

$$s_v = s_a + s_r + s_t - 0,01 \cdot s_r \cdot s_t \quad (4)$$

och slutligen som

$$s_v = s_r + s_t \quad (5)$$

Detta ger för gran:

$$\begin{array}{r} s_t = 7,8\% \\ + s_r = 3,6\% \\ \hline s_v = 11,4\% \end{array}$$

Man kan alltså säga, då man är beredd att acceptera större approximationer, att volymkrympningen beror på summan av krympningen i radiell och tangentiell riktning.

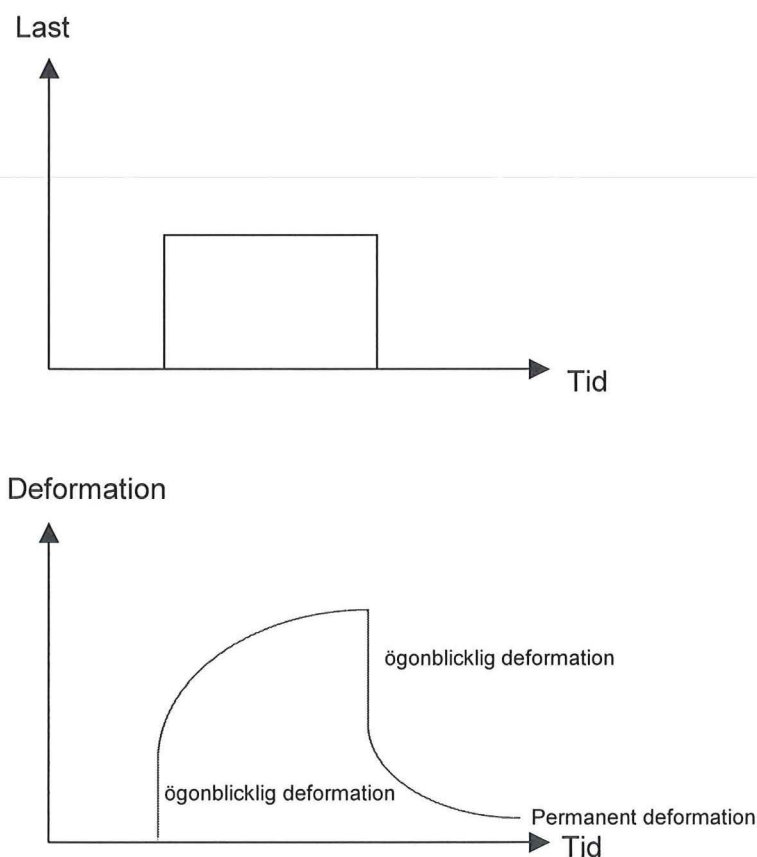
Dessutom beror krympningen på vilken temperatur man torkar träet i, t.ex. ger torkning enligt [9] i 80°C (radiell riktning) mindre krympning än torkning i 20°C (radiell riktning), medan torkning i 60°C (tangentiell riktning) ger upphov till större krympning än i 20°C och 80°C (tangentiell riktning). Men träets dimensionella förändringar förorsakade av skillnader i temperatur är små i jämförelse med de förändringar som sker vid upptagande och avgivande av fukt.

## 2.5 KRYPNING

Krypning definieras vanligtvis som en tidsfördröjd deformation som uppträder hos ett material under konstant last.

När man gör ett kryptest är det viktigt att tänka på att lasten som läggs på ska läggas på i stort sett momentant för att få ett så rättvisande resultat som möjligt. Dessutom måste lasten hållas konstant under hela försöket. Eftersom deformationen av trä påverkas av både temperatur och relativ fuktighet är det också viktigt att kunna kontrollera klimatet som försöket görs vid så att det hålls konstant. Försöket kan pågå under ett par timmar till flera år. Då man vill kunna göra en förutsägelse om hur träet kommer att uppföra sig i framtiden bör man göra ett försök under längre tid för att uppnå ett mer rättvisande resultat.

Figur 6 visar i princip hur ett kryptest går till.



Figur 6: Kryptest - där översta bilden visar en last-tids funktion och understa bilden visar en deformation-tids funktion [10].

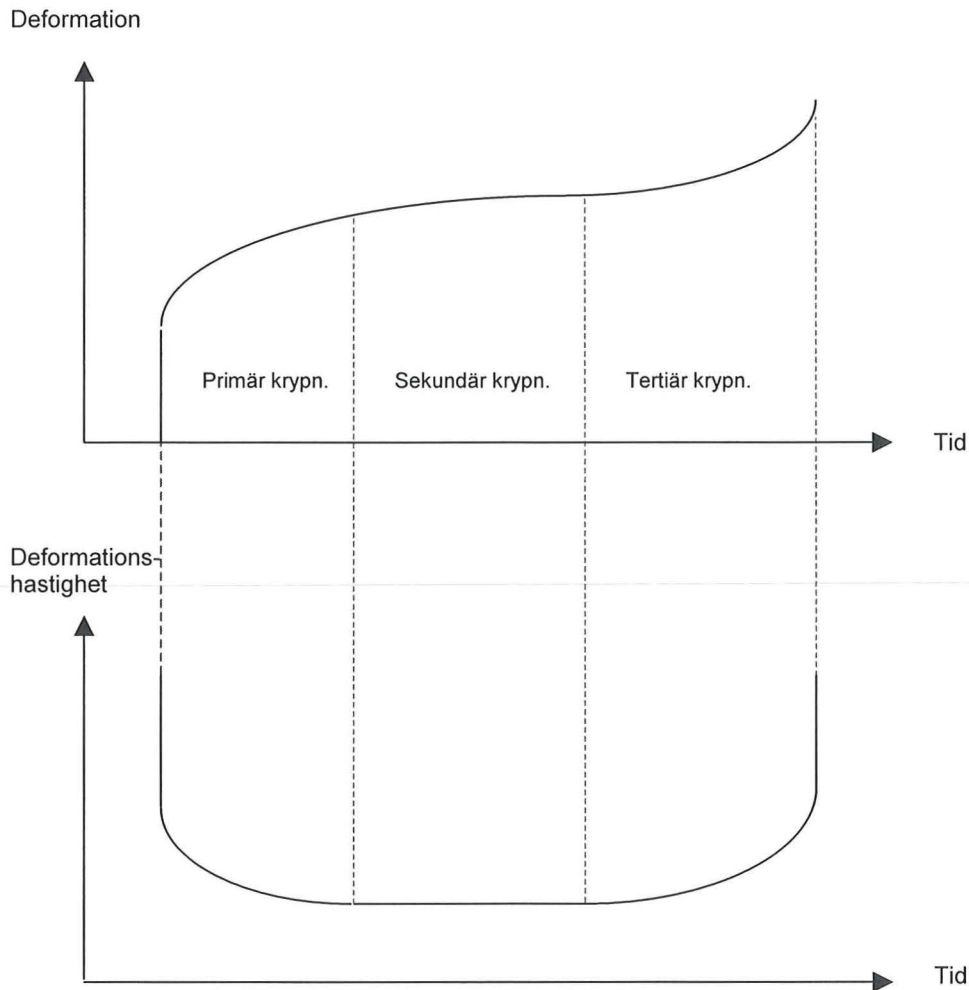
Då man vill jämföra olika experimentvärden från olika källor är det vanligt att man jämför den relativa krypningen istället:

$$\zeta_c = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_e}{\varepsilon_e} \quad (6)$$

,där  $\varepsilon_e$  = initiell töjning (elastisk)

$\varepsilon(t)$  = töjning vid tiden t

Om krypning går mot brott kan man urskilja tre olika faser i deformationen: primär, sekundär och tertiär deformation (se Figur 7).



Figur 7: Krypnings olika steg fram till brott [10]

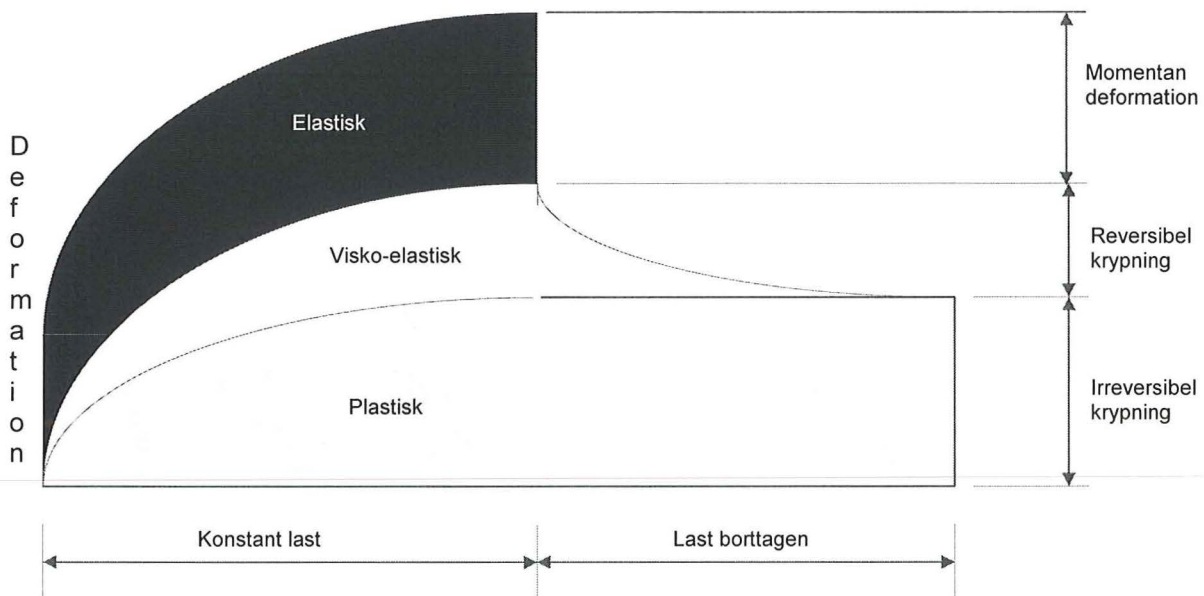
Under den primära krypningen minskar deformationshastigheten, medan den under den sekundära krypningen är konstant för att börja accelerera under den tertiära krypningen. Viktigt att nämna är att inte alla träbaserade material går igenom alla tre faserna. Typen av lasten (storlek och varaktighet) spelar en betydande roll, men även trämateriallets föregående lastfall, temperatur och fukttinnehåll är signifikanta storheter:

- **Temperaturen:** Likt många andra material ökar både hastigheten och storleken på krypningen med ökande temperatur för trä.
- **Konstant fukttinnehåll:** Hastigheten och storleken på krypningen i trä med hög fukthalt är märkbart större än för torrt trä (jämför nylon där samma fenomen finns).



- Varierande fukttinnehåll: När fukttinnehållet varierar mellan torrt och vått kommer även deformationen följa ett cykliskt mönster p.g.a. mekanisk sorption (se kapitel 5.5).

För att lättare åskådliggöra krypningen brukar den indelas i tre komponenter; en elastisk del (ögonblicklig), en visko-elastisk del och en plastisk del (se Figur 8).



Figur 8: De olika elastiska och plastiska komponenterna av deformationen i trä under konstant last [5].

Då man tar bort lasten går deformationen tillbaka momentant motsvarande lika mycket som den deformerades initialt. Denna del kallas den helt elastiska deformationen. Med tiden kommer även den kvarvarande deformationen att minska med avtagande fart för att till sist inte avta mer. Denna del kallas för den visko-elastiska deformationen, alltså en reversibel del. Den återstående delen kallas för plastisk deformation, en irreversibel del. Summan av dessa delar blir totala deformationen:

$$\delta_{TOT} = \delta_e + \delta_{ve} + \delta_p \quad (7)$$

## 2.6 ELASTICITETSMODULEN, *E*

Elasticitetsmodulen ger en uppfattning om hur styvt materialet är, d.v.s. hur stor töjning en viss belastning ger upphov till.

Följande faktorer inverkar mer eller mindre på elasticitetsmodulen hos trä:

- **Densitet:** Densiteten är en funktion av hur stor andel cellväggen utgör av cellens diameter. Högre densitet ger en större *E*-modul.
- **Kvistar:** Närvaron av kvistar reducerar styvheten. Detta beror inte bara på deras antal och storlek utan även på spridningen längs och tvärs provet.
- **Mikrostruktur: (Ultrastructure)** Lignin är ansvarig för en stor andel av träets styvhet. Vinkeln, i vilken microfibrillerna ligger i mellersta lagret i den sekundära cellväggen spelar också en betydande roll för den kontrollerade styvheten. Ett materials styvhet är mycket beroende på typ och grad av kemisk bindning inom dess struktur. Överflöd av kovalenta bindningar i det longitudinella planet och av vätebindningar i det transversella planet bidrar till ett styvare trä.
- **Fukttinnehåll:** Man får en linjär reduktion i styvhet när fukttinnehållet ökar till ungefär 30% (d.v.s. upp till fibermättnadspunkten) därefter är den konstant. Elasticitetsmodulen är dessutom mindre känslig för fukttinnehåll i den longitudinella riktningen än i både den radiella och den tangentiella.
- **Temperatur:** Med ökande temperatur minskar styvheten och styrkan på materialet.

## 2.7 TORKNING

Det finns ett stort antal anledningar och fördelar med att torka trä innan det används. De viktigaste av dessa anledningar är enligt [6]:

- Vid fuktkvoter över 20% är trä särskilt utsatt för angrepp av svamp.
- Vid torkning underlättas hanteringen (träet blir lättare) och därmed minskas transportkostnaderna.
- Skyddsimpregnering mot röta och insekter kan ske mera effektivt.
- Virkets hållfasthet förbättras (men först under fibermättnadspunkten). Torkningsfel såsom sprickor kan ha en motsatt effekt.
- Virkets värmeisolerande förmåga ökar allteftersom fuktkvoten minskar.
- En förkortad torkningstid ökar möjligheterna att utnyttja snabba växlingar på byggmarknaden.
- Nysågat virke måste torkas för att minska krympningen i den färdiga produkten.

Det som främst påverkar torkningsresultatet gällande kvalitet är:

- träets densitet och struktur
- begynnelse- och slutfuktkvoten
- torkningsluftens temperatur och relativa fuktighet
- träets förbehandling
- lufthastigheten

Det finns många olika faktorer som inverkar på torkningstiden:

### *Temperaturen*

En av faktorerna som har en markant inverkan på torkningstiden är temperaturen. Enligt [6] ger en fördubbling av temperaturen vid torkning under fibermättnad inom ett intervall mellan 40 och 80°C en ungefär tre gånger så hög torkningshastighet. Detta beror till stor del på att diffusionen (ångtransportkapaciteten) ökar starkt med ökande temperatur.

### *Lufthastigheten*

Lufthastigheten vid torkningen har dels till uppgift att överföra värme till virket och dels att föra bort det förångade vattnet. Står luften stilla bildas det av det avdunstate vattnet ett skikt av fuktig luft över träytan och den fortsatta avdunstningen bromsas upp. För låg lufthastighet gör att lufthastighets-fördelningen blir ojämnt fördelad över virkesstapeln. Vilket leder till att torkningen blir ojämn. Vid ökning av lufthastigheten ökar även torkningshastigheten, eftersom ju snabbare luftströmmen är, desto bättre blir kontakten mellan luft och träyta och desto snabbare sker avdunstningen. Det är dock inte ekonomiskt ur energisynpunkt att höja lufthastigheten alltför mycket. En ökning av lufthastigheten innebär att även fläktmotoreffekten måste ökas och till sist blir ökningen av torkningshastigheten bara marginell i jämförelse med hur mycket man måste öka effekten. Minimikostnaden ligger vid 2–5 m/s enligt [8] beroende på vad och hur man vill torka.



*Fuktkvoten*

Fuktkvoten är den egenskap hos träet som har den största inverkan på torkningshastigheten. Vid höga fuktkvoter är torkningshastigheten betydligt högre än vid låga fuktkvoter, d.v.s. ångtransportkapaciteten minskar med minskande fuktkvot.

*Virkestjockleken*

En tumregel är att en fördubbling av virkestjockleken ger ungefär en fördubbling av torkningstiden. Dock så förekommer stora avvikelser från denna tumregel, eftersom det är flera faktorer som spelar in, t.ex. träets densitet och hur stor andel kärnved som träet innehåller.

*Densiteten*

Ett träslag med högre densitet torkar långsammare än ett lättare träslag. Denna inverkan är störst under fibermättnadspunkten.

Det finns ett flertal olika torkningsmetoder och här nedan (se Tabell 3) är några beskrivna kortfattat med fördelar och nackdelar angivna.

- Tabell 3 a).

Olika torkningsförfarande enligt [7]

Torkningsmetoder	Princip	Fördelar	Nackdelar
Vandringstorkning (progressiv tork) Vanligaste torkningsmetoden i Sverige.	Virkesstaplar matas successivt in i torkens ena ända och ut ur den andra änden med vissa tidsintervall (satsningsintervall).	Jämn ström av torrt virke. Låg och jämn värmeförbrukning. Lämplig när det gäller stor produktion av likartat virke.	Fungerar dåligt vid blandning av träslag. Torkkanalen måste vara så lång att en riktig fördelning av temperaturer och relativa fuktigheter uppstår längs kanalen.
Friluftstorkning	Torkning i utomhusklimat med naturlig luftning. Kräver skydd från direkt solinstrålning.	Låga kostnader (anläggnings- och energikostnader). Gynnsam vid viss förtorkning.	Tidskrävande, klimatberoende och svårt att kontrollera torkningsskador.
Lågtemperaturstorkning ("Fint väder torkning") upp till ~ 40°C	Man uppnår ett konstant varmt klimat i ett slutet rum genom uppvärmning och cirkulation av luft. Bra för förtorkning.	Låga investerings- och driftskostnader, dock måste väggarna vara isolerade.	Man kan inte ställa in något torkningsprogram. Relativt långsamt.
Normaltemperaturstorkning ("Kammartorkning") 40°C – 90°C	Som ovan nämnda Förfarande. Torkning efter klimatprogram med stark luftcirkulation och frånlufts/friskluftsreglering.	Låga slutfuktkvoter. Möjligt att torka stora mängder. Energitillförsel genom förbränning av träbiprodukter (spån, flis, bark osv).	Känsliga träarter och stora tvärsnitt måste torkas försiktigt.
Högtemperaturstorkning ("Hetlufts- och ångtorkning") över 100°C	Delvis mycket intensiv och snabb torkning för trä av mindre tvärsnitt och lägre kvalitetskrav. Luftcirkulation med till/frånluftsstyrning.	Snabb torkning och stor kapacitet. Energitillförsel m h a avfallsprodukter.	Är för stora tvärsnitt och känsligt trä inte tillräckligt skonande. Användningen är inte så utbredd.



- Tabell 3 b).

Speciella torkningsförfarande enligt [7]

Speciella metoder	Princip	Fördelar	Nackdelar
Vakuomtorkning	Torkning vid lägre temperaturer i vakuum genom att sänka kokpunkten på vattnet. För att förhindra den dåliga värmeövergången i vakuum värmer man upp periodiskt till normaltryck m h a värmeplattor.	Hög torkningshastighet, men trots det relativt skonande.	Relativt dyr anläggning av begränsad storlek, därav liten kapacitet.
Kondensationstorkning	Avfuktning av torkningsluften genom kondensation och avledning på kylaggregat. Återvinning av en del av den avgående värmen genom värmepumpar. Speciell till/frånluftsstyrning. Låga torkningstemperaturer.	Uppskattad användning. Skonsam torkning av känsliga träarter och stora tvärsnitt. Särskilt ekonomisk när det finns tillgång till elektrisk energi.	Inte alltför låga slutfuktkvoter. Begränsad kapacitet.

### 3 MATERIALBESKRIVNINGAR

I detta kapitel beskrivs några viktiga mätinstrument och utrustningar som vi har använt under våra försök.

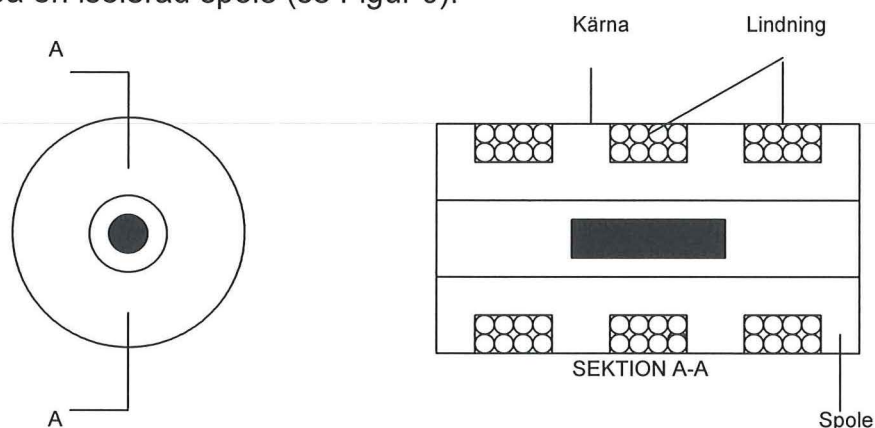
#### 3.1 GIVARE – LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

##### Allmänt

En givare omvandlar en fysikalisk parameter t.ex. tryck, temperatur eller position till en elektrisk signal. En lägesgivare gör det följaktligen möjligt att mäta en positionsförändring. Denna kan man likna vid en mycket noggrann elektronisk linjal.

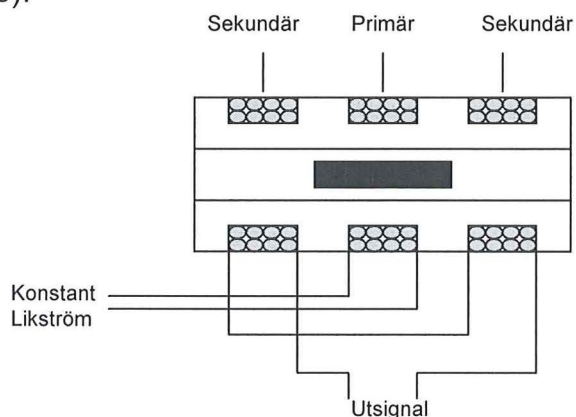
##### Teknisk beskrivning

LVDT-givaren består av tre symmetriskt lagda lindningar (en primär i mitten och två sekundära lagda symmetriskt på vardera sida om den primära) som är omsorgsfullt lindade på en isolerad spole (se Figur 9).



Figur 9. Mekaniska komponenter i en LVDT-givare  
- Principskiss [11]

Inne i denna spole löper sedan en kärna som består av en likformigt tät cylinder tillverkad av en nickeljärn legering som sedan har blivit noggrant härdad för att förbättra och homogenisera dess magnetiska permeabilitet. Till den primära lindningen är likström anslutet. De två sekundära lindningarna är kopplade i serie (se Figur 10).



Figur 10. En givare (LVDT) [12]

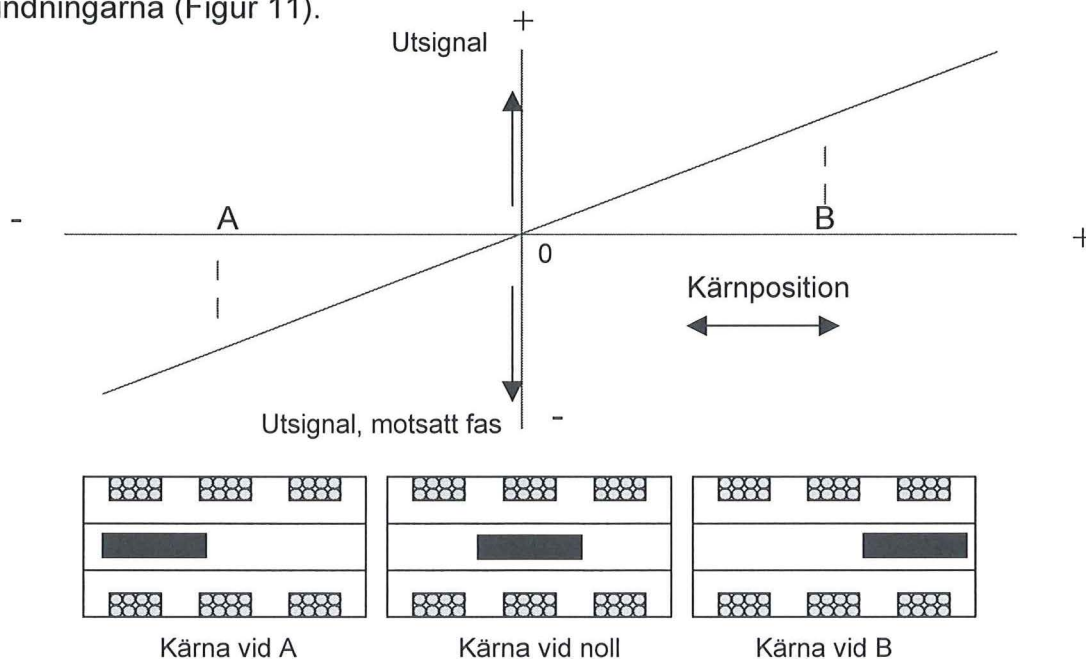
Lindningarna är vakuumimpregnerade med en lackning och därmed ogenomträngliga för fukt eller magnetiska störningar för att vara anpassade på bästa sätt för den färdiga produktens arbetsmiljö. Bland annat finns givare gjorda i täta, trycktäta eller, för de mest utsatta försöken, hermetiskt täta utförande för att kunna operera i mer eller mindre aggressiva omgivningar som t.ex. korrosiva vätskor eller atmosfärer, höga temperaturer eller radioaktiv strålning.

Eftersom det inte är någon kontakt mellan kärnan och lindningarna slits de mekaniska komponenterna inte nämnvärt fort ut eller försämras och dessutom ger frånvaron av friktion en nästan oändlig upplösning och ingen hysteres. Kärnans likformade massa och avsaknaden av friktion förhöjer dessutom kapaciteten för gensvar under t.ex. dynamiska mätningar, vibrationstest av finkänsliga material eller kryptest på fibrer eller andra elastiska material. Eftersom givaren på så sätt kan svara på de mest momentana rörelserna av kärnan och producera en utsignal så är det oftast den externa elektroniken som inte hinner med och därmed begränsar noggrannheten på mätningarna.

### Funktionsbeskrivning

En lägesgivare fungerar enligt LVDT-principen (Linear Variable Differential Transformer) dvs en likström är kopplad till den primära lindningen och driver en ström genom denna. På så sätt produceras ett magnetiskt fält som är koncentrerat runt kärnan. Detta magnetiska fält passerar sedan genom de två sekundära lindningarna och inducerar där en spänning.

Då kärnan är centrerad mellan de sekundära lindningarna är den inducerade spänningen i de två sekundära lindningarna lika stora men 180 grader ur fas så att det inte alstras någon utsignal. Om kärnan flyttas ur centrum kommer den gemensamma induktansen mellan den primära och den ena sekundära lindningen att bli större än den mellan den primära och den andra sekundära lindningen och på så sätt kommer det att alstras en differentiell spänning över de två sekundära lindningarna (Figur 11).



Figur 11. Utsignalen som funktion av kärnans position [12]



En plottning av utsignalen mot kärnans förflyttning är väsentligen en rak linje inom kärnans specifika räckvidd, där den maximala avvikelser av utsignalen är anpassad till en rak linje med hjälp av minsta-kvadrat metoden på en serie av värden från kalibreringen.

Den maximala förflyttningen som kärnan kan göra kallar man för fullskaleförflyttning och eftersom den kan förflytta sig från noll till varje ända är den linjära operativa räckvidden dubbelt så stor som fullskaleförflyttningen. Denna fullskaleförflyttning är ett centralt begrepp på en LVDT och kallas för Nominal Linear Range. För hög resistiv last är den normalt specificerad mellan 50 kohm och 0,5 Mohm. För låg resistivitet bör man överväga effekten på linjär räckvidd.

### **Tekniska data**

Givaren opererar normalt vid 5 Vrms och vid frekvenser mellan 1 och 20 kHz.

Normal strömkonsumtion ligger på 12 mA med ett maximum på 50 mA.

Utsignalen uttrycks som känslighet i  $mV_{\text{utsignal}}/V_{\text{Insignal}}/mm_{\text{förskjutning}}$  vilket motsvarar andelen förändring i signal per mekanisk positionsförändring.

Det finns två olika modeller i en mängd olika utförande på marknaden:

- Förflyttningsgivare
  - AC Miniature
  - Standard AC Long Stroke
  - DCST Series
  - Submersible
  - MD-Micro
  - SMGH1 Snap/Plug Gauge
  - ST Series
  - Ultra Long
  
- Justeringsgivare<sup>1</sup>
  - LVDT Spring Return
  - Half Bridge Spring Return
  - LVDT Pneumatic Push
  - Half Bridge Pneumatic Push
  - LVDT Vacuum Retract
  - Half Bridge Vacuum Retract
  - Adjustable Pretravel Givare
  - Ultra Short Body Gauging Givare
  - Extended Overtravel Gauging Probe
  - Block Gauge

En typisk givares känslighet ligger mellan 1,7 och 158 mV/V/mm för förflyttningsgivare och mellan 85 och 280 mV/V/mm för justeringsgivare.

Temperaturområdet som givaren kan arbeta inom varierar starkt mellan de olika modellerna. LVDT'n är inte helt okänslig för temperaturvariationer, men oftast tar man ingen hänsyn till detta då det inte påverkar utsignalens stabilitet.

---

<sup>1</sup> Justerings givare är inte så intressanta för oss och har därför inte tagits upp.

**Hållare - Ställning**

Vi använde oss av aluminium hållare som fixerades stabilt mot underlaget (träprovbitarna) med hjälp av två sfäriska nubbar (för att ge hållaren stabilitet) och en konisk nubba (som tränger in i provbiten). Den koniska nubben är en millimeter längre än de sfäriska. För att inte hållarna ska tappa taget när provbitarna krymper är skruvarna mellan de två givarna (se Figur 13) försedda med fjädrar så att tillräckligt med tryck upprätthålls på proven under hela försökstiden. Fixeras hållarna för hårt mot träprovet kan en kritisk punkt uppstå där träprovet går till brott.

### 3.2 VB6020 - ELPATRON

För att värma vattnet i vår försöksanordning i vått tillstånd använder vi oss av en elpatron VB 6020 från "Värmebaronen" med termostat som är ställbar inom temperaturområdet 30 - 85°C. Termostaten har ett överhettningsskydd som bryter spänningen till elpatronen om vattentemperaturen överstiger 95°C, och som kan först återställas då vattentemperaturen har sjunkit till ungefär 80°C.

#### *Tekniska data:*

Elpatronen har en tvåstegstermostat, dvs termostaten arbetar i två steg med två parallella temperaturbanor. Steg nr 1 kopplas in vid 5°C lägre temperatur än steg nr 2. Kopplingsdifferensen (skillnaden mellan till- och frånslag) för varje termostatsteg är ungefär 5°C.

VB 6020	
Vikt	1,9-2,1 kg
Längd-elpatron	410/415 mm
Effekt	6 kW
Ström	8,7 A
Säkring	3x10 A

- Tabell 4. Tekniska data [13]

#### *Rekommendationer:*

Man bör ta hänsyn till att vi använder elpatronen vid höga temperaturer och att risken för att en hård beläggning bestående av kalcium- och magnesiumkarbonater (så kallad pannsten) fälls ut ökar. Om denna beläggning fastnar på elpatronen fungerar den som en isolator som höjer yttemperaturen på elpatronen och som i det långa loppet kan förorsaka läckage och kortslutning. Detta är särskilt viktigt att ta hänsyn till i orter med hårt vatten, där rekommenderas att på något sätt förbehandla vattnet så att hårdheten sänks.

Dessutom bör vattnets pH-värde inte vara för lågt då detta kan ge frätskador på elpatronen. Om vattnet innehåller mycket klorider kan det också ge skador på den rostfria elpatronen, använd då istället en elpatron av koppar.

### **3.3 KLIMATSKÅPET**

Klimatskåpet (se Figur 14) är en produkt från Arctest med en Jumo-regulator. Skåpets volym är 1 m<sup>3</sup>. Temperaturen och den relativa luftfuktigheten kan regleras parallellt. Temperatur-intervallet är -30°C till 120°C och den relativa fuktigheten kan varieras mellan 30% och 90% (dock endast i temperaturintervallet 15°C till 95°C). Dessa operationer utförs lätt utifrån via en kontrollpanel.



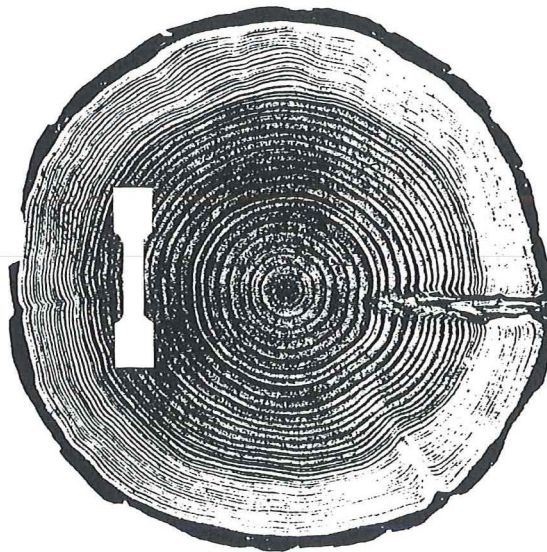
## **4 METODBESKRIVNINGAR**

Här beskrivs hur vi utförde de olika försöken i klimatskåp och vattenbad samt densitetmätningen.

### **4.1 I KLIMATSKÅPET – TORRT FÖRSÖK**

#### **4.1.1 PROVKROPP**

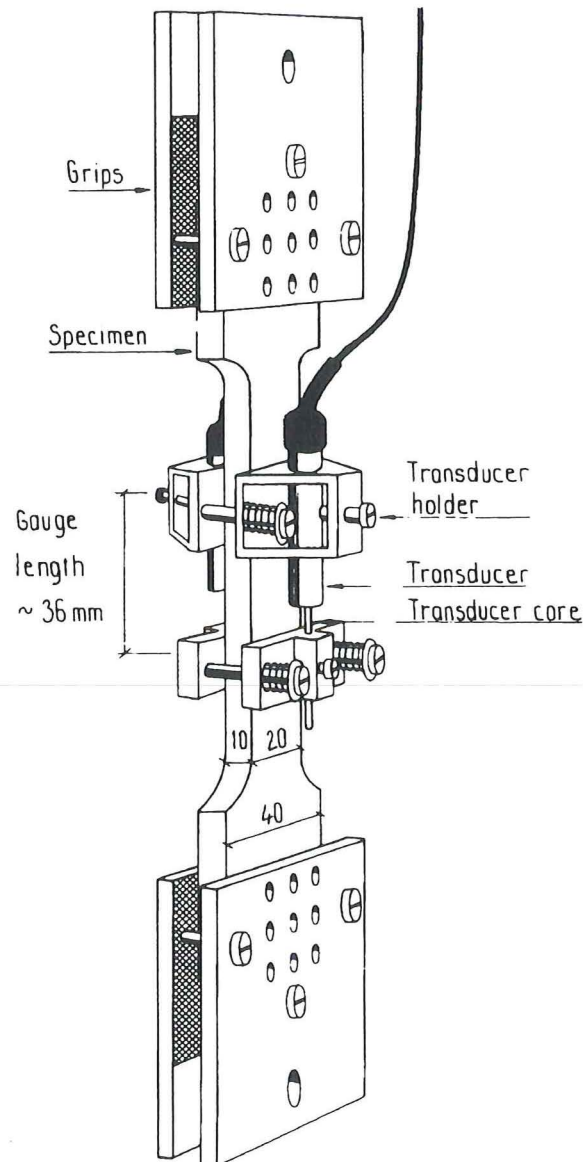
Till varje försök användes 6 st träprovkroppar av gran. De togs ur kärnan nära roten som Figur 12 illustrerar. Enbart provkroppar utan synbara defekter valdes.



*Figur 12. Var provkroppen är tagen*

Provkropparna förvarades innan försöket i en frysbox. Frysförvaringen, vid ca  $-1^{\circ}\text{C}$ , beror på att man ville bevara den naturliga fuktigheten på drygt 30% i träet. Provkropparnas dimensioner är: längd  $200\pm 1\text{mm}$ , bredd  $20\pm 1\text{mm}$  (midja), tjocklek  $10\pm 1\text{mm}$  (Figur 13). Längden över vilken deformationen mäts är 36 mm. Provkroppens geometriska storlek är vald så att det är praktiskt och tekniskt möjligt att mäta deformationen samtidigt som termiska gradienter, fuktgradienter och inre spänningar kan anses vara försumbara.



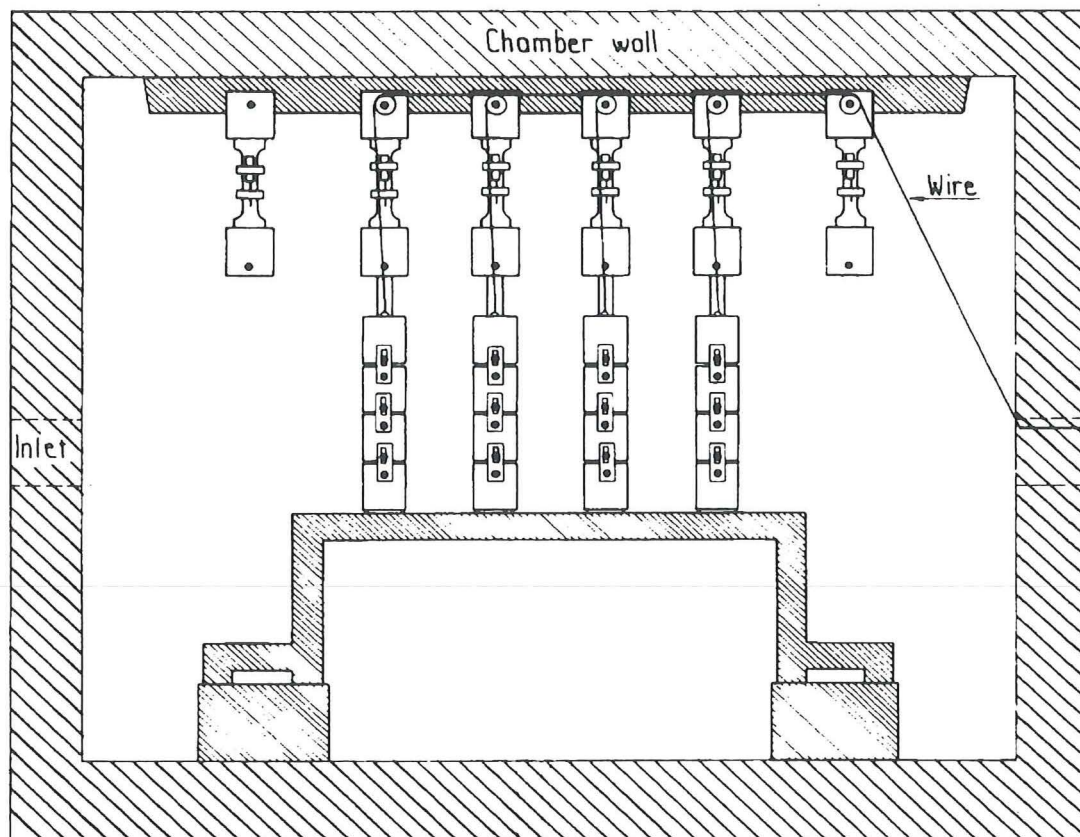


Figur 13. Monterad provkropp [9]

#### 4.1.2 PROVNINGSPROCEDUR

Provkropparna vägdes och mättes (se Bilaga 1 – Sammanställning av in- & utgångsdata) varefter fästplattor av aluminium skruvades fast i varje ända av dem för att lätt kunna montera provkroppen i klimatskåpet. Fästplattorna är försedda med hål så att fukt kan avdunsta ut från träprovets ändsidor. På mitten av provkroppen fästes en lägesgivare. Allt detta gjordes med hjälp av en gigg som gjorde att fästplattorna och lägesgivarna kom på samma plats på samtliga provkroppar.

Efter monteringen vägdes anordningen (provkroppen + fästplattorna + lägesgivarna + sladdarna). Monteringen skedde i ett klimatrum (20°C och 87% RF) för att träet inte skulle torka. Därefter monterades träprovkropparna i klimatskåpet (Figur 14).



Figur 14. Provkropparnas ställning i klimatskåpet [14]

I provkropparna hängdes vikter (vardera 20 kg uppdelade på 4 st 5 kg:s delvikter) som via wirer är möjliga att lyfta och sänka från utsidan av skåpet. Alltså kan belastningen på provkroppen varieras mellan 0 och 20 kg, och till en början var samtliga provkroppar obelastade.

Kablarna från lägesgivarna kopplades till en dator där längdförändringarna registrerades. Samtliga lägesgivare ställdes in på ca 1 mm som utgångsvärde (för att utnyttja lägesgivarna optimalt). Detta gjordes Dag 1 (se Schema 1).

Dag	Aktivitet	Dag	Aktivitet
1	Start	7	-----
2	-----	8	-----
3	Krympning	9	Avlastning
4	Pålastning	10	-----
5	-----	11	-----
6	-----	12	Slut/krympning

- Schema 1. Schema för klimatskåpsinställningar 20 °C/50% RF, 60 °C/60% RF och 90 °C/73% RF.

Under den tredje dagen kontrollerade vi krympningen, eftersom vi ville att denna skulle ha nått sitt slutvärde innan vi belastade träproverna. Då krympningen har stabiliserat sig har torkningen upphört. Att det inte sker fuktändringar i provkroppen (ingen torkning) är viktigt om man vill göra ett renodlat krypprov.

Dag 4 pålastades 4 st av de 6 proverna, 2 st med 15 kg och 2 st med 10 kg. Detta var nu en ganska enkel manöver utförd utan att störa rådande klimat i skåpet. Vikterna sänktes sakta ner mot en platta som var förbunden med provkropparna, varvid lasten överfördes successivt från wire till provkropp. 2 st av vikterna sänktes ner så långt så att tre av delvikterna vilade på plattan och de andra 2 st vikterna sänktes ner lite mindre så att plattan bara belastades med 2 st av de 4 delvikterna. Innan vi satte på lasterna ändrade vi i datorn så att den ökade antalet mätvärden, d.v.s. minskade intervallet mellan mätvärdena. Detta p.g.a. att det vid belastningen sker en snabb förlängning av provkroppen som man noggrant vill dokumentera.

Dag 9 avlastade vi provkropparna.

Dag 12 avslutades försöken och den slutgiltiga krympningen uppmättes.

Försöket upprepades tre gånger med olika klimatskåpsinställningar som alla gav en slutfuktkvot på ungefär 9% i provkroppen:

- Temperatur 20°C, 50% relativ fuktighet
- Temperatur 60°C, 60% relativ fuktighet
- Temperatur 90°C, 73% relativ fuktighet

Dessutom genomfördes ett försök med tre torkningscykler inlagda (se Schema 2) enligt ett torkningsschema.

Dag	Aktivitet	Dag	Aktivitet
1	Start	7	-----
2	-----	8	-----
3	Krympning	9	Avlastning
4	Pålastning	10	-----
5	-----	11	-----
6	-----	12	Slut/Krympning

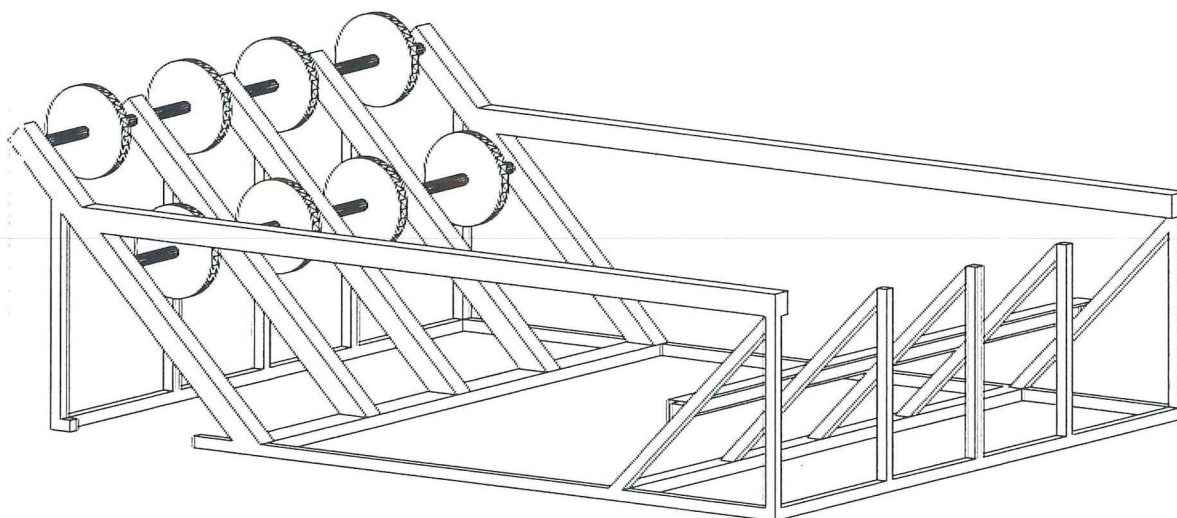
- *Schema 2. Torkningsschema*

Slutligen gjorde vi en densitetsbestämning på provbitarna (se Kapitel 4.3).



## 4.2 FÖRSÖK I EGEN ANORDNING – VÅTT FÖRSÖK

För att utföra försök i vått tillstånd konstruerades en försöksutrustning (se Figur 15, 16 och 17) i rostfritt stål. Konstruktionen är beräknad att klara av krafter på 400 N för varje provkropp (se Bilaga 2 – Konstruktionsberäkning och Bilaga 3 – Konstruktionsritningar). Denna utrustning nedsänktes sedan i ett vattenbad. Fyra provkroppar kan belastas samtidigt. I vattenbadet finns det även plats för två obelastade provkroppar. Försöken utfördes i 20°C och 60°C. Det hade även planerats ett försök i 90°C, men det kunde inte utföras p.g.a. för stor vattenavdunstning. För att klara av att värma upp vattnet och hålla temperaturen på denna nivå kopplades en elpatron in (VB6020). Då avdunstningen är stor redan i försöket på 60°C anordnades ett nästan "slutet rum" med hjälp av en presenning.



Figur 15. Egen konstruktion som nedsänkes i ett tätt plåtkar.

Försöken utfördes enligt samma schema som för de i klimatskåpet (se Schema 3) och lasterna var desamma d.v.s. 10 kg, 15 kg och obelastade.

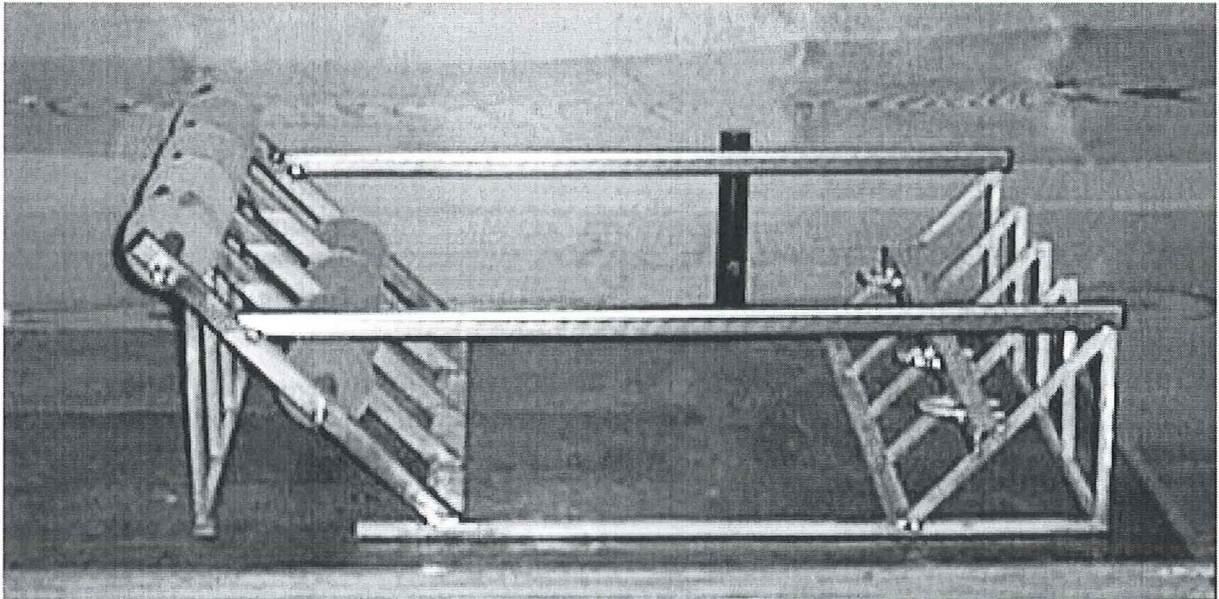
Dag	Aktivitet	Dag	Aktivitet
1	Start	7	-----
2	-----	8	-----
3	-----	9	Avlastning
4	Pålastning	10	-----
5	-----	11	-----
6	-----	12	Slut

- Schema 3. Schema för försök i egen konstruktion för vått tillstånd med temperaturerna 20 och 60 °C.

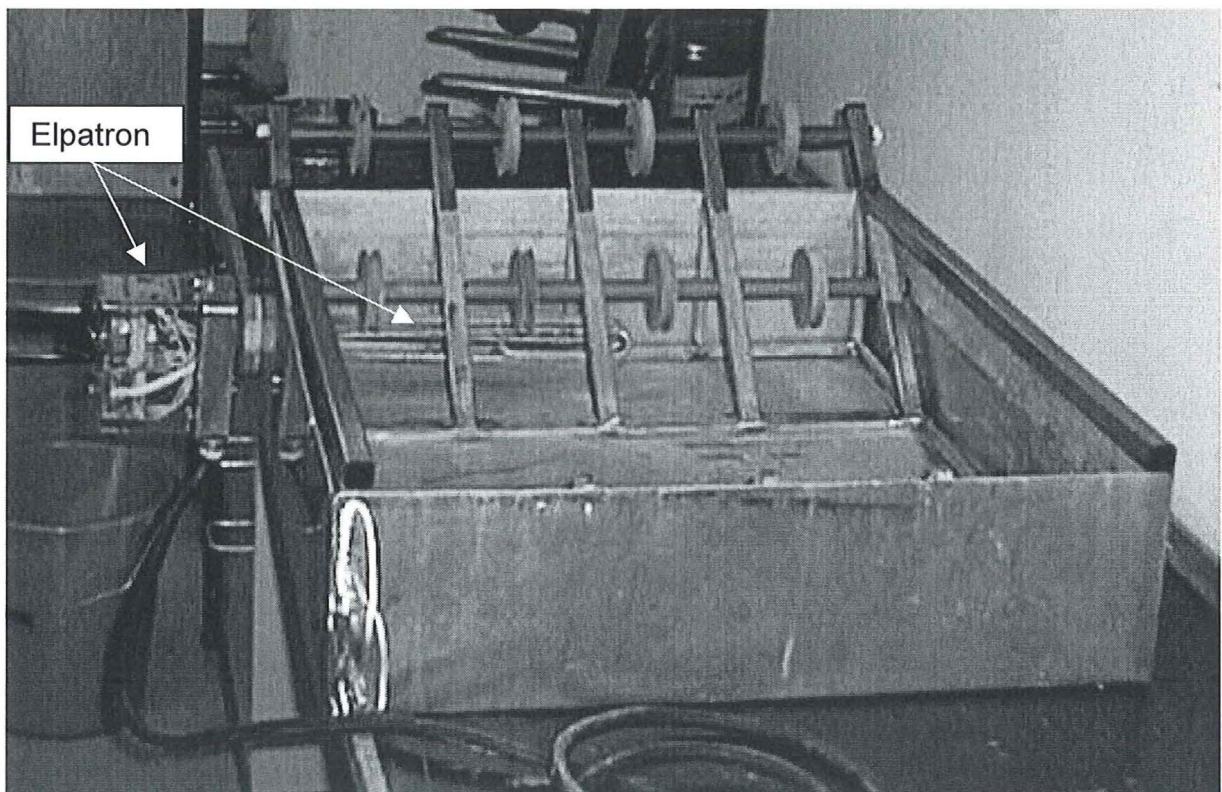
I dessa fall kontrollerades inte krympning eftersom fuktkvoten hela tiden var över fibermättnadspunkten. Alltså skulle pålastningen kunna ske tidigare, men då vi körde försök parallellt med de i klimatskåpet valde vi att använda samma schema. I övrigt



skedde försöken helt enligt de i klimatskåpet med likadana provkroppar, monterade på samma vis.



Figur 16. Försöksanordning sett från långsidan



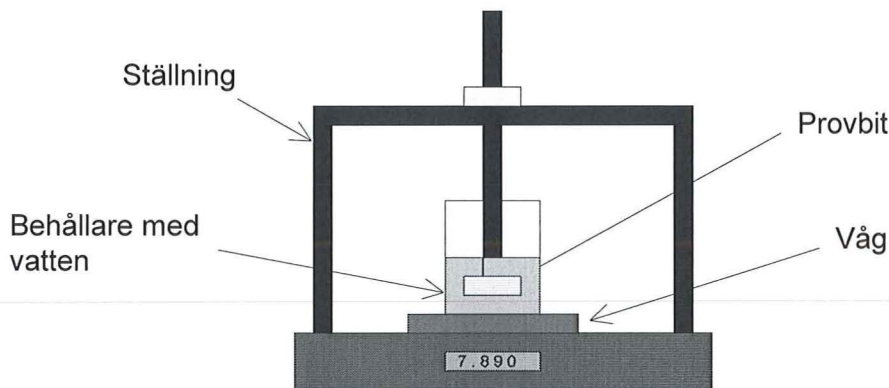
Figur 17. Försöksanordning nedsänkt i plåtkaret. I figuren syns även elpatronen.



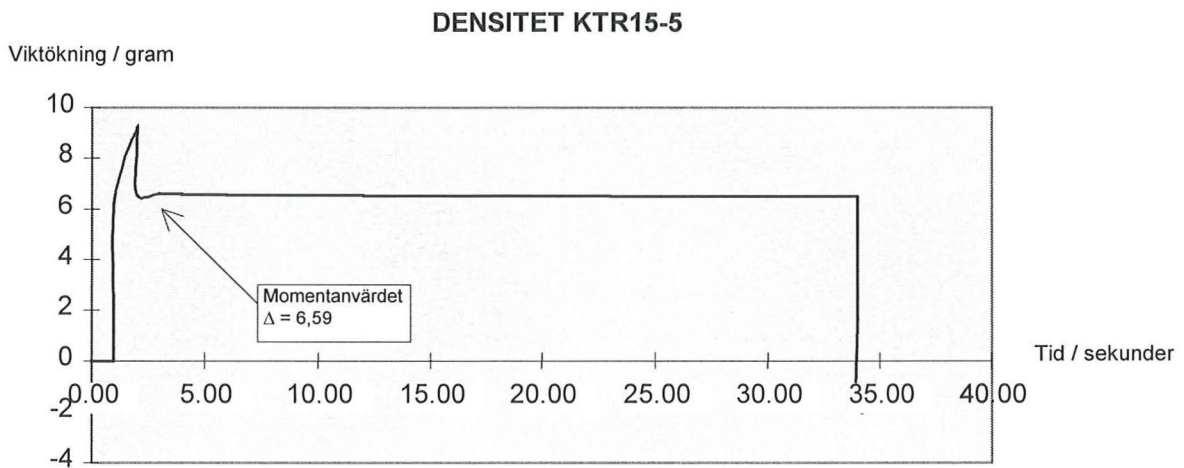
### 4.3 DENSITETSBESTÄMNING

Torr densiteten bestämdes genom att ett träprov (ungefär  $7 \text{ cm}^3$ ), taget från provkroppen, där deformationen mättes, först torkades i  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  under tre dygn och därefter vägdes i torrt tillstånd. Träproven vägdes i medel 3.08 gram och deras volym var i genomsnitt  $6.63 \text{ cm}^3$  (se Tabell 5).

Genom att sänka ner träprovet i en behållare med avjoniserat vatten placerad på en våg (se Figur 18) kan viktökningens förlopp på vågen registreras (se Figur 19). Viktökningen på vågen beskriver egentligen provkroppens volym multiplicerad med vattnets densitet enligt Arkimedes princip.



Figur 18. Försöksupställning - Principskiss Densitetsbestämning



Figur 19. Viktökning på vågen för provkropp 15-5

Det momentana värdet,  $\Delta$  (se Ekvation 8) som vi använder är det som vågen visar just när den har stabiliserat sig och så smått börjar sjunka (d.v.s. när träprovet börjar suga åt sig vatten). Varje mätning genomfördes under ungefär 40 sekunder, eftersom vi bara var intresserade av momentanvärdet och inte av själva uppsugningsfasen.

Med hjälp av följande formel kunde vi sedan bestämma träprovets densitet:

$$\rho_{tr\ddot{a}_0} = \frac{m_{tr\ddot{a}_0} \cdot \rho_{H_2O}}{\delta} \quad (8)$$

,där  $\rho_{tr\ddot{a}_0}$  är träprovets densitet vid  $u=0$  %  $(\text{kg/m}^3)$

$m_{tr\ddot{a}_0}$  är träprovets massa vid  $u=0$  %  $(\text{g})$

$\rho_{H_2O}$  är vattnets densitet  $(\text{kg/m}^3)$

$\Delta$  är viktökningen avläst på vågen  $(\text{g})$

Följande värde (se Diagram 1 och Tabell 5) fick vi från ekvation (8) för de olika provkropparna:

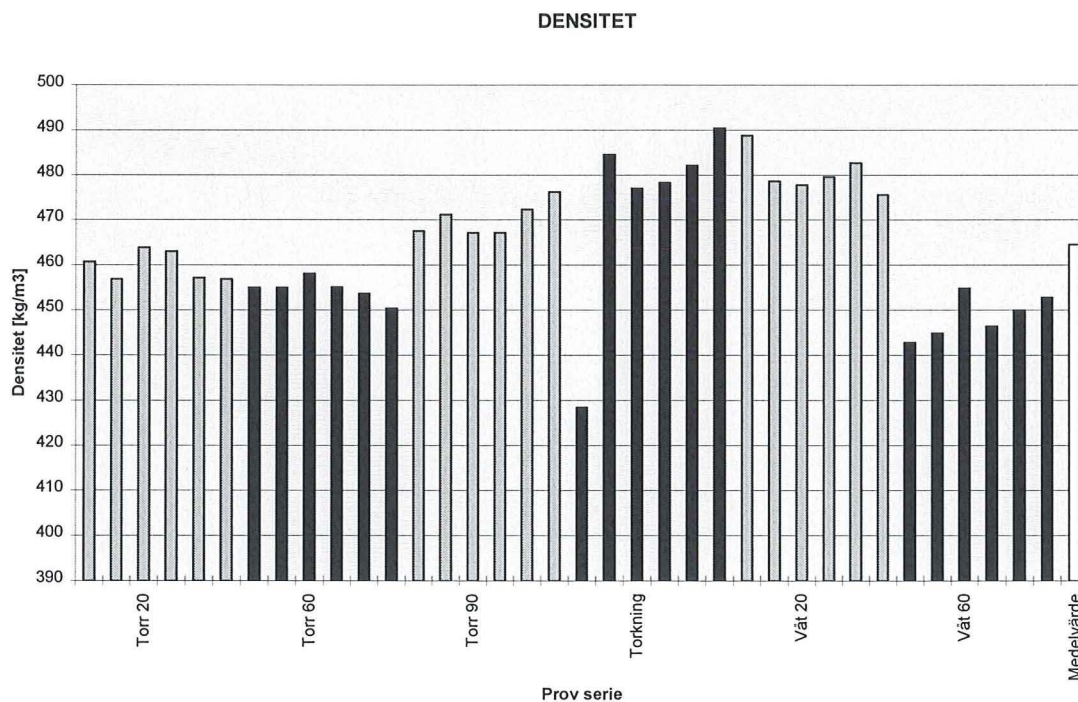


Diagram 1. Provkropparnas densitet (vit stapel i diagrammet är medelvärdet av de övriga)

Provkropp	Vikt (g)	Viktökning på våg (g)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )
12-4	3,11	6,75	460,741
12-5	3,02	6,61	456,884
12-6	3,08	6,64	463,855
12-7	2,94	6,35	462,992
12-8	2,93	6,41	457,098
12-9	3,02	6,61	456,884
12-10	3,08	6,77	454,948
12-11	3,08	6,77	454,948
12-12	2,84	6,20	458,065
12-13	3,09	6,79	455,081
12-14	2,94	6,48	453,704
12-15	3,22	7,15	450,350
13-14	3,03	6,48	467,593
13-15	3,02	6,41	471,139
13-16	3,13	6,70	467,164
13-17	3,06	6,55	467,176
13-18	3,07	6,50	472,308
16-11	3,20	6,72	476,191
15-2	2,83	5,79	488,774
15-3	3,03	6,33	478,673
15-4	3,12	6,53	477,795
15-5	3,16	6,59	479,514
15-6	3,06	6,34	482,650
15-7	3,21	6,75	475,556
14-1	3,17	7,40	428,378
14-2	3,76	7,00	537,143
14-3	3,21	6,73	476,969
14-4	3,09	6,46	478,328
14-5	3,23	6,70	482,090
15-1	3,33	6,79	490,427
13-7	2,98	6,73	442,794
13-8	2,66	5,98	444,816
13-13	2,82	6,20	454,839
13-10	3,04	6,81	446,402
13-11	3,10	6,89	449,927
13-12	3,11	6,87	452,693
<b>Medelvärde</b>	<b>3,08</b>	<b>6,63</b>	<b>464,508</b>

• Tabell 5. Densitetsberäkning

Som vi kan se ligger medelvärdet på ungefär 464 kg/m<sup>3</sup> för våra prover vilket är nära det värde på 430 kg/m<sup>3</sup> som [6] nämner för gran. Detta gäller för torrt trä, för trä med en fuktkvot på 15% nämns 470 kg/m<sup>3</sup> som ett värde på densiteten.

Slutligen kan sägas att densiteten varierar också inom samma träslag, t.ex. är densiteten enligt [6] betydligt högre i rotstocken än i mitt- eller toppstocken. Vårt prov är taget i kärnan av roten. Mellan kärnan och splinten varierar också densiteten inom samma träslag. Densitetsvariationen längs en granstock är dock inte lika utpräglad som hos en furustock [6].



## 5. RESULTAT AV FÖRSÖK

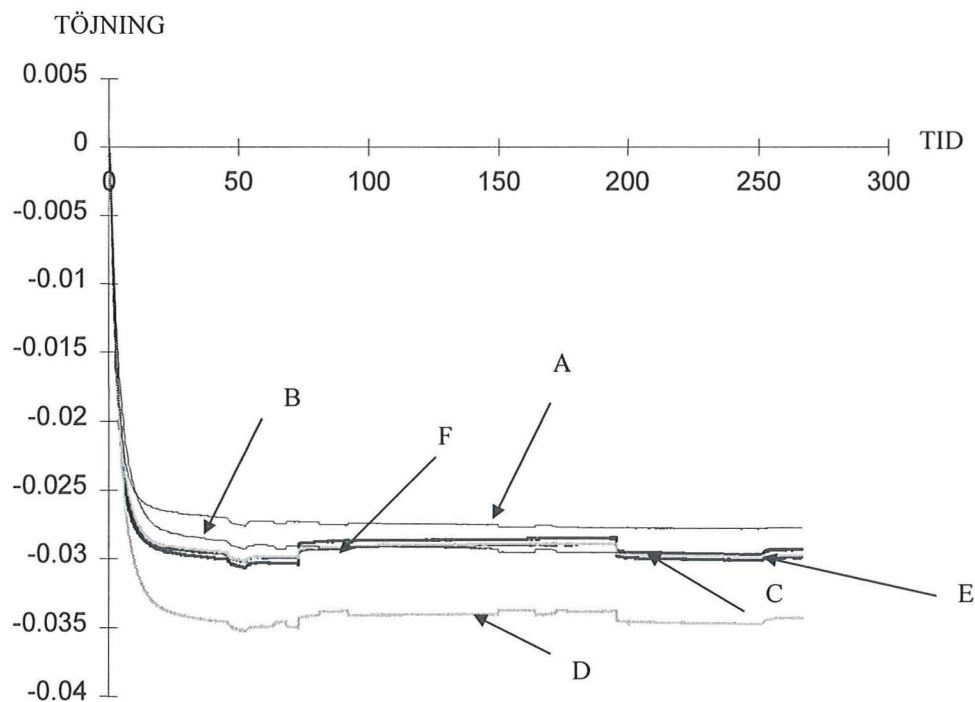
I detta avsnitt redovisas resultat från försök utförda i klimatskåp och vattenbad. Vi har även lagt till vissa observationer och konstateranden.

### 5.1 FÖRSÖK I KLIMATSKÅP VID 20°C, 50% RF

De två obelastade provkropparna krympte nästan likformigt under hela förloppet och hade efter elva dygn krympt ca 2.86%.

De fyra övriga provkropparna belastades efter tre dygn med 15 respektive 10 kg, och avlastades efter åtta dygn. Den bestående deformationen som belastningen medförde var dock liten i förhållande till krympningen. Den totala krympningen för provkropparna belastade med 10 kg var faktiskt större än för de obelastade provkropparna, ca 3.20%. Provkropparna belastade med 15 kg krympte drygt 2.96% d.v.s. även dessa krympte mer än de obelastade provkropparna. Detta tyder på att det nästan inte uppstod någon plastisk deformation under belastningen, d.v.s. att all töjning som uppstod gick tillbaka efter avlastningen.

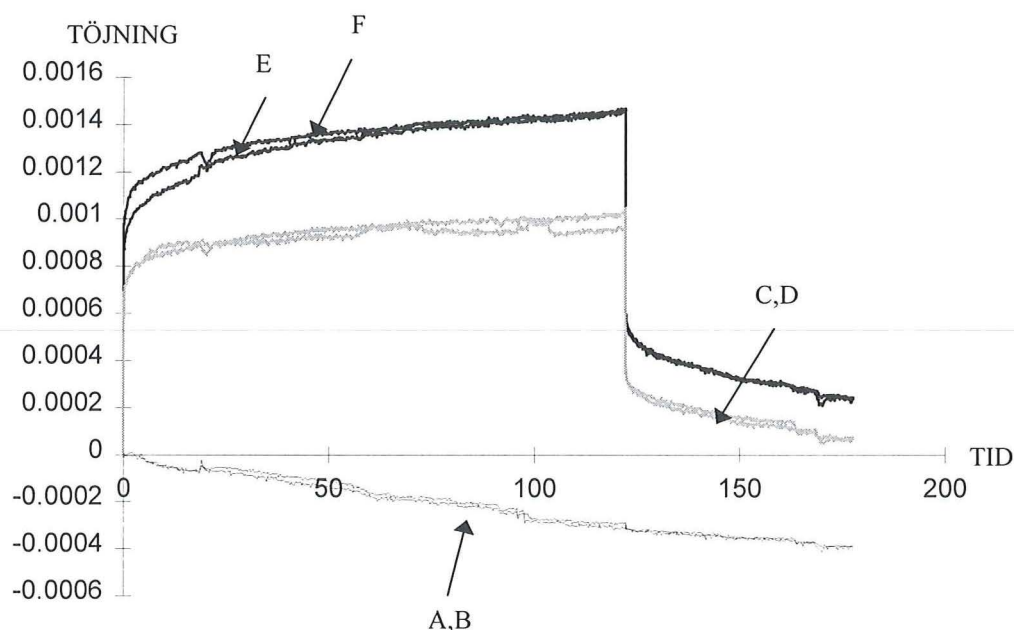
Den synliga förändringen i form av sprickbildning, färgförändring etc. hos provkropparna var inte stor.



Figur 20: Totala töjningsförloppet för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 20°C och 50% RF.  
A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg

Pålastningen kan vara svår att observera i figur 20, men kan urskiljas som ett litet hopp uppåt efter ca 72 timmar. På samma sätt syns avlastningen som ett litet hopp nedåt efter ca 192 timmar.

För att bättre åskådliggöra krypningen under lastförloppet i figur 21 visades endast tiden mellan tre och åtta dygn. Kurvorna är parallellförflyttade så att de börjar vid  $y=0$ , d.v.s. vid töjningen 0, för att lättare kunna jämföra kurvorna med varandra. Som väntat blev töjningen större för provkropparna belastade med 15 kg än för de belastade med bara 10 kg. Den största delen av töjningen var elastisk och gick tillbaka efter avlastning.



Figur 21: På- & avlastningsförlopp för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 20°C och 50% RF.  
A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg

Den relativa krypningen räknades ut enligt ekvation (6). Med den relativa krypningen menas krypningen dividerat med den elastiska töjningen (värdet på töjningen runt 1 minut efter pålastningen):

$$\zeta_c = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_e}{\varepsilon_e} \quad (6)$$

$\varepsilon(t)$  är töjningen vid tiden  $t$  och  $\varepsilon_e$  är den elastiska töjningen.

För att visa att kurvorna följer ett matematiskt förlopp anpassades en kurva till försökskurvorna. För pålastningsförloppet användes följande formel (s.k. Maxwells-Kelvin element):

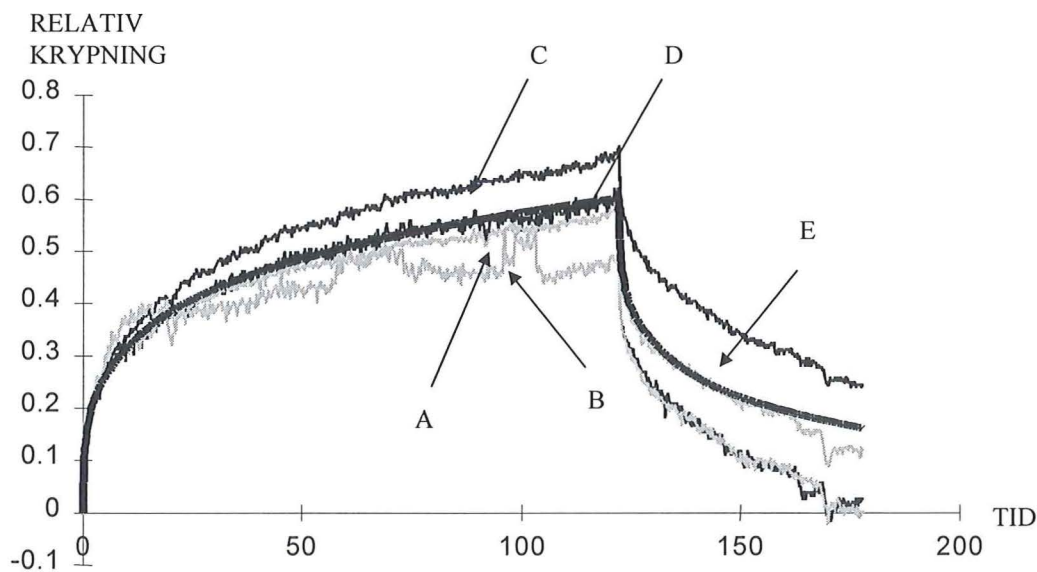
$$J(T, u, t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (9)$$

$A_i$  och  $\tau_i$  är materialparametrar som beror av fuktighet och temperatur. Antalet termer antogs till 4, d.v.s.  $i=4$ .

För avlastningsförloppet antogs att lasters inverkan på töjningen går att superponera. Detta ger följande formel:

$$J(T, u, t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot (1 - e^{-t_i/\tau_i}) \cdot e^{-t/\tau_i} \quad (10)$$

$t_i$  är tidpunkten där lasten tas bort och  $t$  är återhämtningstiden räknat från tidpunkten då lasten togs bort.



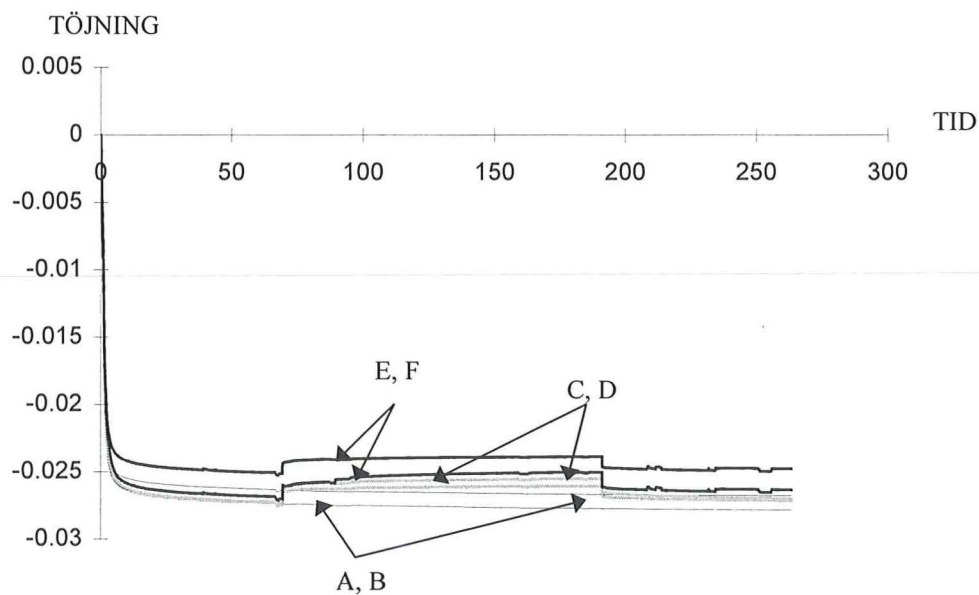
Figur 22: Relativ krypning för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60 °C och 60% RF. A,B belastade med 10 kg, C,D belastade med 15 kg, E kurvanpassning

## 5.2 FÖRSÖK I KLIMATSKÅP VID 60 °C, 60% RF

De två obelastade provkropparna krympte likformigt med i medel 2,68% under de tolv dagarna som försöket pågick.

Liksom under försök utfört i 20°C och 50% RF hade belastningen liten inverkan och provkropparna belastade med 10 kg och 15 kg krympte i medel 2,63% respektive 2,69%, d.v.s. nästan ingen plastisk deformation.

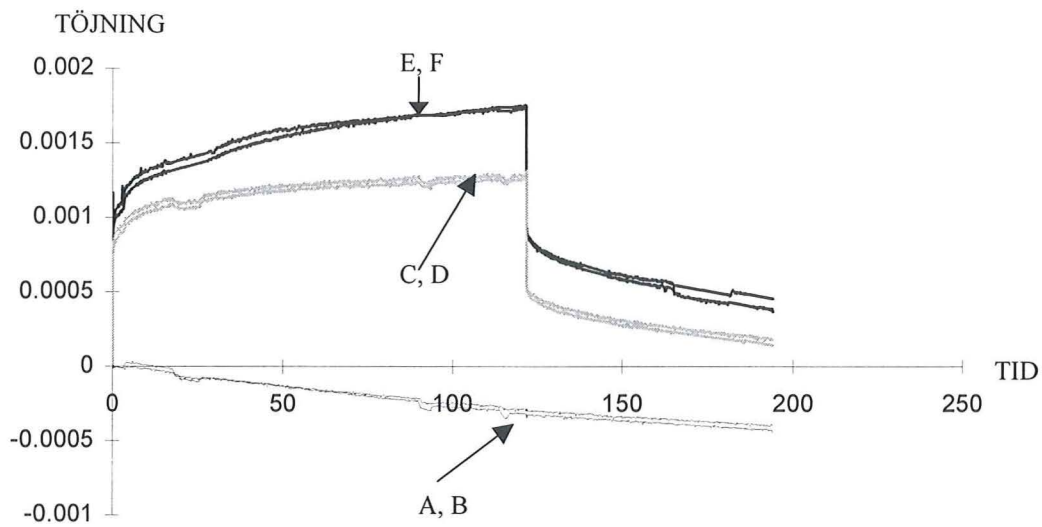
Denna gång uppstod synliga förändringar av provkropparna. De böjdes, kåda utsöndrades och det bildades små sprickor vid infästningarna.



Figur 23: Totala töjningsförloppet för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60°C och 60% RF.  
A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg

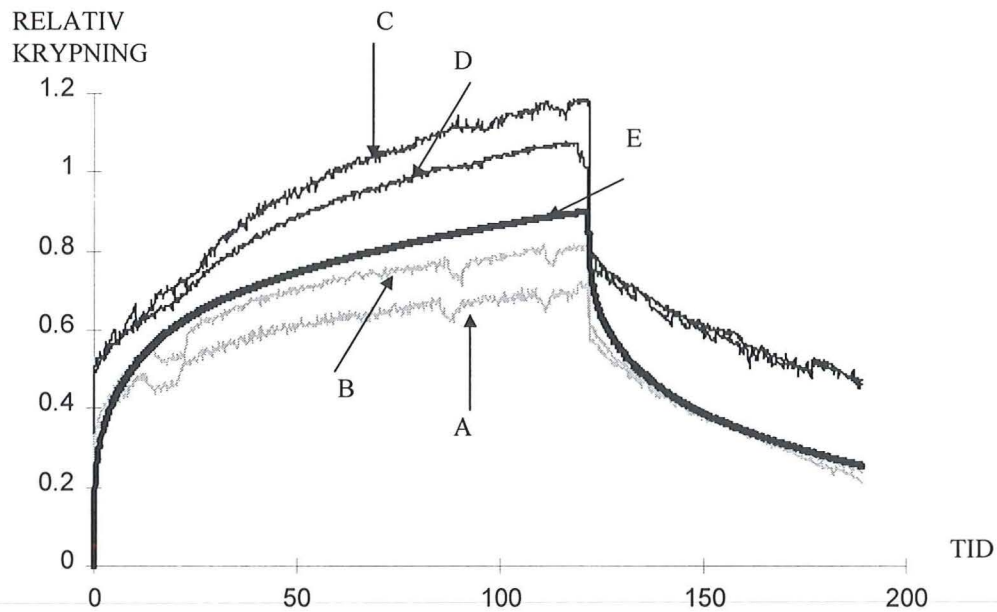


Liksom under försök utfört i 20°C och 50% RF visas i figur 24 ett diagram på enbart tiden under belastning för att förtydliga krypningsförloppet.



Figur 24: På- & avlastningsförlopp för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60°C och 60% RF.  
A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg

I figur 25 visas den relativa krypningen enligt ekvation (6) och kurvanpassningen med visko-elastisk modell enligt ekvation (9) och (10).



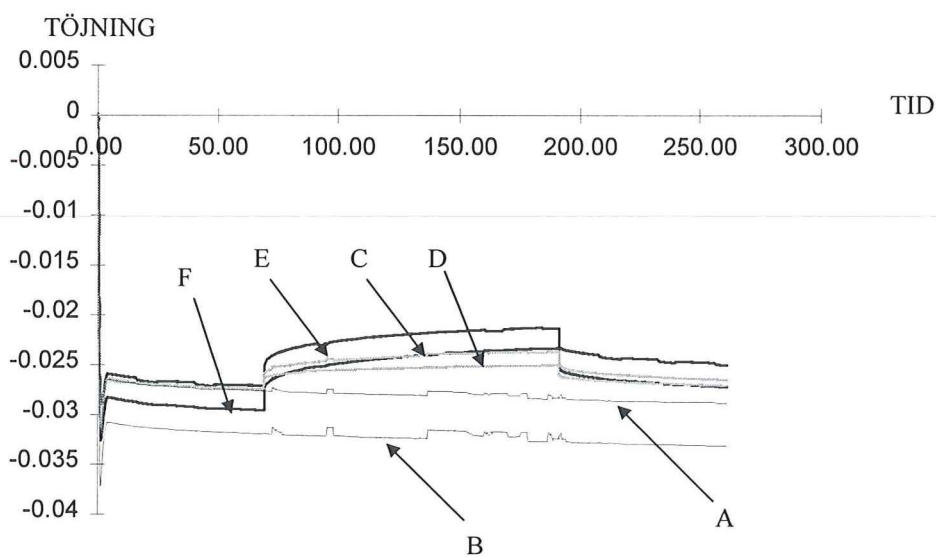
Figur 25: Relativ krypning för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60°C och 60% RF. A,B belastade med 10 kg, C,D belastade med 15 kg, E kurvanpassning

Till skillnad från försök i 20°C visar försök i 60°C att spänningsnivån har inverkan på den relativa krypningen.

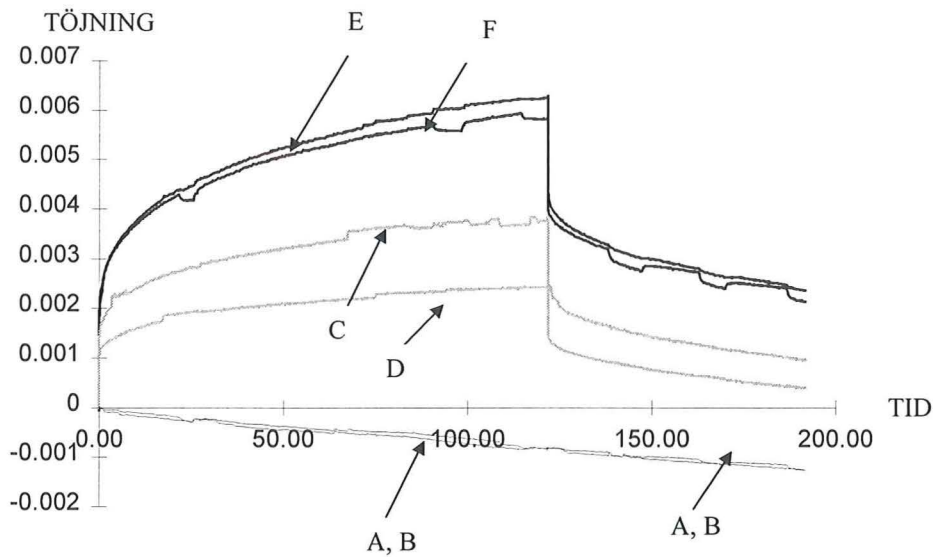
### 5.3 FÖRSÖK I KLIMATSKÅP VID 90 °C, 73 % RF

De obelastade provkropparna krympte med i medel 3,1% under försökets gång. Provkropparna belastade med 10 och 15 kg krympte i medel med 2,65 respektive 2,61%. Man kan därmed konstatera att en permanent deformation uppkommit vid belastningen av provkropparna. D.v.s. förloppet var plastiskt och den plastiska deformationen var mer än 10 ggr större än motsvarande deformation för försöket vid 60°C och 60% RF.

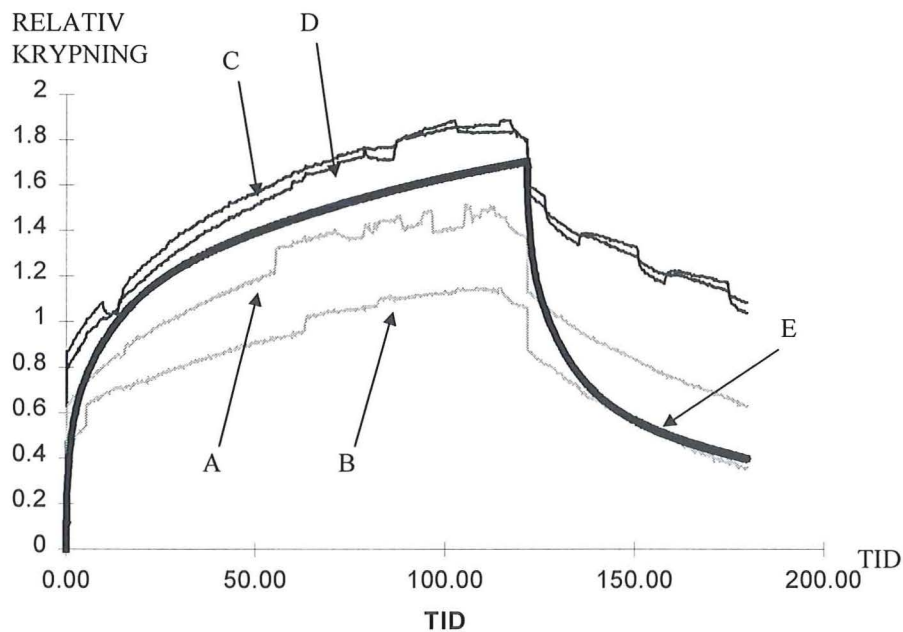
Vissa mindre utseendemässiga förändringar hos provkropparna uppstod, bl.a. bildades sprickor under infästningarna. Alltså inga större skillnader mot försök utfört i klimatskåp vid 60°C och 60% RF.



Figur 26: Totala töjningsförloppet för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 90 °C och 73% RF.  
A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg



Figur 27: På- och avlastningsförlopp för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 90°C och 73 % RF.  
A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg



Figur 28: Relativ krypning för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 90°C och 73% RF.  
A,B belastade med 10 kg, C,D belastade med 15 kg, E kurvanpassning

Även i detta försök har spänningsnivån en inverkan på den relativa krypningen.

Ytterligare ett försök utfördes i klimatskåp vid 95°C, 74% RF, men klimatskåpet klarade inte av denna inställning (se Appendix 3).



#### **5.4 FÖRSÖK I KLIMATSKÅP VID 60 °C, CYKLANDE 60 & 95 % RF**

Cyklande förlopp uppnår man genom t.ex. att upprepande på- och avlasta en provkropp. Det behöver inte nödvändigtvis vara en mekanisk last som lastas av och på, det kan även vara t.ex. klimatet (temperatur, relativ fuktighet) som varierar med en viss frekvens.

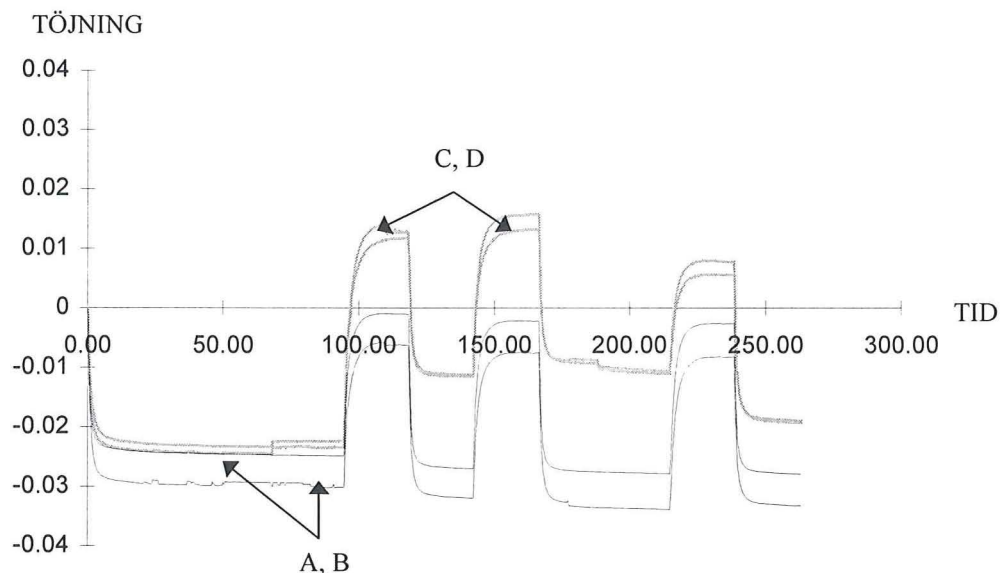
I vårt fall växades den relativa luftfuktigheten mellan 60 och 95°C i tre cykler om vardera mellan två och tre dygn.

För de provkroppar som också utsattes för spänning genom att belastas med en vikt (10 eller 15 kg) uppstod en tilläggstojning som kallas mekanisk sorption. Den uppstår vid fuktkvotsändring under samtidig belastning.

Under detta försök krympte de obelastade provkropparna betydligt mer än de belastade vilket verkar rimligt, d.v.s. en viss plastisk deformation kvarstod efter avlastningen. De obelastade provkropparna krympte med hela 3,06% medan de som belastades med 10 kg bara krympte 2,00%. Detta beror på att det efter avlastning återstod en plastisk deformation vilket man också tydligt kan se i figur 30. Provkropparna belastade med 15 kg tas ingen hänsyn till eftersom de brast redan i första cykeln.

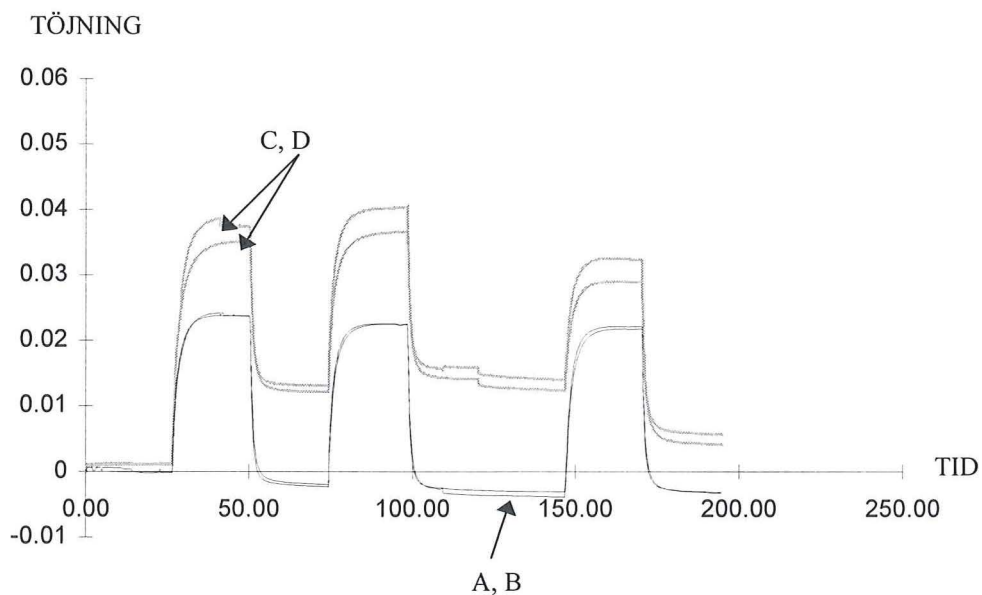
Ett antal synliga förändringar uppstod, bl.a. böjning samt sprickor under infästningarna på provkropparna. Bägge provkropparna belastade med 15 kg gick sönder. På den ena skedde brottet mellan givarna och på den andra utanför givarna. Provkroppen som brustit utanför givarna betedde sig i fortsättningen som en obelastad provkropp medan den andra inte gav några rimliga värden.

Försöket pågick även här i elva dygn, d.v.s. startades upp på måndag eftermiddag och avslutades på fredagseftermiddag veckan därpå.



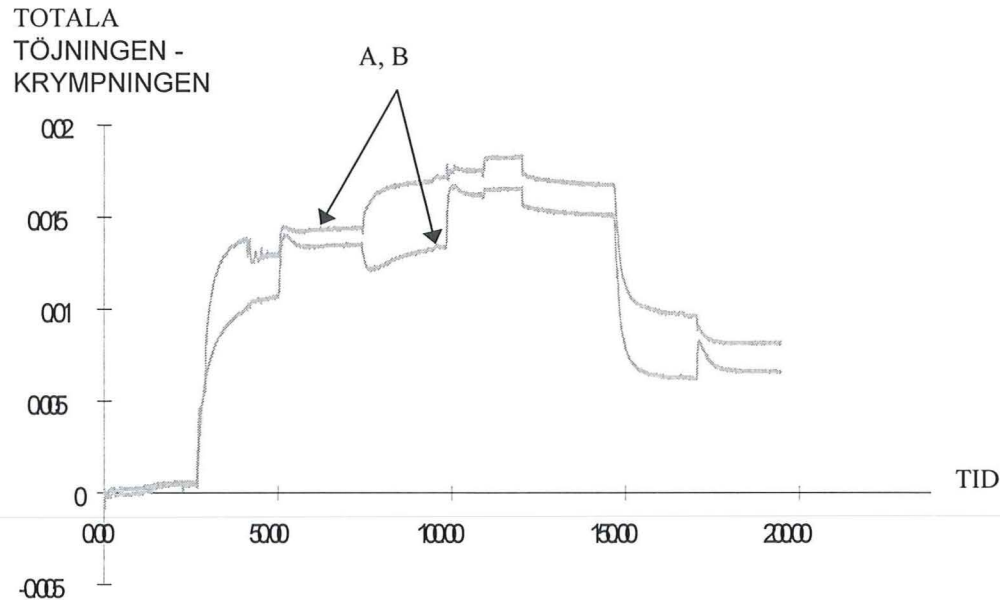
Figur 29: Totala töjningsförloppet för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60°C och den cyklade relativa luftfuktigheten 60-95%. A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg

Liksom under tidigare försök utförda i klimatskåpet gjorde vi ett diagram på enbart tiden under belastning för att förtydliga krypningen.



Figur 30: På- & avlastningsdiagram för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60°C och den cyklade relativa luftfuktigheten 60-95%. A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg

I figur 31 visas krympningskorrigerad töjning i belastade provkroppar d.v.s. den totala töjningen minus medelkrympningen i de obelastade provkropparna. Denna töjning visar tydligt effekten av mekanisk-sorption, jämför med kryptöjning i figur 24. Bidraget från mekanisk-sorption ger alltså 3 ggr så stor töjning jämfört med töjning i konstant klimat.



Figur 31: Den mekaniska sorptionen + krympningen för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 60°C och den cyklade relativa luftfuktigheten 60-95%.  
A,B belastade med 10 kg

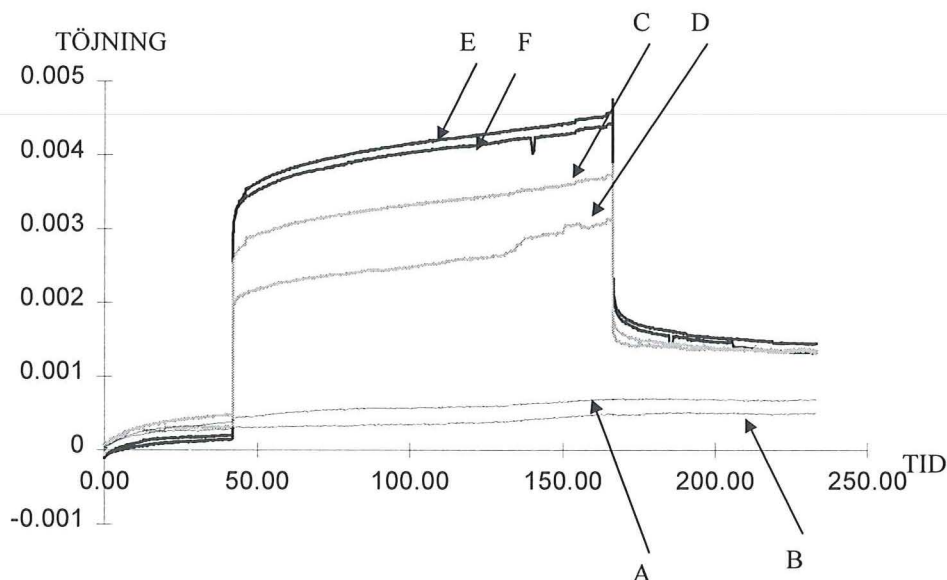
### 5.5 FÖRSÖK I VATTENBAD VID 20 °C

I detta försök krympte inte provkropparna utan utvidgades under hela förloppet (utom under den elastiska tillbakagången efter avlastningen). Detta p.g.a. att fuktkvoten i provkropparna ökade eftersom de placerades i ett vattenbad.

Helt följdenligt töjdes provkropparna belastade med 15 kg mest (0.138%), följda av provkropparna belastade med 10 kg (0.133%) och till sist de obelastade (0.059%). Denna gång medförde alltså belastningen en stor töjningsökning (mer än 100%). Detta visar att krympningen är kraftigt beroende av fuktkvoten.

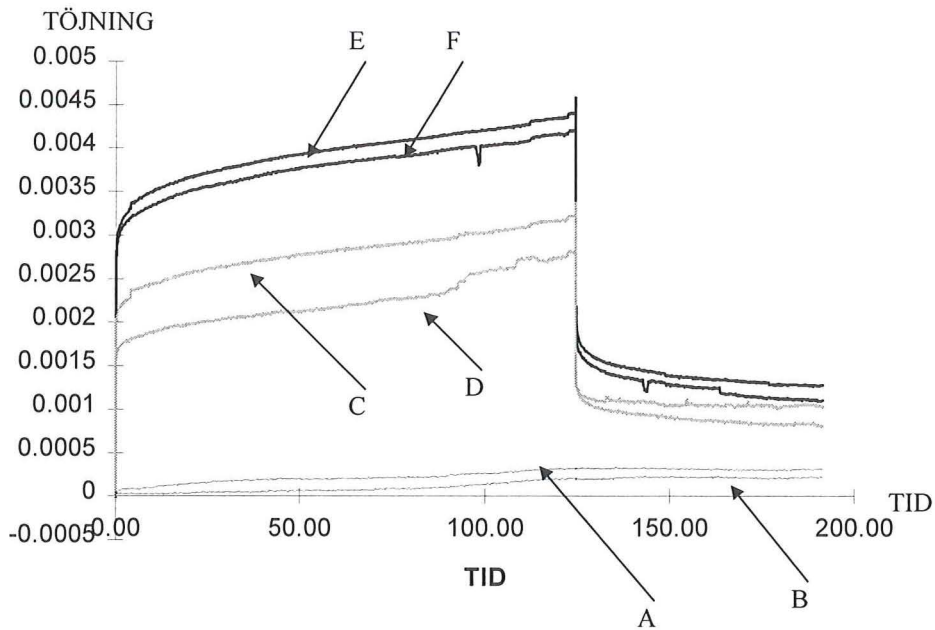
En stor plastisk deformation uppstod.

Provkropparna hade böjts men ingen sprickbildning hade uppstått. I badet hade det bildats en vit fällning, troligen pannsten (se Kapitel 3.2).

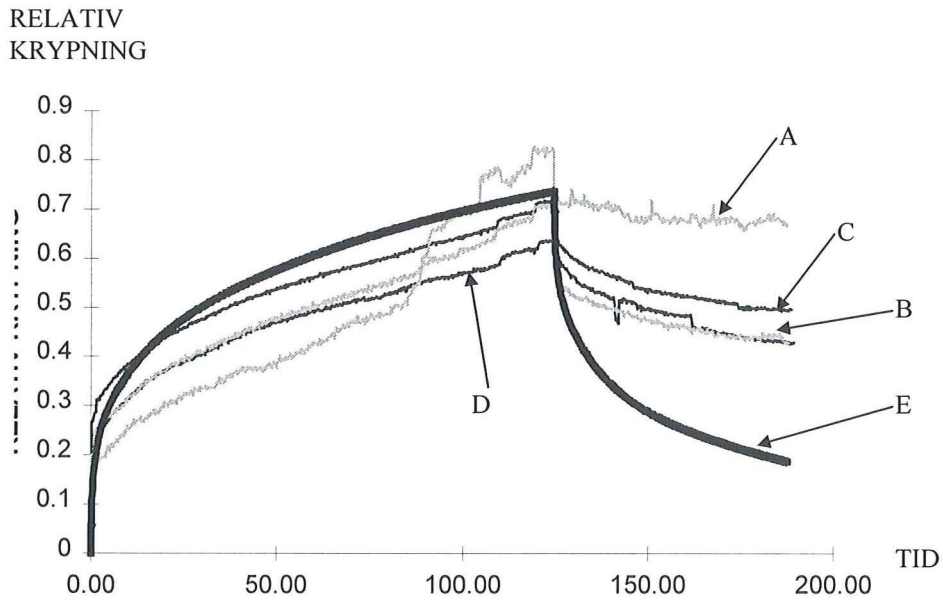


Figur 32: Totala töjningsförloppet för försök utfört i vattenbad vid temperaturen 20 °C. A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg





Figur 33: På- & avlastningsförlopp för försök utfört i vattenbad vid temperaturen 20°C. A,B obelastade, C,D belastade med 10 kg, E,F belastade med 15 kg



Figur 34: Relativ krypning för försök utfört i vattenbad vid temperaturen 20°C. A,B belastade med 10 kg, C,D belastade med 15 kg, E kurvanpassning

Liksom försök i 20°C och 50% RF verkar det som om spänningsnivån inte påverkar den relativa krypningen.

## 5.6 FÖRSÖK I VATTENBAD VID 60 °C

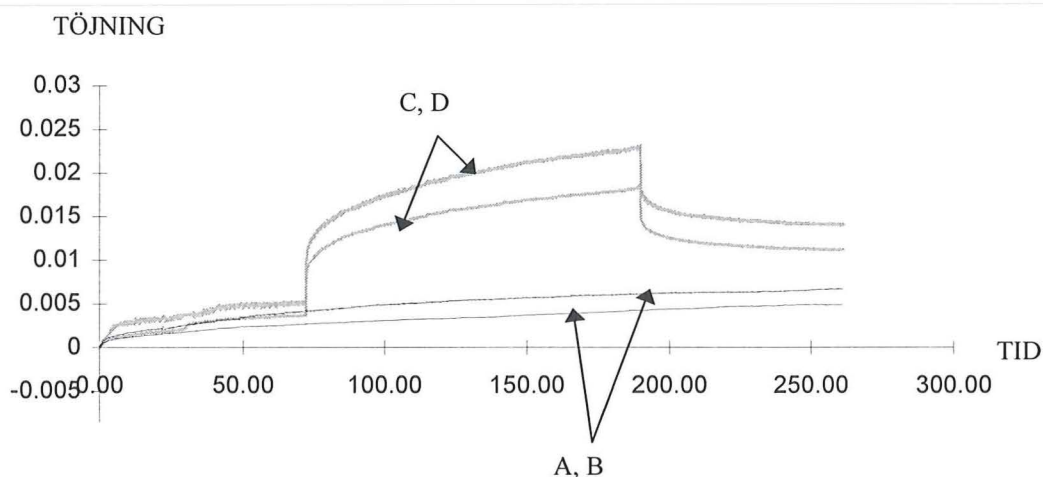
Liksom försöket i 20°C som utfördes i vattenbehållare utvidgades provkropparna även denna gång, men töjningen var p.g.a. den högre temperaturen betydligt större än vid försöket vid 20°C.

P.g.a. att bägge provkropparna belastade med 15 kg brast mellan givarna så går det inte att ta hänsyn till kurvorna. Provkropparna belastade med 10 kg töjdes i medel med 1,26% och de obelastade töjdes med 0,58%.

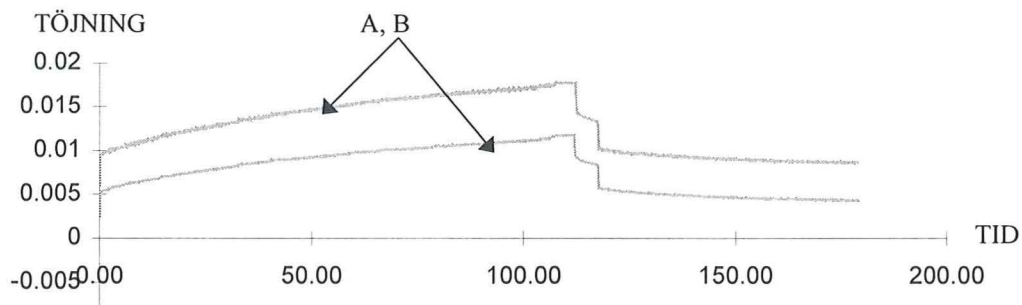
I jämförelse med försöket vid 20°C är detta en ökning med hela tio gånger d.v.s. 1000%. Detta bevisade att förlängningen hos en träkropp vid ett försök i vått tillstånd är mycket beroende av temperaturen.

Den plastiska deformationen ökade något i jämförelse med försöket i 20°C.

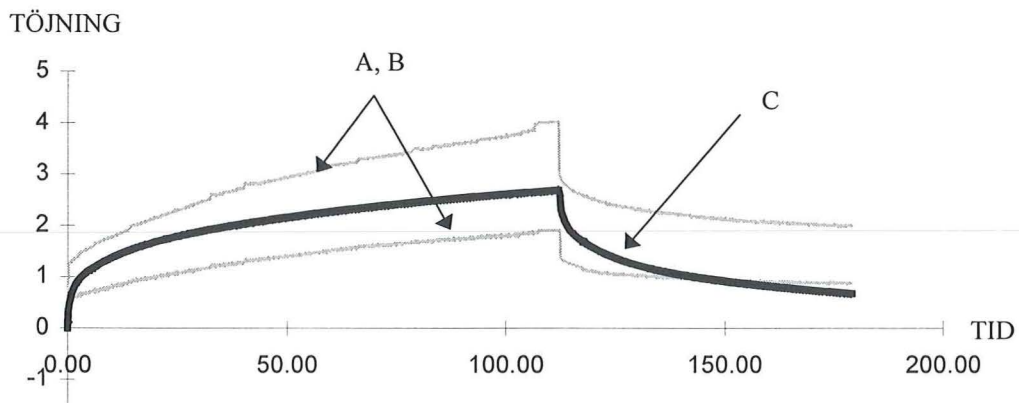
Förändringarna var efter detta försök ganska stora. Bl.a. hade provkropparna blivit betydligt mörkare och mjukare än under första våtförsöket samt också mer böjda.



Figur 35: Totala töjningsförloppet för försök utfört i vattenbad vid temperaturen 60 °C. A, B obelastade, C, D belastade med 10 kg



Figur 36: På- & avlastningsförloppet för försök utfört i vattenbad vid temperaturen 60 °C. A, B belastade med 10 kg



Figur 37: Relativ krypning för försök utfört i vattenbad vid temperaturen 60 °C. A, B belastade med 10 kg, C kurvanpassning

Här kan man inte dra någon slutsats om huruvida spänningsnivån påverkar den relativa krypningen, eftersom träproverna belastade med 15 kg gick till brott.

## 6 *FELKÄLLOR*

Här redovisas ett antal felkällor som kan ha haft en framträdande roll vid utvärderingen och resultaten av våra försök.

- På- och avlastning:* Skedde inte momentant och likartat för träproverna. Detta är praktiskt omöjligt att genomföra med mekaniska hjälpmedel.
- Klimatet:* Hölls inte konstant i vattenbadet då elpatronen hade ett temperaturomslagsintervall på fem grader. Avdunstningen var också ett stort problem då den var mycket stor.
- Belastning:* Skedde under alltför kort tid (11 dygn) för att egentligen se vad som hände på sikt.
- Träet:* Varierande egenskaper inom träet gav varierande resultat.
- Monteringsfas:* Skedde i klimatrum vid 20°C och 87% RF vilket gjorde att träet hann torka ut något innan det användes i försöken.
- Elektriska störningar:* Kan vara betydande då försöken utfördes i närheten av annan laborationsutrustning i större laborationshall. Det kan förklara de symmetriska och momentana störningarna som vi senare tog bort. Det kan även bero på magnetiska störningar.



## **7. TOLKNING AV RESULTAT**

I detta kapitel redovisas uppmätta resultat beroende på fuktkvot, obelastad eller belastad provkropp, kvarvarande deformationer och kurvanpassning. Slutligen presenteras en sammanställning i tabellform.

### **7.1 FUKTKVOT**

#### *Fuktkvot*

Vid samtliga försök utförda i klimatskåp ställde vi in temperatur och relativ fuktighet så att slutfuktkvoten i träprovkropparna skulle bli 9%. Samtliga, efter försökens slutförande, uträknade fuktkvoter avvek dock lite från denna fuktkvot. Närmast kom det cyklade förloppet på 8,57% och försöket i 60°C/60% RF på 9,07% (se Bilaga 1.5). En klar tendens för försöken i klimatskåpet var dock att slutfuktkvoten minskade med ökande temperatur och relativ fuktighet.

För försöken utförda i vattenbadet blev slutfuktkvoten betydligt högre för försöket i 60°C (= 152,28%) än för försöket i 20°C (=92,48%). En hypotes är att det antagligen beror på att när vattentemperaturen är högre kan vatten lättare tränga in i cellmellanrummen och på så sätt höja träets fuktkvot.

Värt att observera är att begynnelsefuktkvoten i det första försöket (20°C och 50% RF) är något lägre än de övriga (se Bilaga 1 – Begynnelsefuktkvot). Detta beror på att träprovkropparna monterades i rumsklimat och inte i klimatrumsrummet och de har därför hunnit att torka ut lite.

### **7.2 OBELASTADE PROVKNOPPAR**

#### *Krympning*

När man ser på krympningen ser man att skillnaden mellan de obelastade träproverna inte är stor mellan de olika försöken. Störst är den för inställningen 90°C/73% RF på 3,10% och minst för 60°C/60% RF på 2,68%. Skillnaden är dock marginell vilket verkar vara rimligt, eftersom det är svårt att hitta en fysikalisk förklaring varför krympningen skulle vara beroende av temperaturen.

#### *Svällning*

Töjningen för de obelastade provkropparna skiljer sig däremot kraftigt mellan de två försöken i vått tillstånd. I 20°C var töjningen 0,059%, vilket kan anses som försumbart, och i 60°C var den 0,58%, d.v.s. ca tio gånger större töjning. Här kan man dra slutsatsen att träet svällde i 60°C, men inte i 20°C.

### 7.3 BELASTADE PROVKROPPAR

För proverna som belastades uppstod en elastisk töjning (omedelbar) och en krypning (försenad).

#### *Elastisk töjning*

Vid jämförelse mellan försök i vått tillstånd och försök i torrt tillstånd med samma temperatur ser man att den elastiska töjningen är ungefär 2,8 gånger så stor för det våta försöket i 20°C som för det torra. Detta stämmer bra överens med [18] som anger ett värde på 3 gånger så stor elastisk töjning. För försök i 60°C var den elastiska töjningen runt nio (9,16) gånger så stor för försöket i vått tillstånd. Detta beror antagligen på att träet mjuknar och blir mer elastiskt vid ökande temperatur och fuktkvot.

För försöken i torrt tillstånd ser man en tydlig trend att den elastiska töjningen ökar med temperaturen och relativa fuktigheten. Exempelvis för provkropparna belastade med 10 kg ökar den elastiska töjningen från 0.062% för försök utfört vid 20°C/50% RF via 0.079% vid 60°C/60% RF till 0.125% vid 90°C/73% RF.

#### *Krypning*

Precis som den elastiska töjningen ökar även krypningen med temperatur och relativ fuktighet.

Försöken gav följande värden på krypningen:

Torr 20°C, 50% RF ca 0.04%

Torr 60°C, 60% RF ca 0.04%

Torr 90°C, 73% RF ca 0.15%

Våt 20°C ca 0.10%

Våt 60°C ca 0.70%

Intressant är också att jämföra försöket i 60°C i torrt tillstånd med det cyklade försöket eftersom temperaturen var densamma. Bl.a. kan man observera att för det cyklade förloppet är krypningen + mekanisk sorption ungefär 0,2 medan krypningen är 0,012 för 60°C torrt försök. Alltså kan man dra den slutsatsen att den totala krypningen för det cyklade förloppet blir 15 gånger så stor beroende på mekanisk-sorption (d.v.s. samtidigt last och fuktändring).

Detta kan jämföras med vad som redovisas i [1]. Där kom man fram till att den mekanisk-sorptiva effekten är mycket stor, ungefär fem gånger så stor som den elastiska deformationen, fastän lastnivån är låg och bara en enkel fuktighetscykel är gjord.

#### *Relativ krypning*

Med den relativa krypningen menas förhållandet mellan krypningen och den elastiska töjningen.

Tidigare konstaterades att både den elastiska töjningen och krypningen ökar med ökad temperatur och relativ fuktighet. Genom att studera den relativa krypningen lite närmare noterades även att krypningen ökar betydligt mer än den elastiska töjningen.

För de olika försöken erhöles följande relativa krypningar:

Torr 20°C, 50% RF ca 60%

Torr 60°C, 60% RF ca 90%

Torr 90°C, 73% RF ca 170%

Våt 20°C ca 75%

Våt 60°C ca 250%

Man kan härav utläsa att vid låg temperatur och fuktighet är den största delen av töjningen elastisk medan krypningen dominerar vid högre temperaturer och fuktigheter. Särskilt stor är ökningen av krypningen vid temperaturhöjning i vått tillstånd.

#### **7.4 KVARVARANDE DEFORMATION**

Den kvarvarande deformationen (=irreversibel krypning) var i samtliga fall större för belastningen med 15 kg än för 10 kg. För försöket i 20°C och 50% RF var deformationen helt återgående för 10 kg belastningen. För försöken i klimatskåpet ska nämnas att de obelastade provkropparna fortfarande krympte vid försökens avslutande och därför blev den kvarvarande deformationen mindre än den borde. För försöken i vattenbadet var förhållandet tvärtom, d.v.s. de obelastade provkropparna svällde fortfarande vid försökens slut och den kvarvarande deformationen blev större.

Dock bör man också beakta att försöken avbröts innan återgången av deformationen hade avstannat och därför kan man inte dra några slutsatser om att det skulle bli någon kvarvarande deformation överhuvudtaget.



## **7.5 KURVANPASSNING**

Anledningen till att vi gjorde en kurvanpassning var främst för att bevisa att kurvorna följer en regelbunden matematisk formel. Mellan de olika försöken varierades enbart A-värdena i formeln för kurvanpassningen. Att jämföra dessa kan därför vara intressant (se Tabell 7, kapitel 8.6).

### *Torra försök*

För de torra försöken är A-värden stigande med ökande temperatur både för pålastning och avlastning.

Skillnaden mellan de olika försöken i storleksordning är:

20°C/50% RF och 60°C/60% RF ca 1,5 gång

60°C/60% RF och 90°C/73% RF ca 2 gånger

### *Våta försök*

A-värdena är även här större för den högre temperaturen; mellan 3,75 och 3,87 gånger så stora både för pålastning och avlastning.

### *Temperaturen*

Vid jämförelse mellan de olika försöken med samma temperatur så är A-värdena högre för försöken i vått tillstånd.

Jämförelse mellan de olika försöken ger (ungefär samma för på och avlastning):

För försök i 20°C är A-värdena drygt 1 gång så stora för försök i vått tillstånd.

För försök i 60°C är A-värdena drygt 3 gånger så stora för försök i vått tillstånd.



## 7.6 SAMMANSTÄLLNING I TABELLFORM

Här sammanställs viktiga skillnader och likheter mellan de olika försöken i tabellform.

	Torr 20,50	Torr 60,60	Torr 90,73	Torkning	Våt 20	Våt 60
Fuktkvot (%) - slut	10.73	9.07	7.08	8.57	92.48	152.28
Krympning (Obel., %)	2.86	2.68	3.10	3.06	-0.059	-0.58
Krypning (10 kg, %)	0.04	0.04	0.15	X	0.10	0.70
Krypning (15 kg, %)	0.05	0.09	0.35	X	0.12	Brott
Elast. Töjn. (10 kg, %)	0.062	0.079	0.125	0.079	0.174	0.724
Elast. Töjn. (15 kg, %)	0.092	0.108	0.209	0.101	0.273	Brott

- *Tabell 6. Jämförelse mellan de olika försöken m.a.p fuktkvot, krympning, töjning och krypning*

Försök	$\tau$	Pålastning	Avlastning
<b>Torr 20°C/50% RF</b>	100	0,37	0,28
	10	0,16	0,15
	1	0,09	0,1
	0,1	0,09	0,05
<b>Torr 60°C/60% RF</b>	100	0,5	0,5
	10	0,25	0,2
	1	0,15	0,11
	0,1	0,15	0,06
<b>Torr 90°C/73% RF</b>	100	1	1
	10	0,5	0,6
	1	0,35	0,25
	0,1	0,15	0,15
<b>Våt 20°C</b>	100	0,5	0,35
	10	0,17	0,20
	1	0,13	0,10
	0,1	0,08	0,05
<b>Våt 60°C</b>	100	1,875	1,313
	10	0,638	0,75
	1	0,488	0,375
	0,1	0,3	0,188

- *Tabell 7. A-värden beroende på försök och  $\tau$ -värden*

### Anmärkning:

A-värdena för försök Våt 20°C är något avvikande då det var svårt att göra kurvanpassning för detta försöket vid avlastningen. Den elastiska återgången var för liten.

## 8 SLUTSATSER

I detta kapitel redovisas slutsatser främst gällande de uppställda hypoteserna i kapitel 1.

Från början var fuktkvoten runt 36% i träet när vi monterade provkropparna (se Bilaga 1.4 - Begynnelsefuktkvot). Provkropparna i försöken i torrt tillstånd krympte samtliga i den undersökta riktningen (tangentiell riktning) vilket var väntat, eftersom fuktkvoten i träet sjönk till ungefär 9%. För försöken i vått tillstånd ökade fuktkvoten i träet till ca 92% för försöket i 20°C och till ca 152% för försöket i 60°C.

Omedelbart efter belastning skedde en elastisk töjning som utgjorde en stor del av den totala töjningen vid "milda klimatförhållanden", d.v.s. vid låg temperatur och låg relativ luftfuktighet. Vid hög temperatur och hög relativ luftfuktighet dominerade istället den försenade töjningen, den så kallade krypningen. Denna gick delvis tillbaka efter avlastning. Hur mycket som gick tillbaka berodde på rådande klimatförhållanden. Hög temperatur och relativ luftfuktighet medförde en stor bestående töjningsförändring.

Den elastiska töjningen ökade med temperatur och relativ luftfuktighet, dock ökade krypningen mer, därav krypningens dominans av den totala töjningen vid varma och fuktiga förhållanden.

Vid fuktändring under belastning observerades en förstörad deformation hos provkropparna, s.k. mekanisk-sorption.

Den elastiska töjningen vid 20°C är ungefär tre gånger så stor för försöket i vått tillstånd i jämförelse med torrt tillstånd. Vid 60°C är förhållandet ungefär nio gånger. Denna ökning beror antagligen på att träet mjuknar och blir mer elastiskt vid ökande temperatur och fuktkvot.

Som väntat medförde större belastning en större töjning.

Provkropparna som varit i vattnet uppvisade större synliga förändringar än de som varit i klimatskåpet. Exempel på förändringar var t ex att provkropparna mörknat och böjts och att det hade bildats en vit fällning (så kallad pannsten). En annan förändring som bara uppstod vid försöken i klimatskåpet var att det bildades sprickor främst under infästningarna, antagligen beroende på att träet torkade (fuktkvoten minskade).

Det enda av våra hypoteser som inte stämde var att proverna som utsattes för den växlande relativa luftfuktigheten inte utmattades. Mellan varje cykel minskade istället töjningen.

**9 FÖRSLAG TILL FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR**

- Försök vid kompletterande temperaturer och relativa luftfuktigheter. Fler försök med cyklade förlopp skulle vara önskvärt för att kunna dra några mer precisa slutsatser.
- Till att börja med skulle det vara bra att utföra det våta försöket vid 90°C som vi inte lyckades med p.g.a. en alltför stor vattenavdunstning. För att klara av detta behövs konstrueras ett tättslutande lock till den av oss konstruerade behållaren eller på annat sätt lösa avdunstningsproblemet. Lämpligen skulle detta utföras i ett genomskinligt material så att man kan okulärt observera proverna utan att lyfta på locket.
- Använda sig av mindre belastning i försöken med hög fuktkvot i träproverna. Vi belastade med 10 respektive 15 kg och träproverna belastade med 15 kg gick vid ett flertal tillfällen sönder, därför rekommenderar vi att i dessa fall istället belasta med 5 och 10 kg.
- Vidare skulle det varit intressant att se om träproverna uppför sig lika om de istället undersöks i radiell riktning eller i träets längdriktning. Ytterligare försök med prover tagna i splinten istället för i kärnan och högre upp i trästammen i varierande träslag skulle ge kompletterande information för en fullständig analys.



**10 ORDFÖRKLARINGAR OCH FÖRKORTNINGAR**

Anisotropi	Olika egenskaper i olika riktningar.
Cyklande förlopp	Uppnås genom t ex att upprepande på- och avlasta en provkropp.
Diffusion	Innebär att vattenmolekylerna rör sig i riktning mot avtagande koncentration.
Elastisk töjning	Ögonblicklig töjning vid belastning.
Fibermättnadspunkt	Maximal fuktighetsupptagning i cellväggen.
Fibriller	Trådliknande element av cellulosa molekyler som bygger upp sekundärväggarna.
Fuktkvot	Hur stor andel av träets vikt som är vatten.
Hygro-mekanisk	Relation mellan ett materials mekaniska beteende (egenskaper) och dess fuktillstånd.
Hygroskopisk	Förmågan att ta upp vatten(ånga) från luften.
Hysteres	Fasfördröjning av magnetiseringen av ett ferromagnetiskt material (t.ex. järn) p.g.a. variationer i det magnetiska fältet.
Induktans	Fenomenet att en spänning uppstår (induceras) i en elektrisk ledare som antingen själv rör sig i ett statiskt magnetfält eller befinner sig i ett magnetfält av varierande styrka.
Kapillärkraft	Fenomen som beror på att attraktionskraften mellan cellväggens molekyler och vattenmolekyler är större än dem mellan vattenmolekylerna. Cellväggen strax ovanför vattenytan strävar att dra vattenmolekyler uppåt, och dessa drar i sin tur med sig underliggande molekyler. Vattnet stiger tills dess att lyftkraften motsvara det uppstigna vattnets tyngd.
Krympning	Volymminskning som sker när vatten avlägsnas från cellväggarna.
Krypning	En tidsfördröjd deformation som uppträder hos ett material under konstant last.



KTR	Prov taget i kärnved vid roten utsågat i tangentiell riktning.
Lägesgivare	Omvandlar en positionsförändring till en elektrisk signal (=Transducer)
Mekanisk sorption	Hygro-mekaniskt beteende som observeras när materialet utsätts för last (spänning) samtidigt som dess fukttillstånd ändras.
Permeabilitet	Genomsläpplighet (inom fysik speciellt olika ämnens förmåga att släppa igenom ett magnetiskt flöde).
Plastisk töjning	Töjning som ej återgår vid avlastning, d.v.s. irreversibel töjning.
Relativ fuktighet, RF	Förhållandet mellan den aktuella luftfuktigheten och den maximala vid rådande temperatur.
Relativ krypning	(Total töjning – elastisk töjning)/elastisk töjning.
Vattenmättnadspunkt	Porerna är fyllda med vatten och cellväggarna innehåller maximalt fuktighet.
Visko-elastisk töjning	Tidsfördröjd reversibel töjning.
Ångtryck	Vattenångans tryck.

**LITTERATURFÖRTECKNING**

- [1] Svensson, Staffan *Internal Stress in Wood Caused by Climate Variations*  
Tekniska Högskolan i Lund  
Avd. för Bärande Konstruktioner, Rapport TVBK-1013
- [2] Kompendium från "Institut für Baustatik und Konstruktion" *Holzbau*  
Abteilung für Bauingenieurwesen  
Eidgenössische Technische Hochschule  
Zürich 1997
- [3] Kompendium från bärande konstruktioner *Träkonstruktioner*  
Lunds Tekniska Högskola  
Lund 1995
- [4] Bergström, Sven G. *Kompendium i byggnadsmaterial, allmän Kurs för V, del III*  
Byggnadsmaterial Lunds Tekniska Högskola  
Lund 1993
- [5] Dinwoodie, J.M *TIMBER its nature and behaviour*  
Van Nostand Reinhold Company  
London, England 1981
- [6] Esping, Björn *Trätorkning 1a, Grunder i torkning*  
Träteknik  
Göteborg 1992
- [7] Kompendium från "Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion" *Holz und Holzwerkstoffe*  
Abteilung für Bauingenieurwesen  
Eidgenössische Technische Hochschule  
Zürich 1997
- [8] Esping, Björn *Handbok i virkestorkning*  
Svenska Träforskningsinstitutet  
Stockholm 1977
- [9] Svensson, Staffan *Hygro-Mechanical Behaviour of Drying Wood*  
Tekniska Högskolan i Lund  
Avd. för Bärande Konstruktioner, Rapport TVBK-1010  
Lund 1995

- [10] Bodig, J. Ph.D. och Jayne, B.A. Ph.D *Mechanics of Wood and Wood Composites*  
Van Nostand Reinhold Company  
New York, USA 1982
- [11] Schlumberger Industries *Designer's Handbook*  
Transducer Division  
Bognor Regis 1992
- [12] Herceg, Edward E. *Handbook of Measurement and Control*  
Schaevitz Engineering  
Pennsauken, N.J 1976
- [13] Teknisk handledning *Installation, drift och skötsel- Elpatron*  
Värmebaronen  
Kristianstad 1995
- [14] Halett/Laytner *4<sup>th</sup> IUFRO International Wood Drying Conference "Improving Wood Drying Technology"*  
New Zealand Forest Research Institute  
Limited in association with Electricity  
Corporation of New Zealand Limited  
Rotorua, New Zealand 1994
- [15] Salin, Jarl-Gunnar *Virkestorkningens fysik*  
Kompendium, Trätek
- [16] Hanhijärvi, Antti *Perpendicular-to-grain creep of Finnish softwoods in high temperature drying conditions. Experiments and modelling in temperature range 95-125 °C*  
Technical Research Centre of Finland  
Espoo, Finland 1997
- [17] Cloutier, A., Fortin, Y och Gosselin, R *5<sup>th</sup> IUFRO International Wood Drying Conference "Quality Wood Drying Through Process Modelling and Novel Technologies"*  
Forintek Canada Corp., Université Laval  
Quebec City, Canada, 1996
- [18] Morén, Tom & Sehlstedt-Persson, Margot *Högtemperaturtorkning av byggnadsvirke*  
Tekniska Högskolan i Luleå, Institutionen  
i Skellefteå, Teknisk rapport 1990:27T  
Skellefteå 1990

- [19] Olsson, Charlotta *Högtemperaturkonditionering av svensk furu och gran*  
Tekniska Högskolan i Luleå, Institutionen  
i Skellefteå, Teknisk rapport 1992:22T  
Skellefteå 1992
- [20] Siimes, F.E. *VTT Report 84*  
Helsinki 1967



**INNEHÅLLSFÖRTECKNING –APPENDIX & BILAGOR**

<b>Appendix 1.</b>	Impregneringsskillnader mellan gran och furu	
<b>Appendix 2.</b>	Elektriska fuktkvotsmätare	
<b>Appendix 3.</b>	Försök i klimatskåp vid 95°C, 74% RF	
<b>Bilaga 1.</b>	<i>Sammanställning av in- &amp; utgångsdata</i>	
	Prov Torr 20°C/50% RF, 60°C/60% RF och 90°C/73% RF	1.1
	Prov Torr 95°C/74% RF och Torkning	1.2
	Prov Våt 20°C och 60°C	1.3
	Begynnelsefuktkvoter	1.4
	Slutfuktkvoter	1.5
<b>Bilaga 2.</b>	<i>Konstruktionsberäkning</i>	
	Program	2.1
	Resultat	2.2
	Odeformerat och deformerat tillstånd	2.3
<b>Bilaga 3.</b>	<i>Konstruktionsritningar</i>	
	Materiallista	3.1
	Ritningar: 3-D Skiss	3.2
	Långsida	3.3
	Vy – ovanifrån	3.4
	Botten	3.5
	Bakre gavel	3.6
	Främre gavel	3.7
	Plåt	3.8

### ***IMPREGNERINGSSKILLNADER MELLAN GRAN OCH FURU***

Skillnaden mellan dessa är att det är nästan uteslutande furu (splintved) som av ekonomiska och tekniska skäl impregneras. Inträngningen i kärnveden inskränker sig normalt till några få millimeter. Gran kan inte impregneras med konventionella tryckimpregnerings-metoder, om samma krav på inträngning och upptagning av träskyddsmedel ställs som för furusplint. Däremot kan gran under vissa förhållande impregneras med diffusionsprocesser. Andra olikheter mellan gran och furu kan man anse som försumbara, när man endast ser träslagen som konstruktionsmaterial.

## ELEKTRISKA FUKTKVOTSMÄTARE

Det finns en mängd olika metoder enligt [8] för att mäta fuktkvoten:

1. Resistansmätning, likström
2. Resistansmätning, växelström
3. Kapacitansmätning
4. Torrviktsmetoden
5. Mikrovågsmetoden
6. IR-mätning
7. Gammastrålningsmetoden
8. Neutronstrålningsmetoden
9. NMR-metoden (Nuclear Magnetic Resonance)
10. Ångbalansmätning
11. Destillationsmetoden

De fyra första metoderna är de som är vanligaste, därför beskrivs de här lite mer noggrant.

- Resistansmätning, likström

Denna metod är den vanligaste inom sågverksindustrin. Fuktkvotsbestämningen bygger på att det finns ett samband (se ekvation 1 och 2) mellan virkets fuktkvot och dess resistans vid likström (se Bild 2):

$$R = \frac{1}{\pi \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{z} \cdot \ln\left(\left(d \cdot \sqrt{8d^2}\right) + \frac{4x^2}{a \cdot 2 \cdot x}\right) \quad \text{för } d, x \gg a \quad (1)$$

$$R = R = \frac{1}{\pi \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{z} \cdot \ln\left(\frac{d}{a}\right) \quad \text{för } x \gg a \quad (2)$$

,där

- R = Resistans
- $\sigma$  = Konduktivitet (vid  $u=10\%$  är  $\sigma = 10^{-9,5}$  och vid  $u=20\%$  är  $\sigma = 10^{-7,5}$  l/ohm cm)
- z = Elektrodens längd
- d = Elektrodavstånd (se Bild 1)
- a = Elektrodradie
- x = Elektrodavstånd från sidoyta gränsande till luft (se Bild 1)

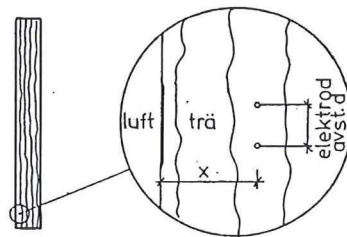


Bild 1. Definition av elektrodavstånd enligt ekvation (1) och (2) [8].

- Resistansmätning, växelström

Bygger på att det finns ett samband mellan virkets fuktkvot och dess resistans vid växelström (se Bild 2). Ekvation (1) och (2) används även här.

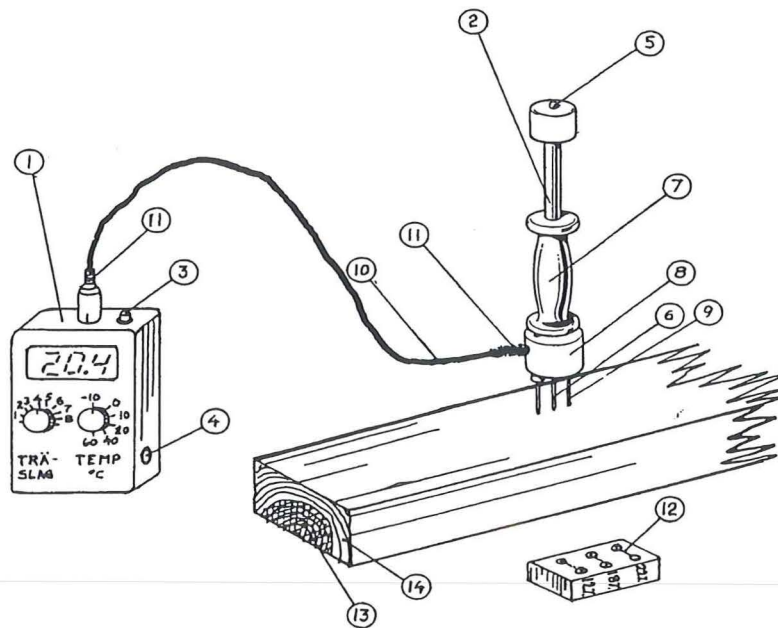


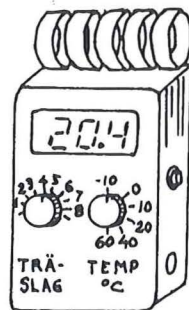
Bild 2. Resistansfuktkvotmätare [8]

- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. Mätinstrument                             | 7. Hammare                  |
| 2. Hammarelektrod                            | 8. Isolering                |
| 3. Strömställare                             | 9. Elektroder               |
| 4. Trimskruv                                 | 10. Dubbelledare            |
| 5. Stav som anger mätdjup                    | 11. Avlastare för mätkabeln |
| 6. Stav 5 ligger an med fjäderkraft mot ytan | 12. Kalibrator              |



- Kapacitansmätning

Bygger på att det finns ett samband mellan virkets kapacitans  $C$  (vanligen för frekvenser mellan 2 och 100 MHz, men frekvenser upp till 10 GHz används) och dess fuktkvot (se ekvation 3). Denna metod skadar inte träet (se Bild 3), men noggrannheten är sämre än för de andra två.



*Bild 3. Kapacitiv fuktkvotsmätare. Mätning sker genom att anbringa stål fjädrarna mot träet. Metoden är skonsam mot träet, men ger ganska dålig mät noggrannhet [8].*

$$C = \frac{A \cdot \epsilon'_0}{d} \cdot k = \frac{C_0 \cdot \epsilon'_0}{\epsilon_0} \quad (3)$$

där

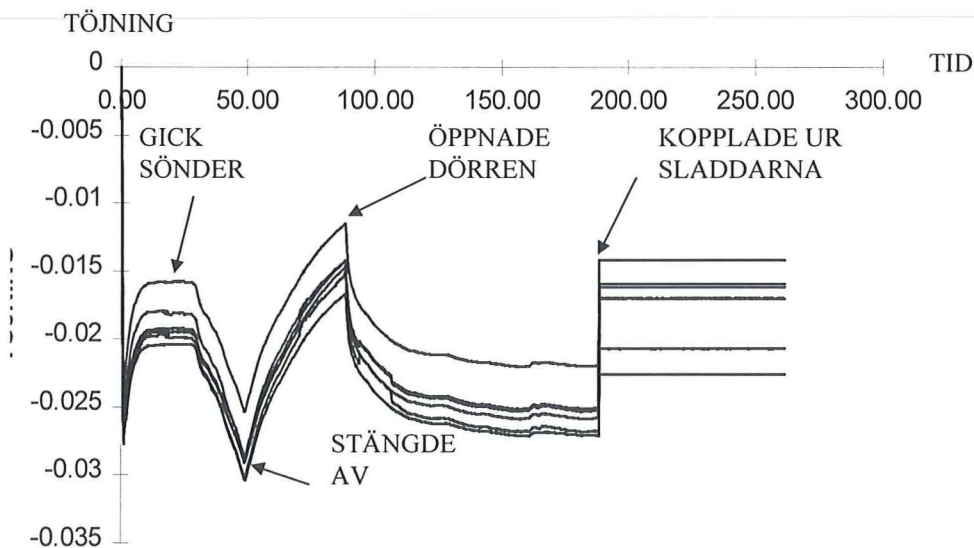
- $A$  = Plattornas area
- $\epsilon_0$  = Dielekticitetskonstant för vakuum
- $\epsilon'_0$  = Dielekticitetskonstant för trä
- $d$  = Avstånd mellan plattorna
- $k$  = Konstant

- Torrviktsmetoden

Detta är det mest noggranna metoden av de fyra beskrivna metoderna och definitionen på fuktkvot bygger faktiskt på denna. Det vill säga att fuktkvoten i träet definieras som den viktminskning som träet genomgår vid torkning till konstant vikt i en ugn (eller torkskåp) vid  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , dividerat med den vikt som träet får efter torkningen. Torkningen ska fortgå tills träet inte minskar mer 0,1% i vikt mellan två vägningar med en timmes mellanrum. Viktminskningen beror till störst del av vattenbortgång men även andra flyktiga ämnen som kåda bortgår (dock i betydligt mindre omfattning).

### FÖRSÖK I KLIMATSKÅP VID 95 °C, 74% RF

Klimatskåpet klarade inte av kombinationen av denna höga temperatur och fuktighet. Genom att observera töjningsförloppet kan man utläsa att provkropparna började att krympa väldigt snabbt p.g.a. att vi satte in provkropparna i skåpet innan fuktigheten nått 74%, men då temperaturen redan nått 95°C. När sen den relativa fuktigheten ökade började provkropparna att utvidga sig. Skåpet klarar sen inte belastningen av kombinationen av hög temperatur och relativ fuktighet och den relativa fuktigheten börjar att minska och provkropparna börjar således åter att krympa. Vi insåg att loppet var förlorat och stängde av torkskåpet. Eftersom fuktigheten redan var nere på en låg nivå var det bara temperaturen som nu började att sjunka och detta medförde att fuktkvoten i träet ökade och provkropparna började att utvidga sig. Strax innan 100 timmar hade gått sen försökets början öppnade vi dörren och klimatet i skåpet ställde nu in sig efter klimatet i laborationshallen. Efter ytterligare ca 100 timmar drog vi ut sladdarna mellan datorn och givarna och därav de raka och fina linjerna. När ni nu läst denna roliga historia blir ni säkert nyfikna på att se den fina kurvan som vi satt in nedan.



Figur 13: Totala töjningsförloppet för försök utfört i klimatskåp vid temperaturen 95 °C och 74% RF.  
Vi hann inte belasta provkropparna innan skåpet "pajade" och därför representerar alla kurvorna obelastade provkroppar.

**SAMMANSTÄLLNING AV IN- & UTGÅNGSDATA****PROV TORR, 20°C, 50% RF**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER							EFTERVIKT			EFTER	
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
12-4	1,2	32,23	657,80	9,95	19,80	57,34	56,38	15	652,58	9,82	19,27	55,91	55,65
12-5	3,4	32,17	657,32	10,05	19,82	56,87	56,32	10	652,02	10,16	19,26	55,50	55,64
12-6	5,6	32,20	659,74	9,92	19,74	56,62	56,15	10	654,66	10,05	19,52	55,28	55,48
12-7	7,8	32,26	662,62	9,99	20,01	56,67	56,47	Obel.	657,30	9,97	19,65	55,34	55,83
12-8	9,10	32,49	656,86	10,00	20,00	56,45	55,92	15	651,60	9,96	19,64	55,11	55,31
12-9	11,12	32,26	700,94	10,00	20,10	56,86	56,67	Obel.	695,58	10,00	19,46	55,41	55,92

**PROV TORR, 60°C, 60% RF**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER							EFTERVIKT			EFTER	
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
12-10	1,2	32,60	658,08	9,85	19,79	56,66	56,08	Obel.	651,86	9,89	19,38	54,81	54,97
12-11	3,4	33,11	658,08	9,87	19,94	56,40	56,86	15	651,54	9,94	19,51	54,52	55,27
12-12	5,6	33,03	660,48	9,83	20,14	57,00	56,45	Obel.	653,96	9,82	19,62	54,97	54,84
12-13	7,8	33,28	663,38	9,94	20,21	56,78	56,33	10	656,82	10,04	19,61	54,77	54,93
12-14	9,10	33,34	657,80	10,01	20,35	57,00	56,45	10	651,22	10,00	19,96	54,92	54,62
12-15	11,12	33,58	702,00	10,06	20,13	56,72	56,45	15	695,46	9,99	19,71	55,15	54,23

**PROV TORR, 90°C, 73% RF**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER							EFTERVIKT			EFTER	
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
13-14	1-2	32,91	658,36	9,73	19,93	56,95	56,86	10	651,62	9,64	19,16	54,93	53,84
13-15	3-4	33,00	657,90	9,88	19,92	56,73	56,57	10	650,82	9,81	19,21	54,49	53,94
13-16	5-6	33,15	660,50	9,87	19,86	57,00	56,28	15	653,30	9,94	19,04	54,58	53,88
13-17	7-8	33,40	663,70	9,89	20,00	56,72	56,82	Obel.	656,64	10,10	19,19	54,01	53,61
13-18	9-10	33,37	657,76	9,91	20,05	56,90	56,51	15	650,74	9,90	19,18	54,12	54,75
16-11	11-12	33,75	702,24	9,97	20,28	56,53	56,69	Obel.	695,04	10,02	19,60	54,10	54,19



**PROV TORR, 95°C, 74% RF**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER							EFTERVIKT			EFTER	
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
13-1	1-2	33,45	659,10	9,92	20,28	57,28	56,25	S	Ö	N	D	E	R
13-2	3-4	33,44	658,54	9,95	20,01	57,19	57,21	S	Ö	N	D	E	R
13-3	5-6	33,16	660,70	9,96	20,10	56,84	56,25	S	Ö	N	D	E	R
13-4	7-8	32,98	663,18	9,84	20,02	56,50	56,54	S	Ö	N	D	E	R
13-5	9-10	33,10	657,62	9,87	19,82	56,79	56,36	S	Ö	N	D	E	R
13-6	11-12	33,10	701,74	9,88	19,95	56,34	56,35	S	Ö	N	D	E	R

**PROV TORKNING, 60-95-60% RF, 60°C**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER							EFTERVIKT			EFTER	
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
15-2	1,2	33,81	659,18	9,96	20,08	56,34	56,34	15	651,60	10,07	19,43	Brott	Brott
15-3	3,4	33,84	658,66	9,90	20,10	56,85	56,43	10	651,58	10,05	19,16	54,67	54,59
15-4	5,6	33,80	661,16	9,94	20,06	56,81	56,16	10	654,26	9,95	19,09	55,19	53,93
15-5	7,8	33,77	663,86	9,95	20,22	56,68	56,67	15	656,84	9,91	19,39	54,56	54,21
15-6	9,10	33,80	658,22	9,94	20,16	57,13	56,18	Obel.	651,28	9,92	19,42	54,43	54,39
15-7	11,12	33,84	702,30	9,95	20,25	56,59	56,71	Obel.	695,28	9,97	19,50	53,85	54,57



**PROV VÅT, 20°C**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER						EFTERVIKT			EFTER		
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
14-1	13,14	33,88	704,52	9,76	20,02	56,98	56,41	15	730,38	9,94	20,14	57,75	56,55
14-2	15,16	33,83	703,62	9,85	20,26	56,70	56,19	15	728,10	10,06	20,28	57,26	56,92
14-3	17,18	33,70	703,22	9,81	20,18	56,73	56,70	10	727,46	10,00	20,25	56,74	56,67
14-4	19,20	34,00	657,72	9,80	20,30	56,74	56,27	10	658,06	10,05	20,26	57,10	56,34
14-5	21,22	34,10	705,90	9,85	20,40	57,05	56,38	Obel.	727,96	10,09	20,27	57,58	56,67
15-1	23,24	34,04	706,60	9,86	20,09	56,55	56,63	Obel.	731,92	10,03	20,28	56,74	56,95

**PROV VÅT, 60°C**

PROVKROPP		GRÖNVIKTER						EFTERVIKT			EFTER		
NR	Givarnr.	Provkropp	Totalt	t före	b före	L udda giv.	L jämn giv.	Laster	Totalt	t efter	b efter	L udda giv.	L jämn giv.
13-7	13,14	32,63	703,62	9,92	19,98	56,70	55,94	10	746,66	10,15	19,87	57,77	57,11
13-8	15,16	33,08	703,48	9,92	20,10	56,76	56,49	15	746,84	10,20	19,94	Brott	Brott
13-13	17,18	33,22	703,20	9,86	19,72	56,86	56,56	15	746,10	10,15	19,75	Brott	Brott
13-10	19,20	32,94	658,52	9,77	19,79	56,90	56,13	10	699,70	10,09	19,71	57,95	56,87
13-11	21,22	33,09	705,28	9,87	20,00	57,18	56,75	Obel.	741,44	10,16	19,78	57,76	57,52
13-12	23,24	33,06	706,20	9,82	20,14	56,38	57,06	Obel.	744,24	10,12	19,74	56,97	57,19

**BEGYNNELSEFUKTKVOTER****PROV TORR**

provkrp	vikt	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
12-4	32,23	24,21	33,13
12-5	32,17	24,19	32,99
12-6	32,20	24,21	33,00
12-7	32,26	24,23	33,14
12-8	32,49	24,14	34,59
12-9	32,26	24,09	33,91
<i>medelv.:</i>			33,46

**PROV TORKNING**

provkrp	vikt	vikt	fuktkvot
15-2	33,81	24,54	37,78
15-3	33,84	24,45	38,40
15-4	33,80	24,48	38,07
15-5	33,77	24,57	37,44
15-6	33,80	24,53	37,79
15-7	33,84	24,62	37,45
<i>medelv.:</i>			37,82

**PROV VÅT**

provkrp	vikt	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
14-1	33,88	25,12	34,87
14-2	33,83	24,87	36,03
14-3	33,70	24,72	36,33
14-4	34,00	24,91	36,49
14-5	34,10	25,00	36,40
15-1	34,04	24,88	36,82
<i>medelv.:</i>			36,16

provkrp	vikt	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
12-10	32,60	24,03	35,66
12-11	33,11	24,20	36,82
12-12	33,03	24,16	36,71
12-13	33,28	24,16	37,75
12-14	33,34	24,45	36,36
12-15	33,58	24,37	37,79
<i>medelv.:</i>			36,85

provkrp	vikt	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
13-7	32,63	24,04	35,73
13-8	33,08	23,97	38,00
13-13	33,22	24,08	37,96
13-10	32,94	23,80	38,40
13-11	33,09	23,80	39,03
13-12	33,06	23,91	38,27
<i>medelv.:</i>			37,90

provkrp	vikt	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
13-14	32,91	23,88	37,81
13-15	33,00	23,96	37,73
13-16	33,15	24,07	37,72
13-17	33,40	24,37	37,05
13-18	33,37	24,50	36,20
16-11	33,75	24,52	37,64
<i>medelv.:</i>			37,36

**SLUTFUKTKVOTER****PROV TORR**

provkrp	vikt <sub>20</sub>	vikt <sub>105</sub>	Fuktkvot
12-4	26,74	24,21	10,45
12-5	26,72	24,19	10,45
12-6	26,87	24,21	10,99
12-7	26,87	24,23	10,89
12-8	26,73	24,14	10,73
12-9	26,71	24,09	10,88
medelv.:			10,73

provkrp	vikt <sub>60</sub>	vikt <sub>105</sub>	Fuktkvot
12-10	26,15	24,03	8,82
12-11	26,37	24,20	8,97
12-12	26,26	24,16	8,69
12-13	26,53	24,16	9,81
12-14	26,52	24,45	8,47
12-15	26,72	24,37	9,64
medelv.:			9,07

provkrp	vikt <sub>90</sub>	vikt <sub>105</sub>	Fuktkvot
13-14	25,60	23,88	7,20
13-15	25,68	23,96	7,18
13-16	25,75	24,07	6,98
13-17	26,06	24,37	6,93
13-18	26,23	24,50	7,06
16-11	26,27	24,52	7,14
medelv.:			7,08

**PROV TORKNING**

provkrp	vikt <sub>60</sub>	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
15-2	26,70	24,54	8,80
15-3	26,60	24,45	8,79
15-4	26,63	24,48	8,78
15-5	26,61	24,57	8,30
15-6	26,68	24,53	8,76
15-7	26,59	24,62	8,00
medelv.:			8,57

**PROV VÅT**

provkrp	vikt <sub>20</sub>	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
14-1	48,21	25,12	91,92
14-2	47,98	24,87	92,92
14-3	47,56	24,72	92,39
14-4	47,93	24,91	92,41
14-5	48,15	25,00	92,60
15-1	47,93	24,88	92,64
medelv.:			92,48

provkrp	vikt <sub>60</sub>	vikt <sub>105</sub>	fuktkvot
13-7	63,28	24,04	163,23
13-8	60,10	23,97	150,73
13-13	60,32	24,08	150,50
13-10	59,77	23,80	151,13
13-11	58,70	23,80	146,64
13-12	60,12	23,91	151,44
medelv.:			152,28

**PROGRAM****Program:**

```
E=210E9;
A1=1E-4;      A2=2.04E-4;
I1=833.3E-12; I2=1.0132E-8;
ep1=[E A1 I1]; ep2=[E A2 I2];
```

```
K=zeros(36,36);
```

```
f=zeros(36,1);
f(7)=800;
f(22)=-565;
f(23)=565;
f(32)=-800;
```

```
Coord=[0,0;0,164;102,62.0622;
        164.1,0;359.5,0;555,0;730,0;
        670.5573,111.1849;725.4494,164;
        730,168.3784;775.5241,212.1800;
        362.7247,164]*1E-3;
```

```
Dof=[ 1 2 3;
      4 5 6;
      7 8 9;
      10 11 12;
      13 14 15;
      16 17 18;
      19 20 21;
      22 23 24;
      25 26 27;
      28 29 30;
      31 32 33;
      34 35 36];
```

```
Edof1=[ 1 1 2 3 4 5 6;
        2 4 5 6 7 8 9;
        3 7 8 9 10 11 12;
        4 1 2 3 10 11 12;
        5 10 11 12 13 14 15;
        6 13 14 15 16 17 18;
        7 16 17 18 19 20 21;
        8 19 20 21 28 29 30];
[Ex1,Ey1]=coorxtr(Edof1,Coord,Dof,2);
```

**Kommentar:**

Materialparametrar

Styvhetsmatrisen nollställs

Lastmatris skapas

Koordinater läggs in

Topologimatrix 1 skapas



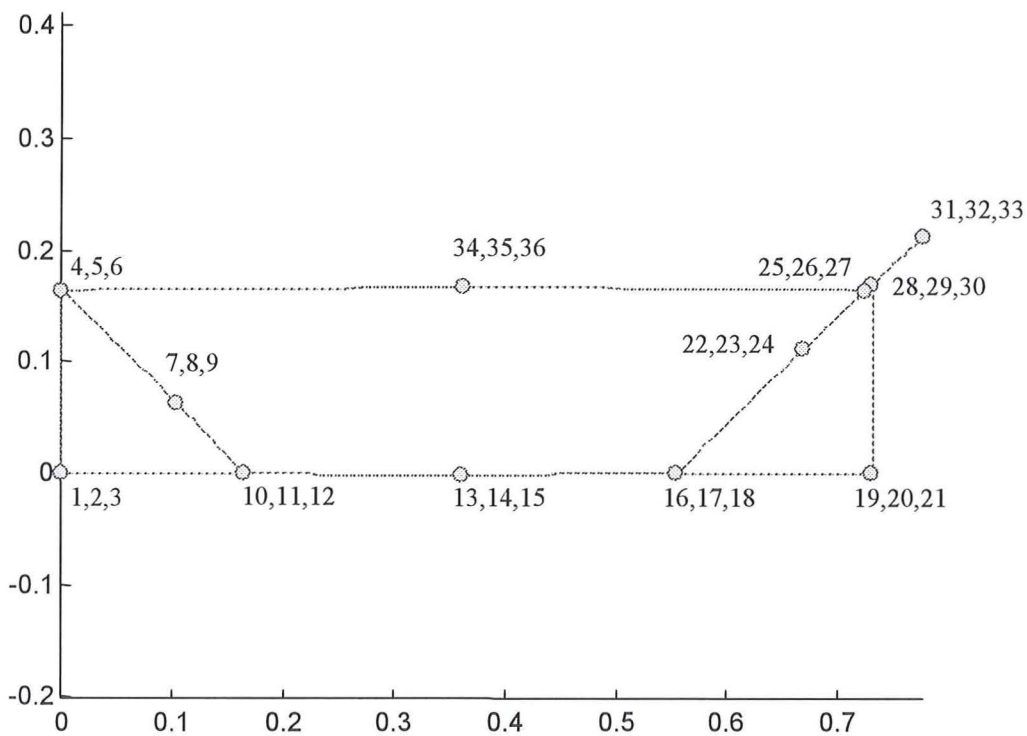
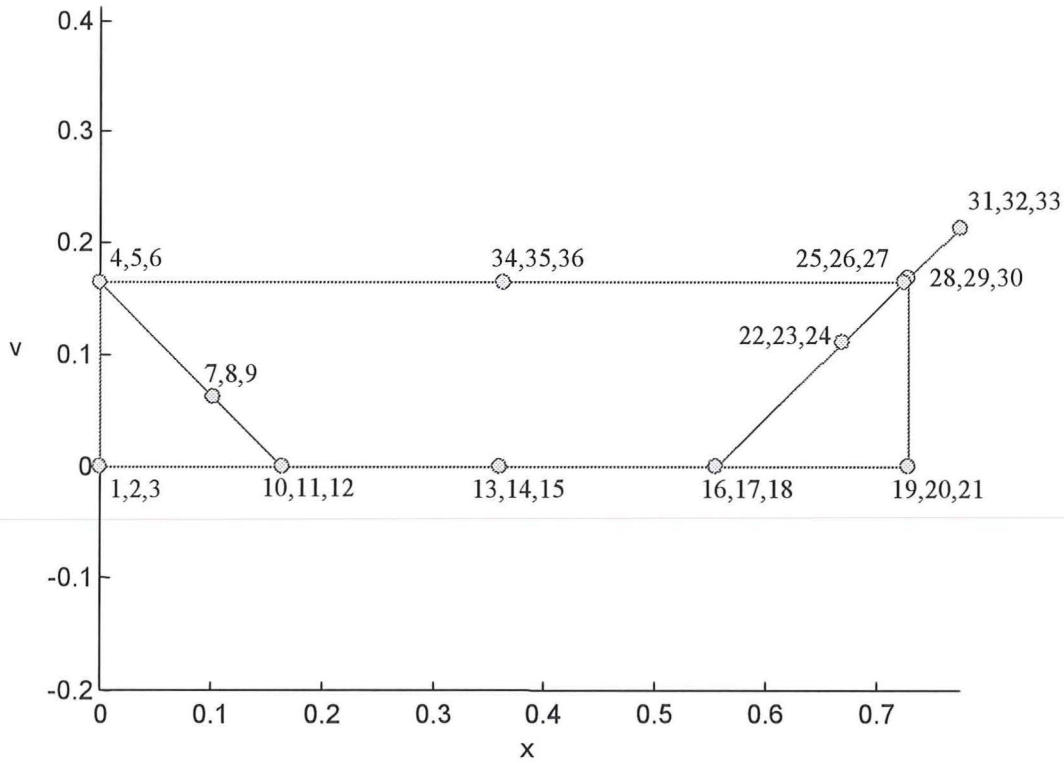
---

Edof2=[9 16 17 18 22 23 24; 10 22 23 24 25 26 27; 11 25 26 27 28 29 30; 12 28 29 30 31 32 33; 13 4 5 6 34 35 36; 14 34 35 36 25 26 27]; [Ex2,Ey2]=coordxtr(Edof2,Coord,Dof,2);	Topologimatrix 2 skapas
clf; figure(1); eldraw2(Ex1,Ey1,[1 4 1]); eldraw2(Ex2,Ey2,[1 4 1]);	Odeformerat tillstånd ritas upp
for i=1:8 Ke=beam2e(Ex1(i,:),Ey1(i,:),ep1); K=assem(Edof1(i,:),K,Ke); end	Styvhetsmatrix 1 skapas
for i=1:6 Ke=beam2e(Ex2(i,:),Ey2(i,:),ep2); K=assem(Edof2(i,:),K,Ke); end	Styvhetsmatrix 2 skapas
bc=[1 0;2 0;10 0;11 0;16 0;17 0;19 0;20 0];	Randvillkor bestäms
[a,Q]=solveq(K,f,bc)	Löser ut förskjutningarna och reaktionskrafterna
Ed1=extract(Edof1,a); Ed2=extract(Edof2,a); [magnfac]=eldisp2(Ex1,Ey1,Ed1); eldisp2(Ex2,Ey2,Ed2,[2 2 1],magnfac);	Deformerat tillstånd ritas upp

**RESULTAT**

<u>NODNUMMER</u>	<u>DEFORMATIONER</u>	<u>REAKTIONSKRAFTER</u>
1	0	-63.8937
2	0	-79.0038
3	0.0003	0.0000
4	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000
6	0.0013	0.0000
7	0.0002	0.0000
8	0.0002	0.0000
9	-0.0014	0.0000
10	0	-491.1002
11	0	58.2508
12	-0.0025	0.0000
13	0	0
14	-0.0002	0
15	0.0003	0.0000
16	0	257.9789
17	0	-183.5777
18	0.0012	0.0000
19	0	62.0150
20	0	439.3306
21	0.0002	0.0000
22	-0.0001	0.0000
23	0.0001	0
24	-0.0006	0.0000
25	0.0000	0
26	0.0000	0.0000
27	-0.0018	0.0000
28	0.0000	0.0000
29	0.0000	0.0000
30	-0.0019	0.0000
31	0.0001	0.0000
32	-0.0001	0.0000
33	-0.0024	0
34	0.0000	0
35	0.0003	0.0000
36	0.0001	0.0000

**SLUTSATS:** Maximal deformation är 2,5 mm. vid nod 12  
Maximal reaktionskraft är 491.1 N vid nod 10

**ODEFORMERAT OCH DEFORMERAT TILLSTÅND**

## **MATERIALLISTA**

### *Rostfritt stål:*

- Fyrkant – Varmvalsad, glödgad och betad  
10 X 10  
20 X 10  
30 X 10
- Vinkel – Varmvalsad, glödgad och betad  
20 X 20 X 3
- Svetsade fyrkantrör utvändigt slipade  
20 X 20 X 1,50

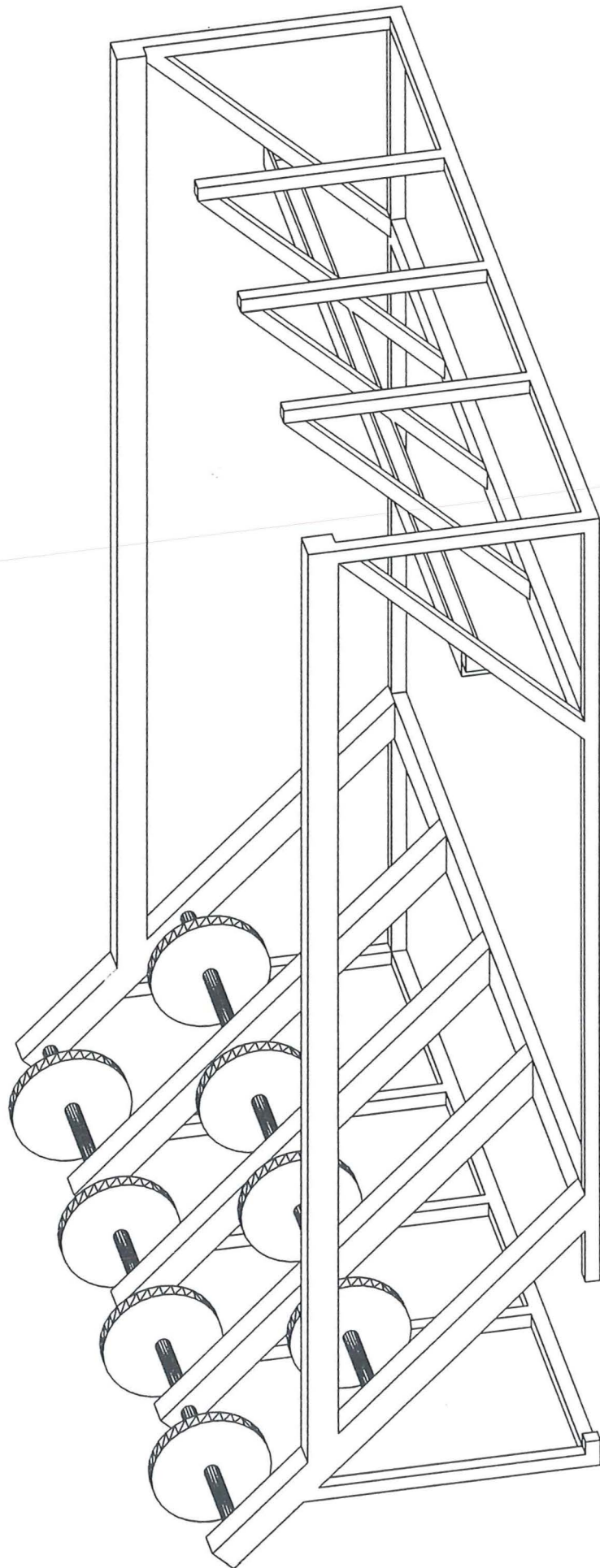
Brytblock för stållina

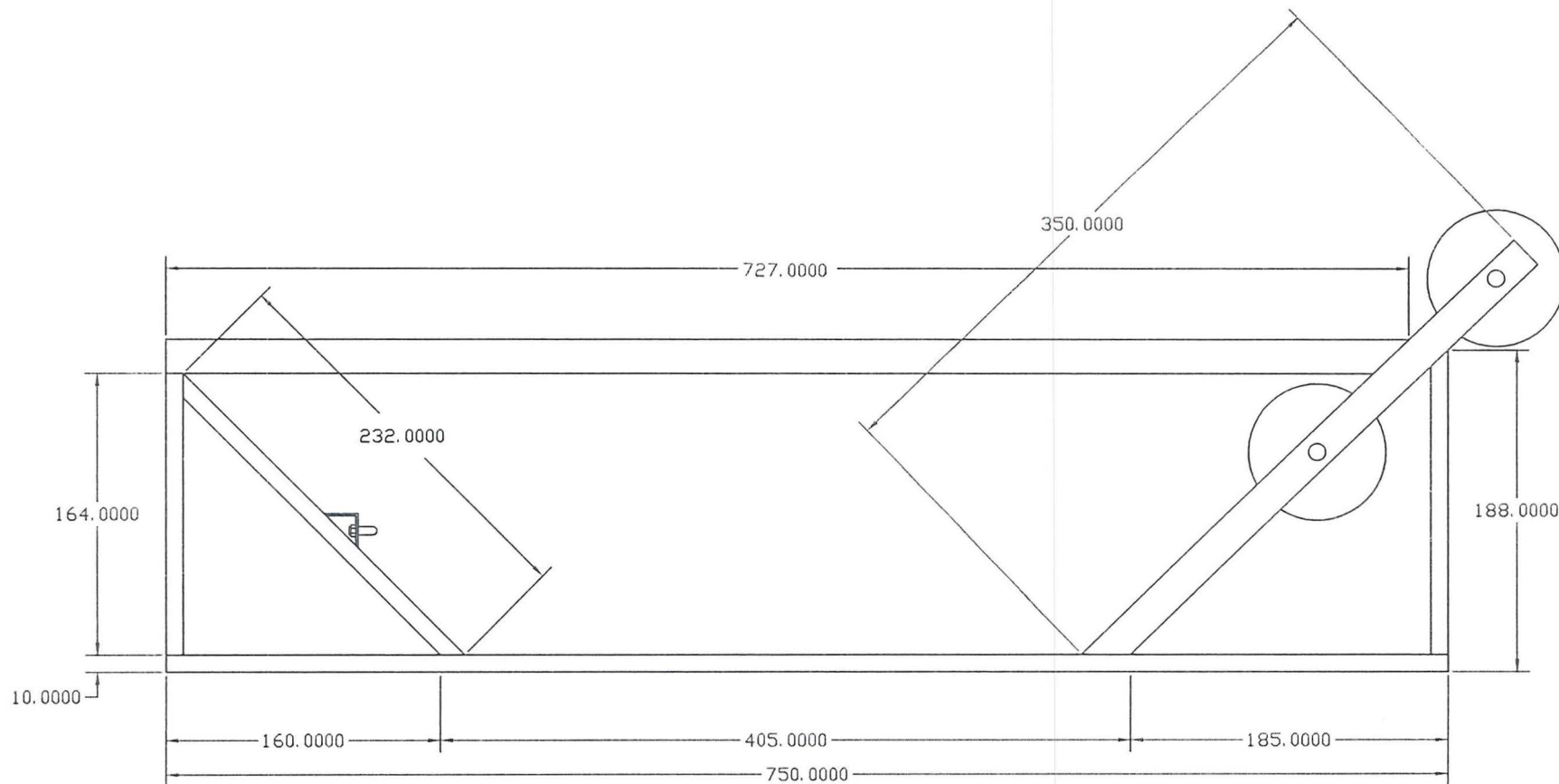
Rostfri stållina (19-trådig) – 4 mm diameter

Linlås

---







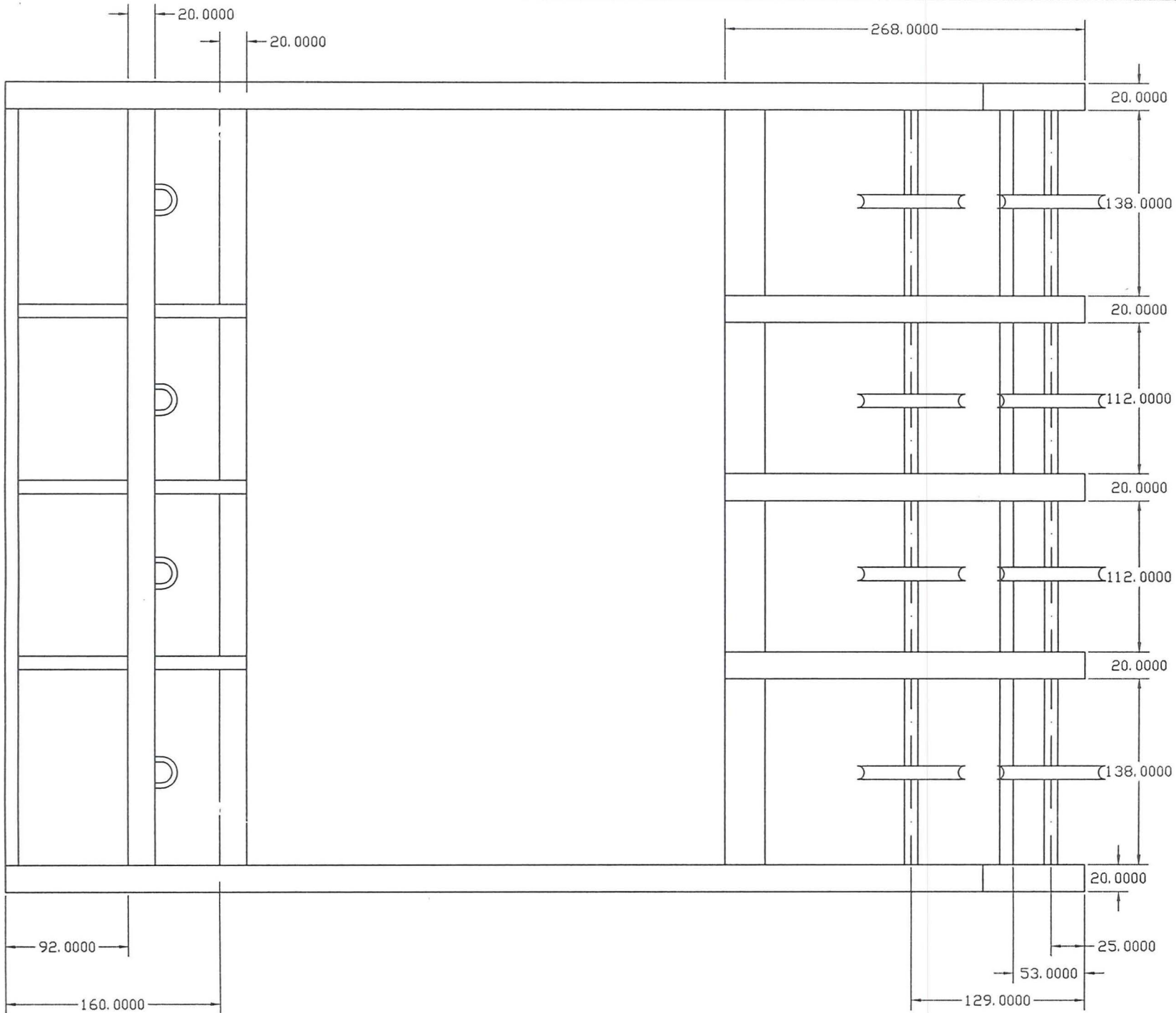
EJ MÄTTSATTA  
RADIER 40 MM

BÄRANDE KONSTR.

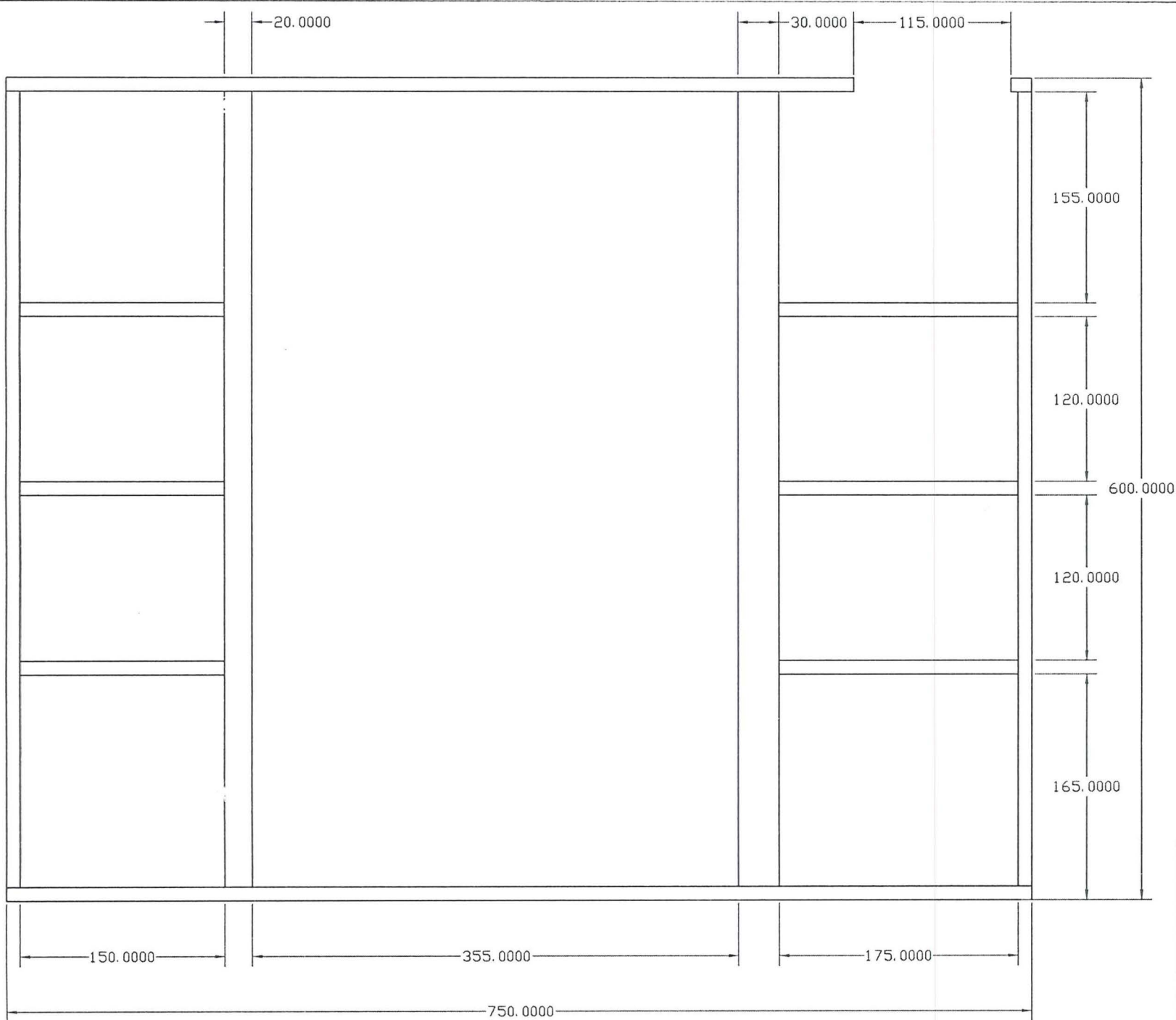
LÅNGSIDA

SKALA 1:4

ERIK & PER

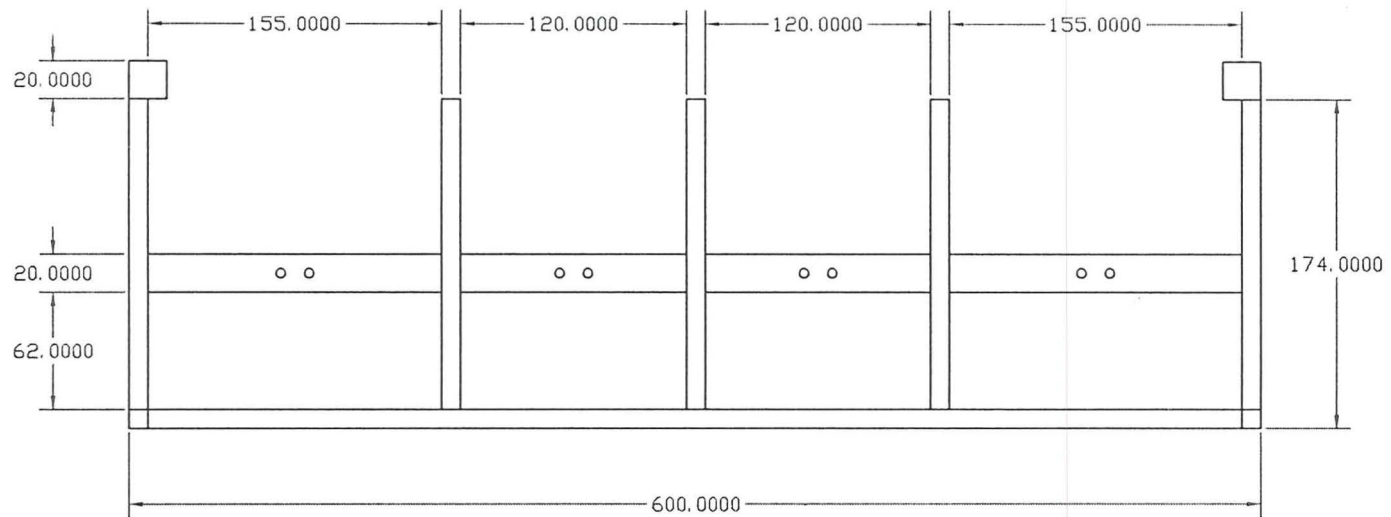


BÄRANDE KONSTR.
VY-OVANIFRÅN
SKALA 1:4
ERIK & PER



BÄRANDE KONSTR.
BOTTEN
SKALA 1:4
ERIK & PER



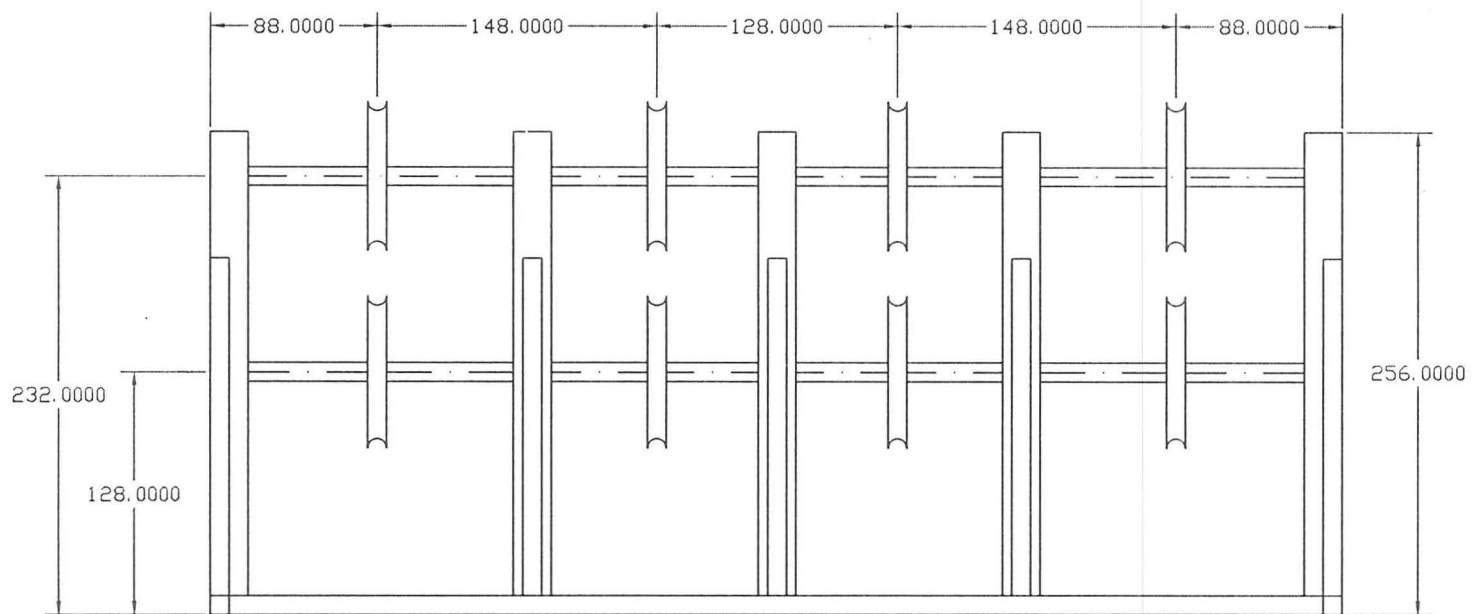


BÄRANDE KONSTR.

BAKRE GAVEL

SKALA 1:4

ERIK & PER

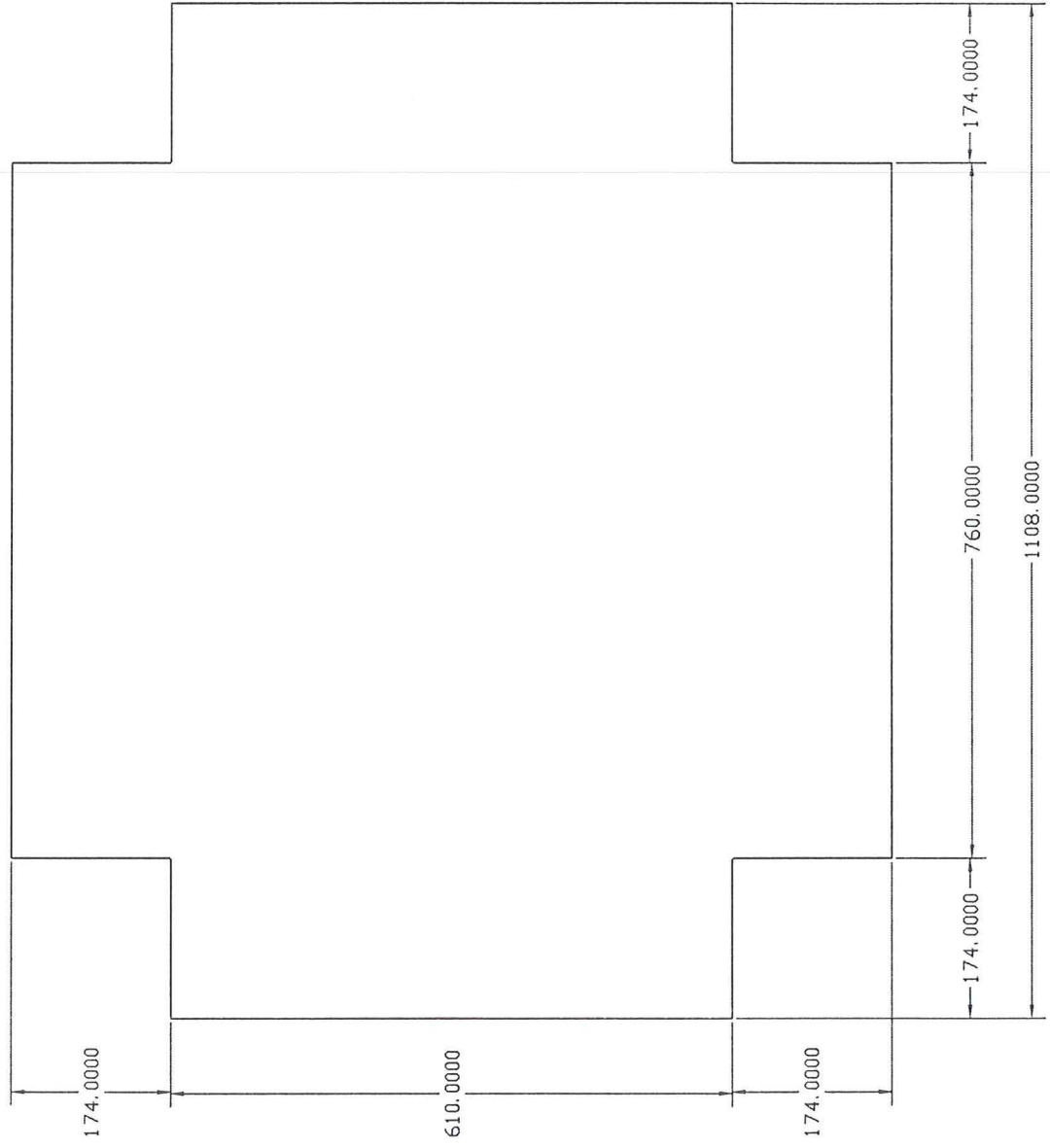


BÄRANDE KONSTR.

FRÄMRE GAVEL

SKALA 1:4

ERIK & PER



BÄRANDE KONSTR.  
PLÅT  
SKALA 1:8  
ERIK & PER