



**LUND**  
UNIVERSITY



# TORKNINGENS INVERKAN PÅ PAPPERS KRYPEGENSKAPER

MIKLÓS NAGEL

Structural  
Mechanics

*Master's Dissertation*



Structural Mechanics

ISRN LUTVDG/TVSM--01/5106--SE (1-45)

ISSN 0281-6679

TORKNINGENS INVERKAN  
PÅ PAPPERS KRYPEGENSKAPER

Examensarbete utfört av  
MIKLÓS NAGEL

Handledare:  
BO WESTERLIND  
SCA Graphic Research, Sundsvall  
PER JOHAN GUSTAFSSON  
Avd. f. byggnadsmekanik, LTH

Copyright © 2001 by Structural Mechanics, LTH, Sweden.  
Printed by KFS i Lund AB, Lund, Sweden, February 2001.

For information, address:  
Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.  
Homepage: <http://www.byggmek.lth.se>



## Abstract

A low creep rate and a long lifetime are important mechanical properties for corrugated board and its constituent's linerboard and fluting. These properties ensure that the package protects the goods during the entire duration of transport and storage.

This study involves several creep and tensile tests of linerboard in the *machine direction* (MD). The objective is to investigate how free or restrained drying in the *cross machine direction* (CD) affects the creep properties of the paper in MD. The time to failure of paper when loaded by a constant load in MD increases if the paper is dried free in CD rather than restrained. *Short term ramp load* testing gives a different response. Restrained compared to free drying in CD gives unchanged mechanical properties in MD and improved properties in CD regarding tensile stiffness, tensile strength and break strain. Creep tests in MD show on the other hand, besides increased lifetime (the time to break), that creep strain in CD is higher if the paper is restrained dried rather than free dried in CD. This is a new discovery and it might explain for example the mechanisms behind the *mechano-sorptive* effect.



## Sammanfattning

Vid långvarig belastning av papper erhålls, liksom för de flesta andra material, en deformation kallad krypning. Deformationen är såväl elastisk som plastisk. Vid avlastning sker inte ens efter lång tid fullständig återhämtning av den ursprungliga längden. Den återhämtning som erhålls beror på den elastiska delen av deformationen. Eftersom papper som används i förpackningar oftast utsätts för långvarig belastning vid vardagligt användande är det viktigt att ta hänsyn till papperets krypegenskaper vid dimensionering av förpackningar.

I ett flertal studier [1, 2, 3] har man visat att styvhet och dragstyrka vid kortvarig belastning i maskinriktningen (MD) är oberoende av papperets mekaniska egenskaper i tvärriktningen (CD). Papperets mekaniska egenskaper kan styras genom inspänd eller fri torkning. Målet med detta arbete var att utreda ifall detta oberoende även gäller för krypegenskaperna vid konstant och växlande luftfuktighet.

Anisotropa pappersark med ytvikten omkring  $150 \text{ g/m}^2$  tillverkades av oblekt barrsulfatmassa i laboratorium på en dynamisk arkform. Arken torkades på fyra olika sätt, (1a) inspönt torkat i både MD och CD, (1b) inspönt torkat i MD och fritt torkat i CD, (2a) fritt torkat i MD och inspönt torkat i CD och sist (2b) fritt torkat i både MD och CD. Vid experimenten jämfördes (1a) med (1b) och (2a) med (2b). Pappersproverna dragprovades i både MD och CD och dragkrypprovades i MD dels med en befintlig apparat utvecklad av SCA och dels med ny apparatur där stereo-DSP (Digital Speckle Photography) användes för att mäta det tredimensionella förskjutningsfältet med hjälp av bildanalys.

Resultaten visar att tiden till brott i en krypmätning ökar med 4-8 gånger vid belastning i MD om papperet torkats fritt istället för inspönt i CD. Krypbrottöjningen i belastningsriktningen påverkas däremot ej av vid torkningen olika inspänningar vinkelrätt mot belastningsriktningen. Anmärkningsvärt är att den negativa kryptöjningen (sammandragningen) vinkelrätt mot belastningsriktningen är högre om papperet torkats inspönt vinkelrätt mot belastningsriktningen. Slutsatsen man kan dra är att kryptöjningen och livslängden i en riktning för papperet beror på papperets mekaniska egenskaper i båda riktningarna. Möjligen kan dessa iakttagelser även förklara den accelererande krypning som papperet uppvisar när fukthalten i provet varierar över tiden.





## Förord

Denna rapport är resultatet av examensarbetet "Torkningens inverkan på pappers krypegenskaper". Examensarbetet är ett samarbete mellan SCA Research och LTH, Lunds Tekniska Högskola. Det utfördes på SCA Research i Sundsvall under tiden 1/11 1999 till 1/6 2000.

Jag vill tacka Bosse Westerlind för hans goda förmåga att leda in en på rätt spår och för hans alltid så positiva attityd även i svåra situationer. Jag vill också tacka Rickard&Rickard (Rickard Boman och Rickard Hägglund) för deras engagemang och outtömliga vilja till att hjälpa mig. Jag vill även tacka "killarna" i verkstaden för att ha lyckats med de småfinesser de bl a har försett stereo DSP apparaten med och vill även tacka alla andra snälla människor jag kom i kontakt med på SCA. Ett tack till Warren Batchelor för hans goda idéer, bl a när det gäller programmet för viktselektion. Thanks Warren. Till slut vill jag tacka min älskade flickvän Kriszta för hennes själsliga stöd och hennes inte så stora men tillräckliga tålamod.



# Innehållsförteckning

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>5</b>
<b>FÖRORD</b> .....	<b>7</b>
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b> .....	<b>9</b>
<b>1. INLEDNING</b> .....	<b>11</b>
1.1 BAKGRUND .....	11
1.2 PROBLEMFÖRMULERING.....	12
1.3 MÅLSÄTTNING .....	12
1.4 AVGRÄNSNINGAR.....	13
1.5 METODIK .....	13
<b>2. TEORETISKT</b> .....	<b>15</b>
2.1 PAPPERETS EGENSKAPER VID OLIKA TORKSÄTT.....	15
<b>3. EXPERIMENTELLT</b> .....	<b>19</b>
3.1 TILLVERKNING AV PAPPERSARK .....	19
3.2 DRAGPROV .....	20
3.3 DRAGKRYPPROV .....	20
3.4 DRAGKRYPPROV MED SPECIALUTVECKLAD DSP-UTRUSTNING .....	22
<b>4. RESULTAT</b> .....	<b>25</b>
4.1 DRAGPROV.....	25
4.2 DRAGKRYPPROV .....	27
4.3 DRAGKRYPPROV MED STEREO-DSP UTRUSTNINGEN .....	29
<b>5. TOLKNING AV RESULTAT</b> .....	<b>33</b>
<b>6. FRAMTIDA ARBETEN</b> .....	<b>35</b>
<b>7. REFERENSER</b> .....	<b>37</b>
<b>BILAGA 1</b> .....	<b>39</b>
<b>BILAGA 2</b> .....	<b>47</b>
<b>BILAGA 3</b> .....	<b>49</b>
<b>BILAGA 4</b> .....	<b>51</b>
<b>BILAGA 5</b> .....	<b>55</b>
<b>BILAGA 5</b> .....	<b>55</b>



# 1. Inledning

## 1.1 Bakgrund

När wellpapplådor lagras i miljöer där luftfuktighet och temperatur varierar havererar de ofta vid mycket lägre last än den last som lådorna är dimensionerade för. Ett exempel kan vara tomatlådor vilka är i nära kontakt med tomaterna och suger åt sig fukt. Tomaterna transporteras i lådor staplade på varandra från producent till affär med ett antal in- och urlastningar i kylrum för att sedan tas in i den varma och relativt torra affären. Lådorna utsätts på så sätt för både temperatur och luftfuktighetsförändringar vilket i sin tur leder till att trågkanterna krossas eller att botten hänger ned varvid tomaterna skadas. Orsaken till tidig haveri av wellpapp och papper som långtidsbelastas är papperets viskoelastiska och hygroskopiska egenskaper vilka leder till att papperet kryper. Ju högre fukthalten är i papperet desto snabbare kollapsar konstruktionen. Dessutom erhålls accelererad krypning, papperet kryper snabbare dvs går snabbare till brott, när luftfuktighet och temperatur varierar.

Papperets krypegenskaper vid varierad luftfuktighet, *mekano-sorptiv* krypning, har studerats länge. Vid ökad luftfuktighet (över ca 50% RH) förändras papperets krypegenskaper gradvis till en mjukare struktur med lägre E-modul och förhöjd brottöjning som följd medan varierad luftfuktighet ger en accelererad effekt på töjningen. Med mekano-sorptiv krypning menas alltså att papperet kryper fortare i varierad luftfuktighet jämfört med konstant hög luftfuktighet vid lika belastning [4]. Redan i slutet av 1950-talet upptäckte Armstrong och Kingston [5] och Mackay och Downes [6] det mekano-sorptiva fenomenet i trä och ull. Efter denna upptäckt har flera efterföljande studier gjorts och observationer har visat att det mekano-sorptiva beteendet uppstår även i syntetiska fibrer, vissa kompositter och träprodukter, så även i papper. Gemensamt för dessa material är att de uppvisar ett anisotrop svällningsbeteende dvs svällningen är olika stor i olika riktningar. Emellertid har mekano-sorptivt beteende observerats även för betong som är ett material med isotrop svällningsbeteende.

Det finns flera mekanismer som kan förklara mekano-sorptiv krypning. Wang et al [4] har föreslagit att fenomenet bygger på tre huvudmekanismer vilka är *vätebindningsmekanismen*, *glidplansmekanismen* och *kristallina rotationsmekanismen*.

Vätebindningsmekanismen förklarar Gibson [7] med att det mekano-sorptiva beteendet uppstår då vätebindningen kontinuerligt bryts vid adsorption (ökande materialfuktighet) varvid fibrerna glider ifrån varandra och återbildas vid desorption (minskande materialfuktighet) men då mellan andra fibrer. Vid upprepning av denna process erhålls accelererande krypning i materialet.

Baserat på SEM-mikroskopiobservationer föreslog Hoffmeyer och Davidson [4] en glidzonsmodell som förklaring till det mekano-sorptiva beteendet i trä under kompression och böjning. De upptäckte zoner av brott i form av plan som går igenom cellväggen i 60 graders vinkel. Relationen mellan dessa brott och mekano-sorptiva beteendet är att träets elastiska, viskoelastiska och plastiska egenskaper är proportionella mot antalet glidplan, vilka i sin tur är proportionella mot fuktighetsförändringen. Dessa glidplan uppstår däremot inte vid låga

dragbelastningar varför denna förklaring endast kan utgöra en del av mekaniken bakom mekano-sorptivt beteende.

Vad gäller den kristallina rotationsmekanismen fann Jentzen [8] att vinkeln mellan belastningsriktningen och fibrerna i papper, vid krypning och ökad luftfuktighet, minskade vid dragbelastning. Detta fenomen uppkommer då vätebindningarna bryts mellan fibrerna vid förhöjd luftfuktighet och de får fritt utrymme att rotera vilket resulterar i att fibrerna orienterar sig i belastningsriktningen.

En annan faktor som påverkar papperets mekaniska egenskaper är temperaturen. Om temperaturen stiger över mjukningstemperaturen (ca 50 – 240 °C, beroende på fukthalt och vedfiberkomponent) kommer styvheten att minska kraftigt [9, 10] och materialet övergår från ett styvt och glasliknande tillstånd till ett gummiliknande. Det bör dock påpekas att om temperaturen sjunker under mjukningsvärdet igen återställs de mekaniska egenskaperna [11]. Om det däremot sker kemiska reaktioner i papperet vid förhöjd temperatur består förändringarna för de mekaniska egenskaperna även vid en eventuell temperatursänkning [12].

## **1.2 Problemformulering**

Uppgiften i detta arbete är att utreda om de mekaniska egenskaperna för fibrer orienterade vinkelrätt mot belastningsriktningen påverkar papperets krypegenskaper i belastningsriktningen vid konstant luftfuktighet. För papper belastad i maskinriktningen (MD) kan fibrerna tvärs maskinriktningen (CD) betraktas som matrisdelen i ett kompositmaterial, dvs som den del som överför spänningen mellan fibrer som huvudsakligen är orienterade i belastningsriktningen.

Det papper som studeras är liner, dvs den typ av papper som används som ytterskikt vid tillverkning av wellpapp. Olika torksätt påverkar liners mekaniska egenskaper vid krypning. Pappersarken kan torkas i laboratorium på följande sätt:

- 1a.           Inspänt i MD och CD
- 1b.           Inspänt i MD och fritt i CD
- 2a.           Fritt i MD och inspänt i CD
- 2b.           Fritt i MD och CD

Om vi jämför t ex punkt 1a och 1b ovan så kommer vi att se liten eller ingen skillnad på de kvasistatiska mekaniska egenskaperna, som t ex dragstyvhet och dragstyrka, i maskinriktningen (MD) medan de kommer att skilja sig åt i tvärriktningen (CD). Om hypotesen stämmer, dvs om krypegenskaperna förändras p g a tvärfibrerna, innebär det att papperet är matrisberoende dvs de tvärgående fibrerna påverkar papperets krypegenskaper i belastningsriktningen. Utredningen kan i så fall utgöra grund för en biaxiell krypmodell.

## **1.3 Målsättning**

Verifiera eller falsifiera om papperets mekaniska egenskaper vinkelrätt mot belastningsriktningen har betydelse för papperets krypegenskaper i belastningsriktningen.

## **1.4 Avgränsningar**

I denna studie kommer endast en sorts pappersmassa att användas. Dessutom kommer samma tillverkningsförfarande, förutom torkningen, att användas för samtliga ark. Dragkrypproven kommer att utföras endast med belastning i MD. Antalet provbitar begränsas till fem stycken i varje serie krypprov. Antalet provbitar i varje serie konventionella dragprov (med konstant draghastighet och kort tid till brott) begränsas till tio stycken. Alla försök görs i en miljö med konstant 50-procentig relativ luftfuktighet.

## **1.5 Metodik**

Pappersprovbitarna tillverkas av mald oblekt våt (aldrig torkad) barrsulfatmassa. Fyra olika torkningsförfaranden tillämpas för att erhålla olika mekaniska egenskaper i en bestämd riktning. Sedan utförs förstörande prov i form av dragprov och dragkrypprov. Under krypprovens gång mäts förlängning/krympning som funktion av tiden i både CD och MD. Eftersom papperet bucklar vid belastning är det nödvändigt att mäta det tredimensionella förskjutningsfältet för att kunna bestämma töjningar i papperets plan. Detta görs med hjälp av en bildanalysmetod baserat på mönsterigenkänning med DSP (Digital Speckle Photography). Efter testerna skall tolkning av mätvärdena ske och slutsatser dras.





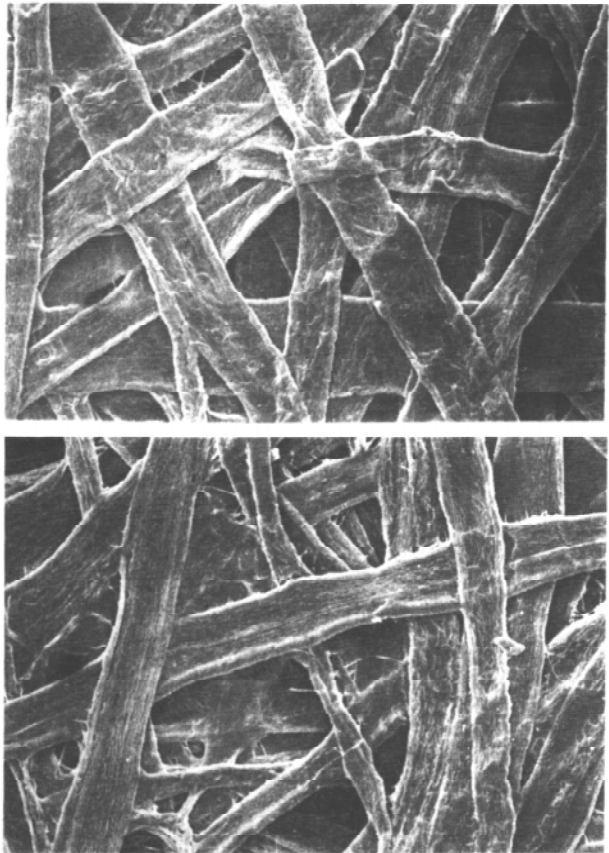
## 2. Teoretiskt

### 2.1 Papperets egenskaper vid olika torksätt

Under torkningsförloppet vid tillverkning av papper krymper papperet på bredden (CD) medan det förlängs i MD. Det har gjorts många försök att tillverka papper med kanterna inspända under torkningen och på så sätt förhindra krympning i CD. Detta skulle leda till förbättrade mekaniska egenskaper i form av ökad styrka och styvhet med ca 40-80 procentenheter i CD och oförändrade egenskaper i MD. Men riskerar inte detta torksätt att påverka krypegenskaperna i MD på ett negativt sätt?

Vad är det då som händer med papper under torkning? Om papper torkas helt fritt uppstår mikrokompressioner vid korsande fibrer vilket leder till att fibrerna blir krokiga och papperet krymper i både MD och CD. *Figur 1* visar fibrernas utseende efter inspänd och fri torkning. Om papperet hålls inspant i MD och fritt i CD under torkning uppstår mikrokompressioner endast i CD mellan korsande fibrer och fibrerna i CD blir vågformade medan fibrerna i MD blir raka och utsträckta. En schematisk bild över jämförelsen mellan hur mikrokompressionerna ser ut då papperet torkar helt fritt och papper inspant i MD och fritt i CD kan ses i *figur 2*.

Om papper torkas helt fritt krymper det mer i CD än i MD. Detta kan förklaras med att det finns fler fibrer i MD än i CD och en enskild fiber krymper mycket mer tvärs fibern än längs fibern. Varje fiberkors orsakar en krympning i MD och CD genom mikrokompressioner i fibrens längdriktning och sammandragning av fibern i tvärriktning. Se vidare *figur 3* för bättre förståelse.



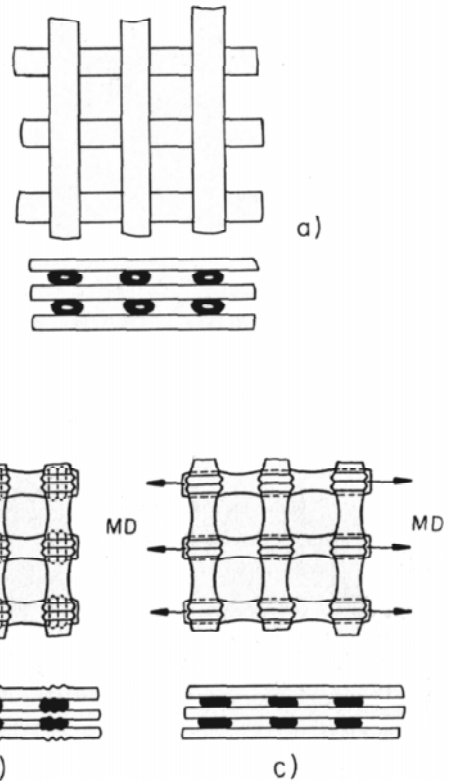
*Figur 1.* Elektronmikroskopfoton av fritt torkat papper (överst) och inspant torkat papper (nederst). (Fellers et al, 1992 [12])

Som en tankemodell för att förklara hur de mekaniska egenskaperna i olika riktningar kan påverkas oberoende av varandra vid torkning kan man tänka sig att papperet är som en tygbit med krokiga fibrer vilket visas i *figur 4 a*). Tyg kan rätas ut i MD, i CD och i båda

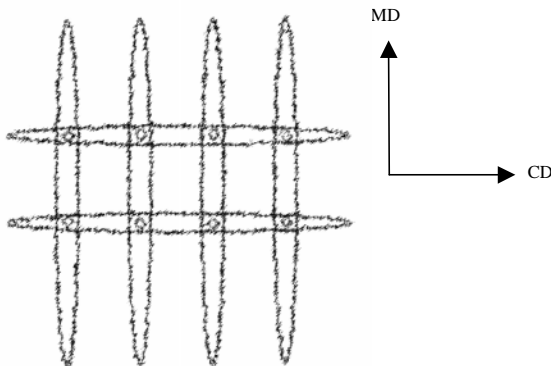
riktningarna som i *figur 4 b) - d)*. Vid t ex inspänd torkning i MD och fri torkning i CD, *figur 4 a)*, rätas fibrerna ut i MD medan de fritt torkade fibrerna i CD blir krokiga.

Resultat från tidigare laboratoriestudier [1, 2, 3] bekräftar att papperets mekaniska egenskaper i olika riktningar beror på den sträckning eller krympning som erhålls under torkningen. Nedan redovisas några resultat från dessa studier.

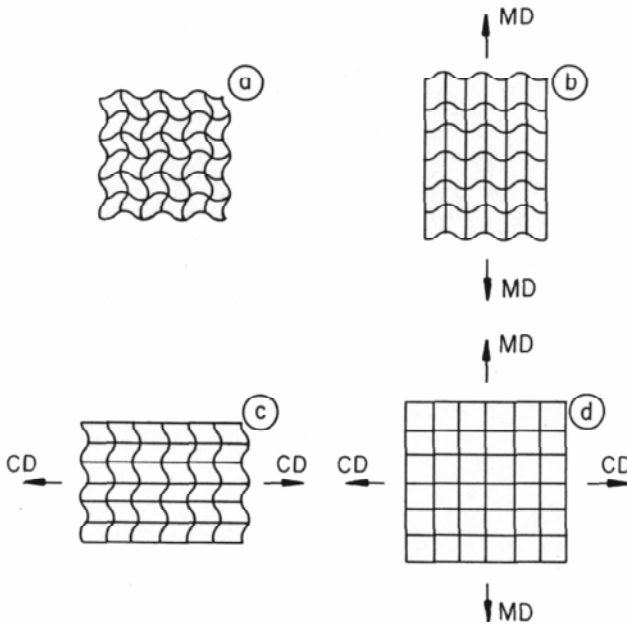
*Figur 5* visar dragstyvhetsindex i CD mot dragstyvhetsindex i MD vid två olika fiberorienteringar och för olika torksätt i både CD och MD. I punkt A är papperet fritt torkat i både MD och CD. I punkterna B och C är papperet inspänt respektive fritt torkat i MD och fritt respektive inspänt torkat i CD. Punkt D visar fallet där papperet är inspänt torkat i både MD och CD. Av figuren framgår att när torksättet ändras i en riktning påverkar detta dragstyvhetsindex i denna riktning medan dragstyvhetsindex vinkelrätt förblir opåverkad. *Figur 6* visar dragindex i CD mot dragindex i MD vid två olika torkningsförfaranden och tre olika fiberorienteringar. Även ur denna bild kan liknande slutsatser dras.



**Figur 2.** Schematisk bild över mikrokompressionernas utseende vid olika torksätt.  
a) Svällt fibernätverk före torkning  
b) Fri torkning i MD och CD  
c) Inspänd torkning i MD, fri torkning i CD  
(Myat Htun et al, 1987 [1])



**Figur 3.** Vid fri torkning bildas mikrokompressioner vid varje fiberkors. Fler fibrer i MD ger större krympning i CD.

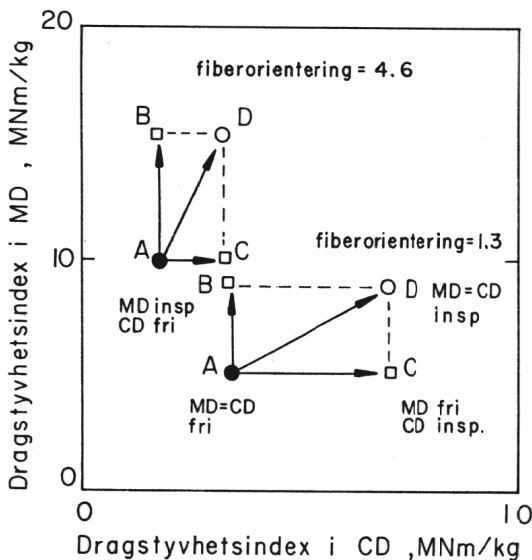


Figur 4. De mekaniska egenskaperna i papper i MD och CD är oberoende av varandra. (Myat Htun et al, 1987 [1])

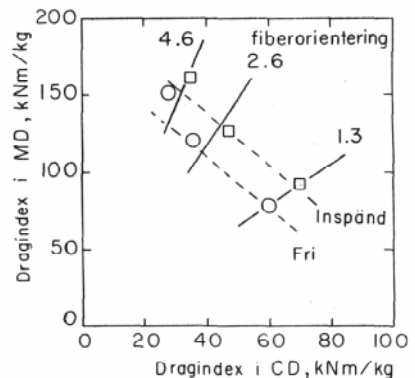
Liners egenskaper påverkas av torksätt även i tjockleksriktningen. Om torkningen sker med inspända kanter i både MD och CD sker en förbättring av de mekaniska egenskaperna i z-riktning (tjockleksriktningen) [13, 14].

Inverkan av torksätt på pappers styvhet är alltså bekräftat med experimentella resultat och har också schematiskt förklarats. Men varför tro då att krypegenskaperna förändras på annorlunda sätt? Varför tro att olika torksätt i ena riktningen förändrar krypegenskaperna i den andra?

Hur krypegenskaperna påverkas av olika torksätt är okänt. Man kan anta att papper uppför sig som kompositmaterial när det gäller krypning. I kompositmaterial påverkas krypningen av både fiber och matrismaterial. Om papper kan antas fungera på liknande sätt som komposit kan tvärfibrerna, dvs fibrerna vinkelrätt mot belastningsriktningen, antas vara matrismaterialet i papper vilket



Figur 5. Dragstyvhetsindex i CD och MD vid två olika fiberorienteringar och för olika torksätt i både CD och MD. (Htun, 1980 och 1986 [2,3])



Figur 6. Dragindex i CD och MD vid två olika torksätt och tre olika fiberorienteringar. (Htun, 1980 och 1986 [2,3])

innebär att tvärfibrerna överför spänningar mellan lastbärande fibrer orienterade i belastningsriktningen. Det kan då vara naturligt att anta att om egenskaperna i tvärriktningen (matrismaterialet) förändras kommer också förändringar i belastningsriktningen att ske. Det har konstaterats enligt ovan att så är inte fallet för kvasistatisk belastning. Då återstår alltså att undersöka om hypotesen eventuellt stämmer för krypning med belastning under längre tid.

### 3. Experimentellt

#### 3.1 Tillverkning av pappersark

Hela examensarbetet bygger på ett antal experiment utförda på papper tillverkat av mald oblekt barrsulfat från SCA Packaging Obbola. Av sådan massa tillverkas liner dvs det papper som används som planskikt i wellpapp. Här användes massan för att tillverka papper i laboratorieskala. Det var noga med att erhålla ungefär samma ytvikt,  $150 \text{ g/m}^2$ , på alla ark. Pappersprovens ytvikt för de olika torksätten presenteras i *tabell 1*. Ytvikterna erhöles genom att för varje torksätt väga tio stycken pappersark med skiftande storlekar,  $300 - 400 \text{ mm}^2$ , efter lagring i klimatet 50% RH och  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

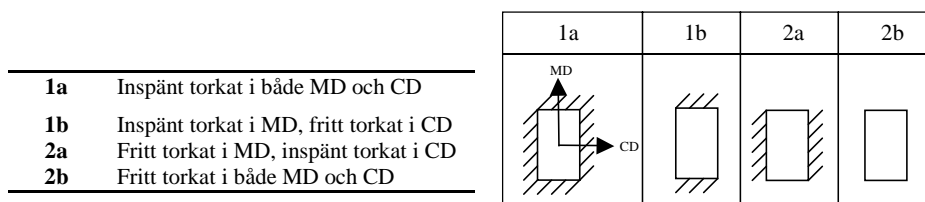
*Tabell 1. Mätresultat på medelytvikt och standardavvikelse för pappersark torkade på fyra olika sätt i 50-procentig relativ luftfuktighet.*

	Inspänt torkat i MD och CD	Inspänt torkat i MD, fritt torkat i CD	Fritt torkat i MD, inspänt torkat i CD	Fritt torkat i MD och CD
<b>Ytvikt, w (<math>\text{g/m}^2</math>)</b>	$149.54 \pm 0.90$	$156.75 \pm 1.54$	$154.54 \pm 3.50$	$162.14 \pm 4.90$

Arken tillverkades på en dynamisk arkform med följande inställningar:

- Dysa nr 2510
- Bronsvira
- Pumptryck 2.8 bar
- Trummans varvtal 1200 rpm

Den oblekta sulfatmalden med 4% fiberinnehåll sprutades jämnt fördelat över en bronsvira i en vertikalt roterande trumma. Därefter lyftes det fortfarande våta pappersarket tillsammans med bronsvira ur trumman och pressades två gånger. Efter pressning klipptes arket i tre mindre ark (ca  $250 \times 200 \text{ mm}$ ) för att få plats i torkramarna. Där torkade de, inspänt på tre olika sätt, i ca 40 minuter. Några ark torkades fritt i rumstemperatur på en torktrumma. Trumman roterar och är uppvärmd till ca  $60-70 \text{ }^\circ\text{C}$  på ytan. Arken på trumman låg mellan teflonviror för att erhålla minsta möjliga motstånd mot krympning. I *figur 7* presenteras benämning och innebörd på de fyra olika torksätten.



*Figur 7. Beskrivning av de fyra olika torksätten som tillämpas i projektet.*

Efter att ha tillverkat arken förkonditionerades de i 30% RH och 23°C för att senare användas i det kontrollerade klimatet 50% RH och 23 °C.

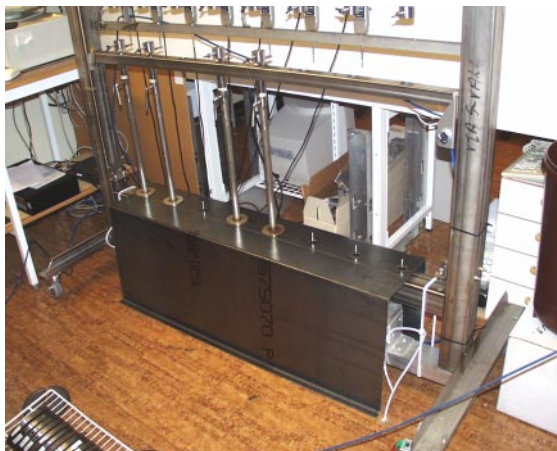
### 3.2 Dragprov

För att bestämma dragstyrka, dragstyvhet, brottarbete och brottöjning utfördes dragprov på tio pappersremсор per provpunkt enligt testmetoden SCAN-P67. Proven utfördes i en dragprovsmaskin av typ Alwetron TH1 tillverkat av Lorentzen & Wettre. Draghastigheten var 99 mm/min, inspänningslängden 100 mm och remsbredden 15 mm. Dragproven utfördes i både MD och CD vid 50% och 90% relativ luftfuktighet. Tiden till brott var mellan 2 och 5 sekunder.

### 3.3 Dragkrypprov

Dragkrypapparaten som användes under detta examensarbete har använts i ett tidigare arbete [15] där den beskrivs mer detaljerat. Utrustningen mäter deformation som funktion av tid för att bestämma brottid, förlängning och återhämtning vid avlastning. Den tidigare studien [15] baserades på ark med ytvikt 150 g/m<sup>2</sup> och 300 g/m<sup>2</sup> vilka testades vid två luftfuktigheter, 50% och 90% RH. Belastningen på arken låg då på 20, 30, 40 och 50% av korttidsbrottlasten och dragkrypproven utfördes i både MD och CD.

Detta arbete baseras på samma apparat för att kryptesta papper med lika ytvikt men med olika torkförfaranden. Dragkryptesterna utfördes enbart i MD. Apparaten har både för- och nackdelar. En fördel är att det går att mäta krypningen för åtta olika prover på samma gång. Dessutom startar krypningen samtidigt för alla åtta prover eftersom alla åtta vikter som belastar remsorna vilar i obelastat läge på en lång balk och proverna belastas först när denna balk sänks ner. En tredje fördel är att apparaten går lätt att förflytta eftersom allting sitter ihop i ett paket. Största nackdelen är att när en remsa går av så faller vikten, som belastar remsan, mot den långa balken och detta ger en vertikal vibration i hela apparaten. Denna vibration överförs sedan till de andra ännu intakta remsorna vilket kan leda till för tidigt brott för dessa. Detta problem kan förebyggas genom att låta remsorna belastas fritt och inte låta dem sitta i



**Figur 8.** U-balken som minimerar vibrationerna, här i nedsänkt läge.

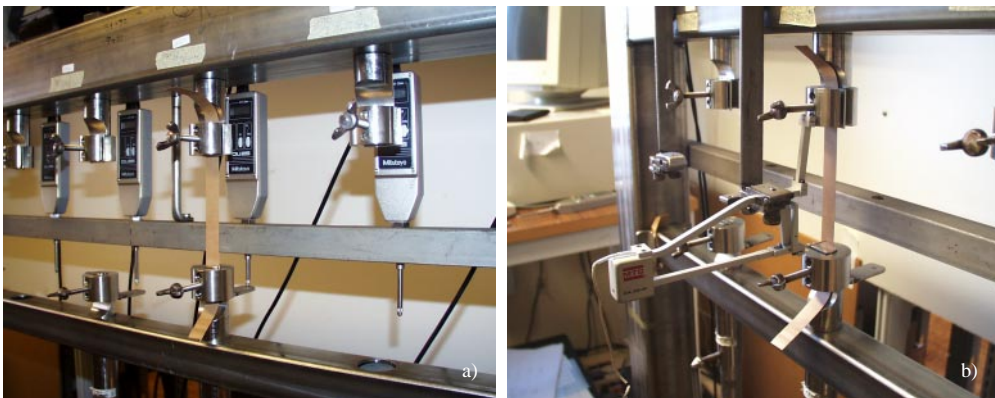
en och samma ram. Här valdes en enkel lösning för att eliminera problemet. Jag lade en U-formad balk mellan vikterna och den långa balken, se *figur 8*. När remsorna belastas ligger U-balken mot golvet och fångar upp lasten när provbitarna går av. Detta förhindrar den största vibrationen att fortplanta sig i övriga delen av apparaten genom att U-balken inte är i kontakt med apparaten. Den lilla vibration som ändå uppstår när en remsa går av kan bero på att golvet leder vibrationen vidare eller också på att ramen studsar litet grand p g a den uppåtriktade kraft som uppstår då remsan går till brott.

För att kunna göra experimenten på dragkryppapparaten behövde jag belasta pappersremsorna med ett antal stångvikter. Massan på dessa vikter varierar mellan ca 2380 g och 2690 g vilket leder till att det är svårt att välja ut de vikter som ska ge den exakta belastningsnivå jag söker. För att lösa detta problem valde jag att skriva ett program i Matlab för val av vikter. Koden återges i *bilaga 1*.

Diverse justeringar och ett antal inledande dragkrypprov ledde fram till beslutet att använda tre olika belastningsfall: (1) 70%, (2) 50% och (3) 30% av den brottlast som bestämdes vid dragprovet.

För att kunna göra rättvisande jämförelser mellan dragkryppresultaten bestämde jag mig för att använda samma last för de ark som skall jämföras med varandra. Dessa är 1a mot 1b dvs inspänd torkning i MD och inspänd respektive fri torkning i CD och 2a mot 2b som motsvarar fri torkning i MD och inspänd respektive fri torkning i CD. Orsaken till detta val är att jag jämför ark som har samma kvasistatiska mekaniska egenskaper i MD men olika i CD. Den gemensamma lasten bestämdes till att vara den högre brottlasten för de två jämförda arken.

Dragkrypptesterna utfördes i 50% RH och endast i MD. I det fall där remsorna belastades med 70% av brottlasten fick alla remsor gå till brott medan vid fallet med 50% och 30% av brottlasten avlastades remsorna efter ca 2 timmar och 25 minuter. Efter avlastning registrerades töjningen under ytterligare lika lång tid. Vid de senare testerna användes nålgivare av märket MTS vilka är direkt kopplade till pappersremsan med nålar. Vid testerna med belastningsnivån 70% av brottlasten användes pinngivare av märket Mitutoyo vilka är indirekt kopplade till remsorna genom klämmor som remsorna är spända i. Nackdelen med pinngivaren är att glidning mellan remsa och klämma tas med i töjningsmätningen. Dessutom kan stången som klämman sitter på vrida sig vilket leder till en skenbar förskjutning med upp till 90  $\mu\text{m}$ . Nackdelen med nålgivaren är att det finns risk för för tidigt brott eller större förlängning p g a det hål som nålen gör i remsan. *Figur 9* visar två detaljbilder över deformationsmätningen med nål- och pinngivare.



**Figur 9.** Detaljbilder på deformationsmätning.

a) Bilden visar pinngivaren som återger nedre klämmans vertikala förskjutning.

b) Bilden visar nålgivaren som återger förskjutningen i papperet med hjälp av två armar vilka fästs i provet med nålar.

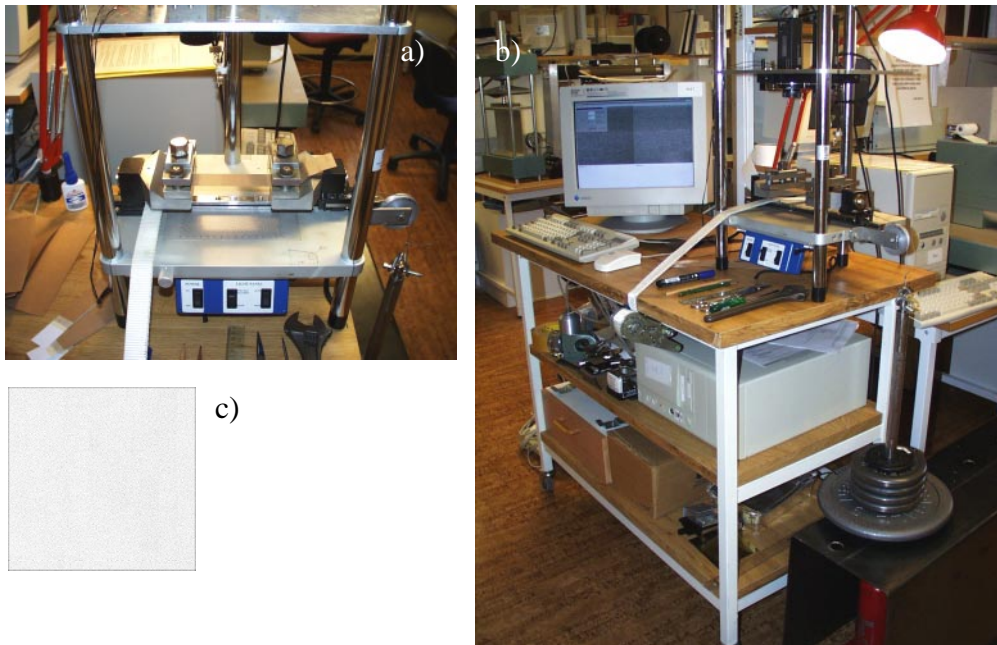


### 3.4 Dragkrypprov med specialutvecklad DSP-utrustning

Eftersom provremsan bucklar vid dragbelastning blev det nödvändigt att modifiera befintlig DSP-utrustning (Digital Speckle Photography), tillverkad av Fibro System AB, för att mäta på en yta med storleken ca 30 x 30 mm. DSP-utrustningen består av bl a två kameror för att kunna mäta deformationen i tre riktningar: x, y och z, detta för att kunna kompensera för att papperet bucklar och därigenom erhålla en noggrannare bestämning av töjningen i planet. Metoden bygger på mönsterigenkänning och kräver ett slumpmässigt prickmönster på provremsan. Mönstret, *figur 10 c*), genererades med en vanlig bläckstråleskrivare.

Den ursprungliga apparaten mätte på en yta av ca 100 x 100 mm. För att kunna titta på en mindre yta var det nödvändigt att minska avståndet mellan kameraobjektiv och objekt, skjuta kamerorna närmare varandra och addera distansringar mellan objektiv och kamerahus. Provremsan spändes mellan två klämmor som är monterade på två slädar, en fast och en rörlig. Den rörliga släden glider utmed en horisontell skena som är fastskruvad i utrustningens nedre platta. En stålsläde förankrades i ena änden till den rörliga släden och i andra änden via ett hjul till en stång som belastas med vikter. Den modifierade utrustningen kan ses i *figur 10 a) och b)*.

Totalt fyra dragkrypprov i MD, med en provremsa för varje krypprov, utfördes med DSP-utrustningen på belastningsnivå 30% av brottlasten efter samma princip som nämndes i *kapitel 3.3 d v s* samma last för 1a och 1b samt 2a och 2b. Tre bilder togs under varje test med



**Figur 10.** Stereo-DSP utrustningen i tre olika vyer och prickmönstret som trycks på provremsorna.

- a) Stereo-DSP:n rakt framifrån
- b) 3D-vy
- c) Prickmönstret på en yta med storleken 30 x 30 mm



60 minuters intervall och första bilden, en referensbild, togs innan provet belastades. Luftfuktigheten var 50% RH.

Utvärdering av mätdata gjordes enligt följande. Först lästes alla mätdata från DSP-mätningarna till en datafil som sedan överfördes till en deformationsfil med ett format anpassat för ANSYS. Denna deformationsfil kördes sedan i ett ANSYS underprogram kallat `kryp1.mac` som är utvecklat för att beräkna ett tredimensionellt töjningsfält. Data från ANSYS beräkningarna i form av lokala töjningar i nodpunkterna sparades i en txt-fil. Denna txt-fil användes i Matlab tillsammans med en fil kallad `resultatDSP.m` för att beräkna medeltöjningen i MD och CD. Alla koder presenteras i *bilaga 2 – bilaga 5*.



## 4. Resultat

### 4.1 Dragprov

De första testen var dragprov. Dessa måste göras först för att erhålla riktlinjer för vilken nivå kryplasten skall ligga på samt för att kontrollera att dragstyvhetsindex och dragindex i MD är densamma oberoende av torksått i CD. *Tabell 2* visar medelvärde och standardavvikelse för dragprovdata. Vid varje dragprov användes tio stycken provremсор. Genom att använda ytvikten från *tabell 1* beräknades specifika värden för styvhet, styrka och brottarbete. Spänning-töjningskurvor visas i *figur 11* för de olika torkade arken. Dessa kurvor togs fram med ett Matlab program enligt Andersson & Berkytos ekvation

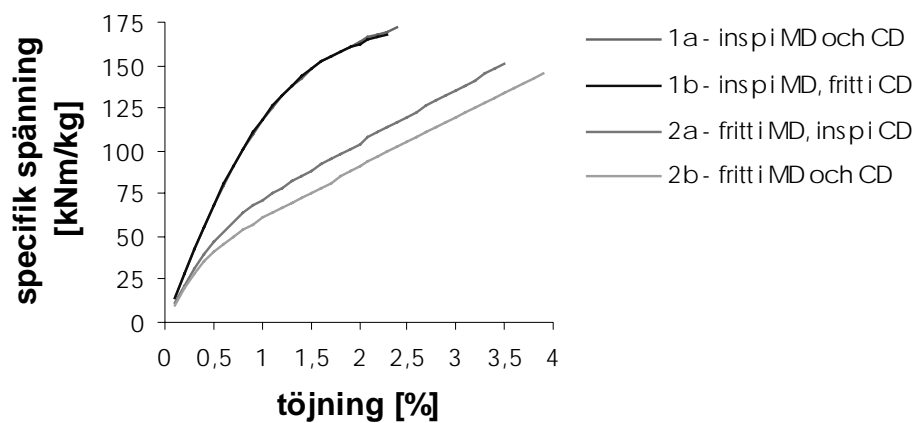
$$\sigma_w = A \cdot \varepsilon + \tanh(C \cdot \varepsilon) \quad (1)$$

där  $\sigma_w$  är specifik spänning,  $\varepsilon$  är töjning och A och C är parametrar. Kurvorna är typiska spänning-töjningskurvor för papper med utgångspunkt från de specifika värdena på styvhet, styrka, brottarbete och brotttöjning. I figuren kan vi se att det inte händer något speciellt med dragindex när vi belastar i MD och ändrar torksått i endast CD. Detsamma gäller när vi belastar i CD och torkar olika enbart i MD.

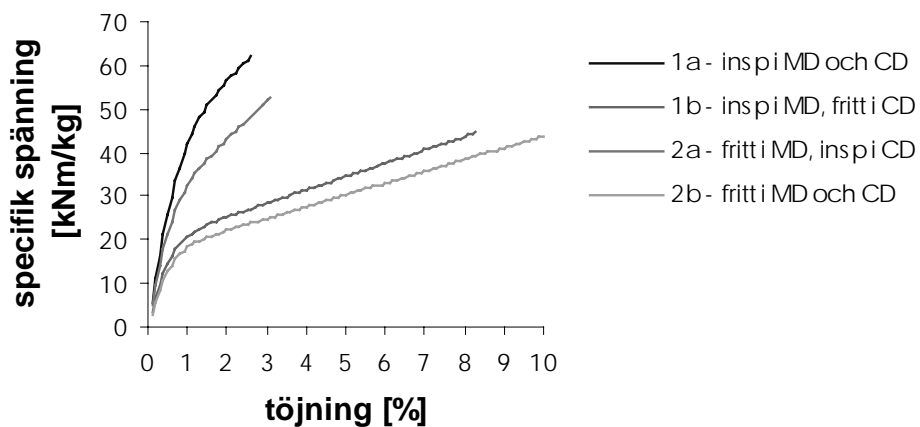
*Tabell 2. Dragprovdata efter omräkning till specifika värden. Värdena är av formen medelvärde  $\pm$  standardavvikelse.*

	Dragstyvhetsindex $E^w$ [MNm/kg]	Dragindex, $\sigma^w$ [kNm/kg]	Brottarbetsindex TEA <sup>w</sup> [J/kg]	Brottöjning, $\varepsilon$ [%]
<b>50% RH, drag i MD</b>				
1a – insp i MD och CD	14.49 $\pm$ 0.96	171.2 $\pm$ 7.4	2561 $\pm$ 244	2.4 $\pm$ 0.25
1b – insp i MD, fritt i CD	14.53 $\pm$ 1.13	167.0 $\pm$ 13.4	2318 $\pm$ 235	2.2 $\pm$ 0.16
2a – fritt i MD, insp i CD	11.05 $\pm$ 1.23	148.0 $\pm$ 7.2	3071 $\pm$ 338	3.4 $\pm$ 0.54
2b – fritt i MD och CD	10.22 $\pm$ 0.37	143.7 $\pm$ 13.9	3273 $\pm$ 584	3.8 $\pm$ 0.45
<b>50% RH, drag i CD</b>				
1a – insp i MD och CD	5.62 $\pm$ 0.36	61.3 $\pm$ 3.4	1034 $\pm$ 147	2.5 $\pm$ 0.40
1b – insp i MD, fritt i CD	3.42 $\pm$ 0.45	44.5 $\pm$ 1.9	2544 $\pm$ 510	8.3 $\pm$ 1.96
2a – fritt i MD, insp i CD	4.95 $\pm$ 0.19	52.1 $\pm$ 1.0	1078 $\pm$ 104	3.0 $\pm$ 0.25
2b – fritt i MD och CD	2.00 $\pm$ 0.09	43.7 $\pm$ 1.2	2933 $\pm$ 246	9.9 $\pm$ 0.72
<b>90% RH, drag i MD</b>				
1a – insp i MD och CD	9.44 $\pm$ 0.58	98.2 $\pm$ 5.3	1933 $\pm$ 148	3.0 $\pm$ 0.18
1b – insp i MD, fritt i CD	9.53 $\pm$ 1.08	99.8 $\pm$ 5.0	1747 $\pm$ 160	2.7 $\pm$ 0.33
2a – fritt i MD, insp i CD	5.95 $\pm$ 0.83	84.1 $\pm$ 3.5	2120 $\pm$ 122	4.4 $\pm$ 0.54
2b – fritt i MD och CD	6.18 $\pm$ 0.42	114.2 $\pm$ 5.8	2854 $\pm$ 148	4.8 $\pm$ 0.19
<b>90% RH, drag i CD</b>				
1a – insp i MD och CD	3.13 $\pm$ 0.23	31.5 $\pm$ 1.3	893 $\pm$ 44	4.0 $\pm$ 0.27
1b – insp i MD, fritt i CD	1.97 $\pm$ 0.30	26.4 $\pm$ 1.2	1306 $\pm$ 263	7.9 $\pm$ 2.17
2a – fritt i MD, insp i CD	3.25 $\pm$ 0.23	30.5 $\pm$ 0.9	769 $\pm$ 59	3.5 $\pm$ 0.35
2b – fritt i MD och CD	1.63 $\pm$ 0.12	25.9 $\pm$ 0.5	1506 $\pm$ 69	9.7 $\pm$ 0.27

### Belastning i MD, 50% RH



### Belastning i CD, 50% RH



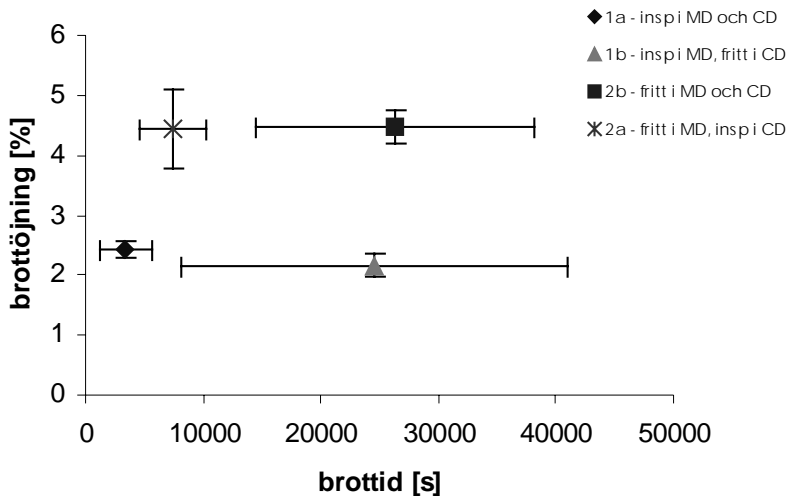
Figur 11. Dragprovkurvor framtagna med hjälp av ett Matlab program. Kurvorna är en approximation med utgångspunkt ifrån de specifika materialegenskaperna i tabell 2.

## 4.2 Dragkrypprov

När brottlasten hade bestämts kunde dragkrypproven sättas igång. Resultaten presenteras i flera figurer och bilder. *Figur 12* visar resultat efter dragkrypproven utförda på belastningsnivån 70% av brottlasten och vid 50% relativ luftfuktighet. 70% av brottlasten för 1a och 1b är 70% av 393N och för 2a och 2b 70% av 350N. Brottlasten beräknas genom att multiplicera de tre enheterna *specifik spänning* enligt *tabell 2*, *ytvikt* enligt *tabell 1* och *remsans bredd* (15mm) med varandra. Eftersom det viktiga i sammanhanget var att använda samma last för två jämförda torksätt valdes de högre lasterna som provremsorna håller för, alltså 393N och 350N (remsor torkade enligt torksätt 1a klarar i snitt 384N, 1b 393N, 2a 343N och 2b 350N). De data som presenteras i *figur 12* är medelvärdet och standardavvikelsen av fem provers brottid och brottöjning. De enskilda provresultaten visas i *Tabell 3*. På två felaktiga resultat togs endast tre av fem provresultat med för torksätt 2a.

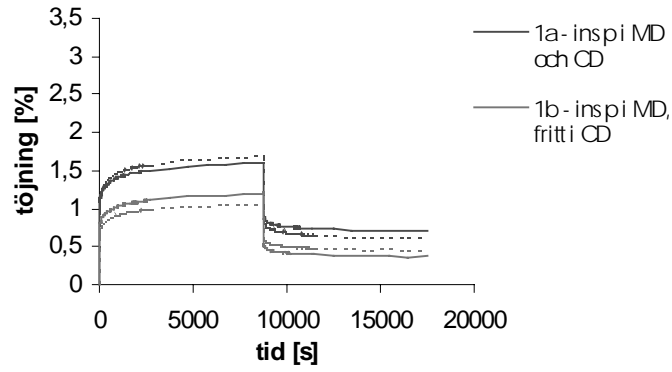
**Tabell 3.** De enskilda resultaten efter dragkrypprovning på fyra serier med fem provpunkter i varje serie (förutom för 2a). Belastningsnivån är 70% av brottlasten.

	Brottid [s]	Brottöjning [%]
<b>1a – insp i MD och CD</b>		
Prov 1	2628	2,406
Prov 2	1658	2,416
Prov 3	1429	2,235
Prov 4	6729	2,522
Prov 5	4727	2,603
<b>1b – insp i MD, fritt i CD</b>		
Prov 1	49768	2,297
Prov 2	31753	2,307
Prov 3	8732	1,882
Prov 4	15739	2,030
Prov 5	16740	2,251
<b>2a – fritt i MD, insp i CD</b>		
Prov 1	5727	3,941
Prov 2	5727	4,217
Prov 3	10731	5,186
<b>2b – fritt i MD och CD</b>		
Prov 1	30749	4,267
Prov 2	26745	4,307
Prov 3	38755	4,922
Prov 4	28747	4,463
Prov 5	6728	4,402

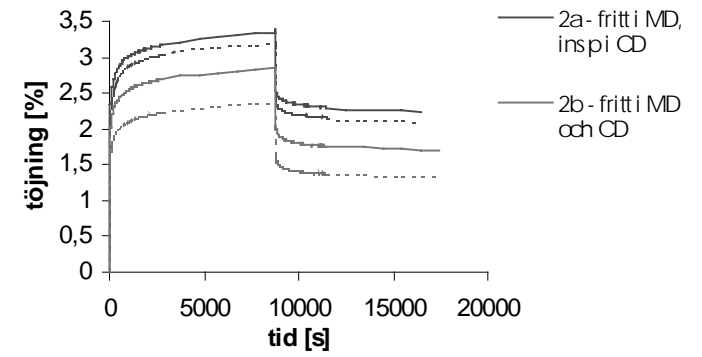


**Figur 12.** Medelvärde och standardavvikelse för brottid och brottöjning för provremsor efter dragkryppbelastning i 50% RH och på belastningsnivån 70% av brottlasten. Belastning i MD i samtliga fall.

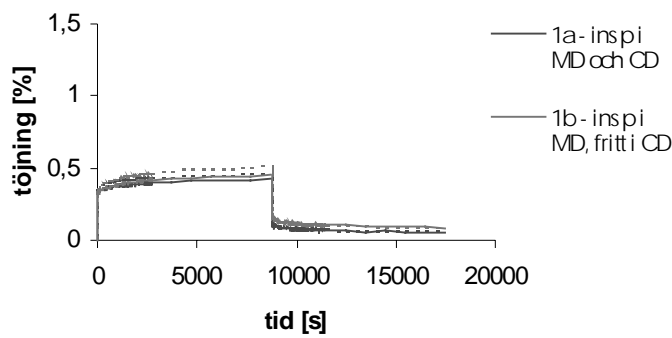
a) **Belastningsnivån 50% av brottnivån**



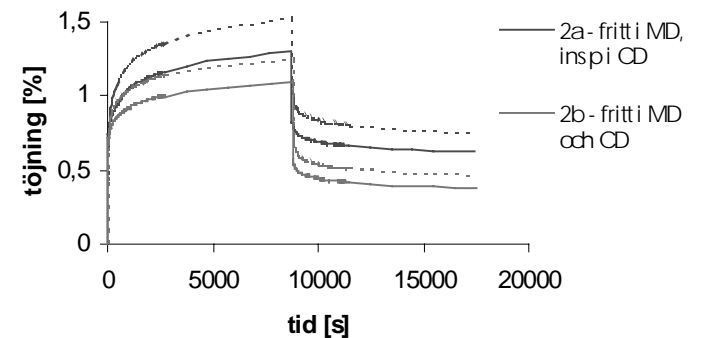
b) **Belastningsnivån 50% av brottnivån**



c) **Belastningsnivån 30% av brottnivån**



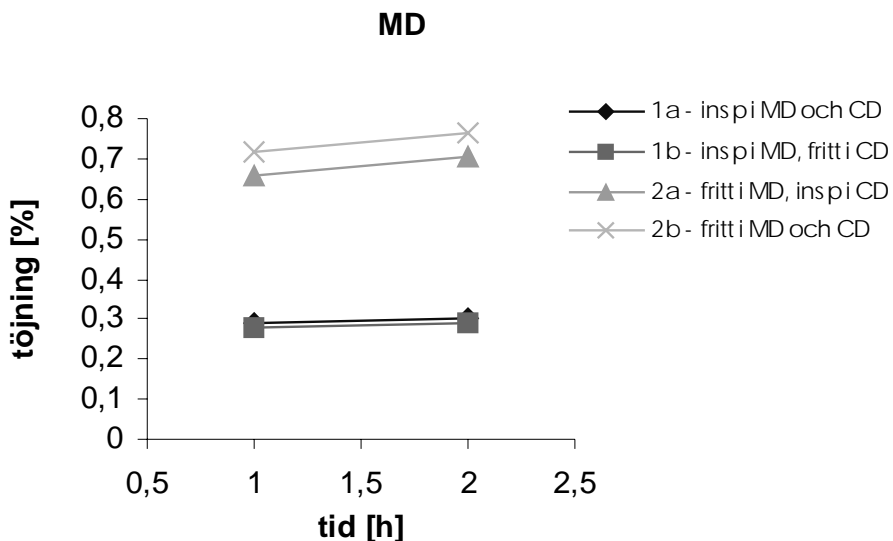
d) **Belastningsnivån 30% av brottnivån**



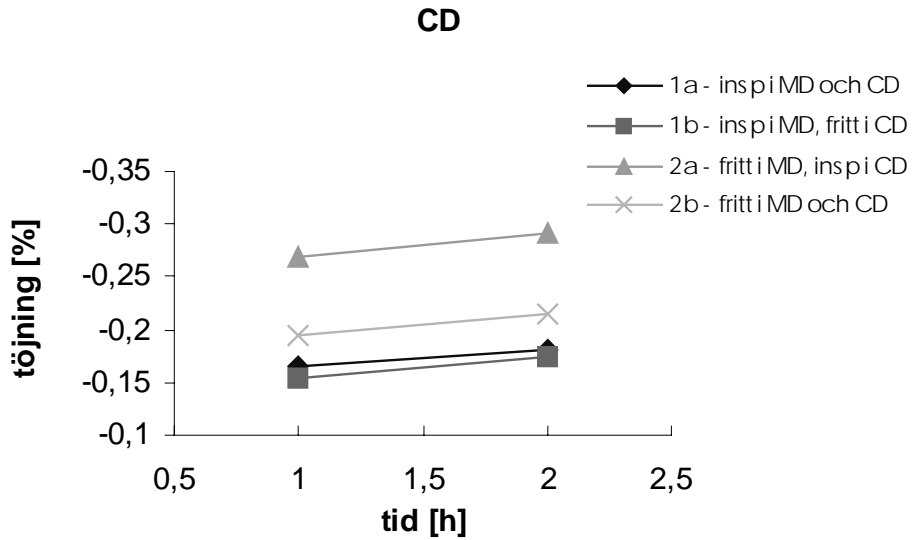
Figur 13 visar kurvorna för töjning som funktion av tid under på- och avlastning i 50% RH och på belastningsnivåerna 30% och 50% av brottlasten. Antalet nominellt lika prov i varje serie var två. På liknade sätt som för belastningsnivån 70% av brottlasten innebär 50% och 30% av brottlasten 50% och 30% av 393N och 350N. Figuren visar att töjningen i papperet, när vi belastar i MD, inte skiljer nämnvärt när vi torkar papperet olika i CD för belastningsnivån 30%. Däremot är töjningen högre i MD på belastningsnivån 50% för fallet inspänt torkat i CD jämfört med fritt torkat i CD oberoende av om arket torkats fritt eller inspänt i MD. Fri torkning i MD ger för båda belastningsnivåerna ca två gånger högre töjning i MD.

#### 4.3 Dragkrypprov med stereo-DSP utrustningen

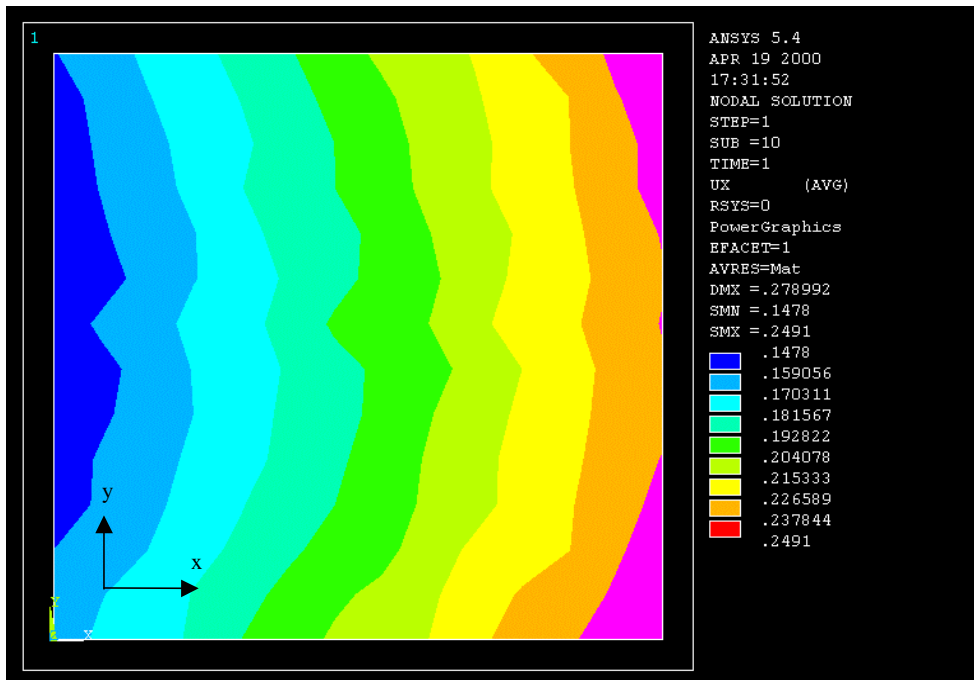
Med stereo-DSP utrustningen genomfördes fyra försök med en belastning som motsvarar 30% av provremans brottstyrka. Resultatet efter behandling av mätdata i finit elementprogrammet ANSYS kan ses i figur 14 och figur 15. Figuren visar medelvärdet av alla lokala töjningar i MD och CD efter en respektive två timmars belastning. Figur 14 visar att töjningen i MD är opåverkad av torksätt i CD i likhet med figur 13 c) och d), för låga belastningsnivåer (30% av brottlasten). Däremot är töjningen vinkelrätt mot belastningsriktningen, i CD, högre om arket är inspänt istället för fritt torkat i CD. Det finns en viss skillnad i töjning i MD när vi jämför figur 13 c) och d) med figur 14. Denna skillnad beror troligtvis på att kontaktytan mellan provremans och klämmorna är mindre vilket betyder att denna kontaktyta inte tar upp lika stor skjuvkraft och därför glider provremans lättare ur klämman. Denna glidning bidrar sedan till den större töjningen i figur 13.



Figur 14. Kurvorna visar medeltöjningen i MD. Kurvorna är framtagna med data från det 3-dimensionella förskjutningsfältet och beräknat med hjälp av finit elementanalys. Belastning i MD, luftfuktighet 50% RH.



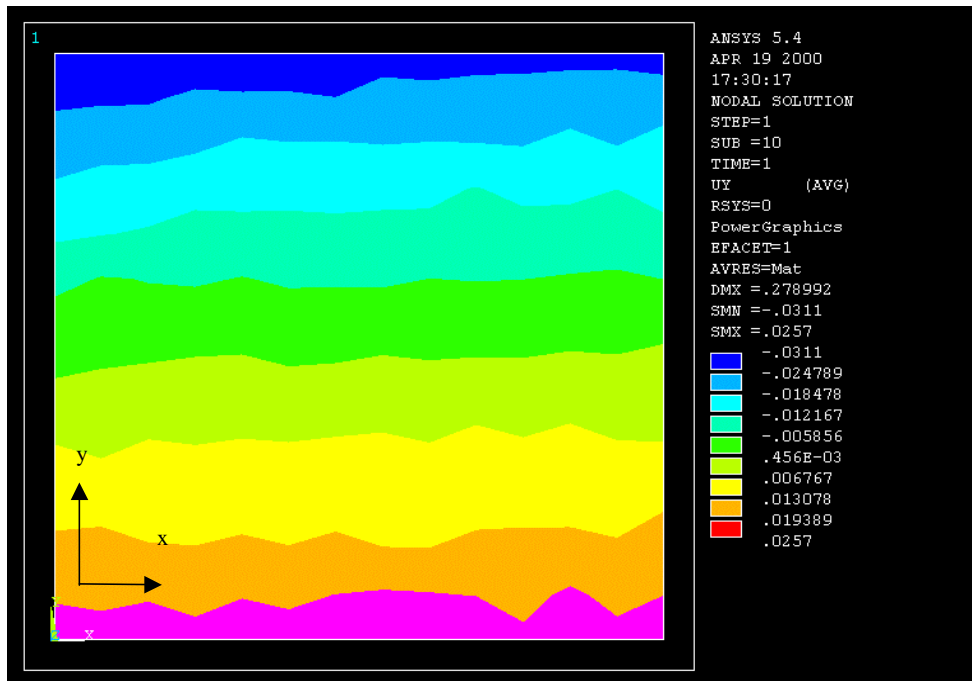
**Figur 15.** Kurvorna visar medeltöjningen i CD. Kurvorna är framtagna med data från det 3-dimensionella förskjutningsfältet och beräknat med hjälp av finit elementanalys. Belastning i MD, luftfuktighet 50% RH.



**Figur 16.** Bilden visar förskjutningen av nodpunkterna för torksättet 1a i x-riktningen efter en timmes belastning.



Figur 16 och figur 17 visar de ursprungliga förskjutningsbilderna för torksätt 1a dvs inspänt torkat i både MD och CD i enheten millimeter. Här ser vi exakt vad som händer i papperet från nod till nod.



Figur 17. Bilden visar förskjutningen av nodpunkterna för torksättet 1a i y-riktningen efter en timmes belastning.



## 5. Tolkning av resultat

Vid dagens papperstillverkning sträcks papperet under torkningsförloppet ca 0,5% i MD medan papperet krymper ca 1 – 3,5% i CD [9]. Genom att minska fria dragen i torkpartiet, dvs minska avståndet mellan cylindrarna, och hålla fast papperet mot cylindern med t ex vakuum kan en mindre krympning i CD erhållas (ner mot 0 %) vilket resulterar i en finare yta och högre dragstyvhet i CD. Men det finns naturligtvis även andra tekniska lösningar för att minska krympningen i CD.

Resultat efter dragproven, *tabell 2*, visar i likhet med andra studier [10, 11, 12] att dragstyrka och styvhet är högre och brottförlängning och brottarbete lägre i CD om papperet torkats inspant jämfört med fritt i CD. För belastning i MD påverkas de nämnda mekaniska egenskaperna inte eller obetydligt av torksättet i CD. Spänning-töjningsdiagrammen i *figur 11* ger en schematisk presentation av hur de mekaniska egenskaperna vid kortvarig belastning i CD påverkas av varierad torksätt i CD. Styvhet och dragstyrka nästan fördubblas medan brotttöjningen i det närmaste halveras om torksätt i *samma riktning* ändras från fritt till inspant.

Liner utsätts sällan för snabba belastningar varför drag- och kompressionsprov inte ger tillräcklig information om materialets beteende. Wellpappförpackningar med sina komponenter liner och fluting, utsätts mestadels för långvariga låga belastningar. Vi vet att papper dessutom kryper mer om temperatur och luftfuktighet ökar varför krypbelastning i många fall är det mest relevanta belastningssättet för att erhålla materialegenskaper för dimensionering.

Det kan tyckas vara logiskt att papperet torkat enligt 1a borde ha bättre krypegenskaper i MD jämfört med papperet i 1b eftersom vi har gjort papperet starkare i CD. Men det är i stället tvärt om. I *figur 12* presenterades resultat efter kryptesterna utförda vid 50% RH vid belastningsnivån 70% av brottlasten. Av figuren framgår att krypbrottiden i MD för 1b jämfört med 1a ökar med faktor åtta medan krypbrottöjningen är oförändrad. Liknande resultat gäller för 2a och 2b där krypbrottiden i MD för 2b ökar med faktor fyra. Varför det blir så är svårt att förklara. Det som kan konstateras är att dynamiken skiljer sig åt mellan ett dragprov och ett krypprov. Vid korttidsbelastningen genom dragning med konstant hastighet går papperet till brott efter bara några sekunder. Detta leder till en lokalisering av brottområdet där man får fiber- och fiberbindningsbrott. Vid krypning, som är töjningen vid belastning med konstant last, sker en långsammare deformationsprocess där det finns tid för hela pappersstrukturen att glida isär. Men det är svårt att konstatera vad som egentligen sker. Det här är ett område där det krävs mer forskning för att förstå mekanismerna.

En intressant detalj i *figur 12* är att medelvärdena för brottid och brottöjning bildar en fyrkant, dock en aning sned sådan. Denna snedhet kan förklaras med att belastningen för 1a och 1b har varit litet högre. Desto intressantare är fyrkantsprofilen vilken visar att om vi ändrar torksätt i CD ökar livslängden medan brottöjningen förblir oförändrad och om vi ändrar torksätt i MD sker det motsatta dvs brottöjningen ökar medan livslängden blir oförändrad.

*Figur 13* styrker att det inte finns någon större skillnad i töjning i MD vid belastningsnivån 30% av brottlasten när vi jämför torksätt 1a med 1b och 2a med 2b. Däremot kan vi se en ganska markant skillnad vid den högre belastningsnivån 50% av brottlasten. Vid hög

belastningsnivå i krypprov får man alltså en lägre kryphastighet och en längre livslängd i MD om papperet torkas fritt istället för inspänt i CD.

En intressant detalj är också papperets egenskaper i CD vid belastning i MD. Vi har sett hur liner deformeras i MD men hur ser det då ut i CD? Här kommer testerna med stereo-DSP utrustningen in i bilden. Även om det bara gjordes ett försök med en provremsa för varje torksätt kan vi konstatera, efter en närmare titt på *figur 15*, att papperet krymper mer i CD om det torkats inspänt istället för fritt i CD. Detta gäller oberoende av om papperet torkats inspänt eller fritt i MD. Det är anmärkningsvärt att papperet krymper mer i CD med torksätt 2a, inspänt torkat i CD, än med torksätt 2b, fritt torkat i CD. Dragstyvheten i CD är ju högre när papperet torkas inspänt jämfört med fritt i CD. Det behövs helt klart fler experiment och mer analys för att förstå orsaken till detta.

Jag har alltså i detta examensarbete kommit fram till två viktiga slutsatser. Den första är att det finns ett samband mellan torksätt i CD och därigenom mekaniska egenskaper i CD och livslängd och kryphastighet vid krypprov i MD. Den andra är att papperet kontraherar mer i CD vid inspänd torkning i CD jämfört med fri torkning i CD med konstant draglast i MD.

## 6. Framtida arbeten

Önskvärt är att göra fler försök med stereo-DSP utrustningen, helst med fem eller nominellt lika många provremсор per försöksserie. Försöken bör dessutom ligga på en högre belastningsnivå än 30% av brottlasten, förslagsvis på belastningsnivån 50%. En högre last är önskvärd främst för att förtydliga skillnaderna i resultaten för den negativa töjningen i CD för papper torkade på olika sätt.

Kompressionsprov i form av LCT (Long span Compression Test) och även krypkompressionsprov bör också göras med belastning i både MD och CD. Detta eftersom wellpappförpackningar ofta är kompressionsbelastade, t ex när wellpapplådor staplas på varandra.

Dragkrypprov med både dragkryppapparat och stereo-DSP:n under varierad luftfuktighet är ytterligare en intressant fortsättning. I det sammanhanget behövs även hygroexpansionsprovning som visar hur papperet expanderar i x- och y-riktningen vid fuktökning utan belastning. Det är intressant att se hur papperet deformeras i CD vid belastning i MD under varierade luftfuktighetsförhållanden. Kanske kan det också delvis ge en förklaring till mekano-sorptiv krypning dvs accelererad krypning till följd av ett varierat klimat.

Dragkryppapparat bör vidareutvecklas genom att t ex använda behållare för blykulor eller liknande för att belasta provremсорna. Dessutom borde hela konstruktionen göras om så att klämmorna inte ska behöva vara förankrade med varandra i en gemensam ram. Detta för att komma runt problemet med vibrationer i konstruktionen vid brott av provremсор.

Stereo-DSP utrustningen behöver bli mer gedigen. T ex har pålastningen, d v s nedsänkningen av vikterna, tidigare skett med en domkraft. Detta har ibland resulterat i för hög nedsänkingshastighet och därmed skadade provremсор. Kunde lösas genom att t ex använda en hydraulisk kolv som kan styras i båda riktningarna dvs både upphöjnings- och nedsänkingshastigheten kan regleras. Att kunna kalibrera styrprogrammet i z-riktningen har också varit problematiskt. Glapp och dylikt kan elimineras genom att, efter kalibrering, skruva fast skenan med vagn och klämmor i bottenplattan.



## 7. Referenser

1. *Myat Htun, Torbjörn Hansson och Christer Fellers.* "Torkningens inverkan på papperets mekaniska egenskaper". STFI meddelande, D 281, 1987.
2. *Myat Htun.* "The influence of drying strategies on the mechanical properties of paper". Doktorsavhandling. KTH, 1980.
3. *Myat Htun.* "The control of mechanical properties by drying restraints". Ur "Paper, structure and properties". Ed Bristow & Kolseth, Marcel Dekker inc., New York, Basel, 1986.
4. *J. Z. Wang, D. A. Dillard och F. A. Kamke* (1990). "Transient moisture effects in materials". Journal of Materials Science, vol 26, sid 5113-5126. Departments of Engineering Science and Mechanics and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA 24061, USA.
5. *L. D. Armstrong och R. S. T. Kingston.* "Effect of moisture changes on creep in wood". Nature, vol 185, sid 862-863, 1960.
6. *B. H. Mackay och J. G. Downes.* "The effect of the sorption on the dynamic rigidity modulus of the wool fiber". Journal of Applied Polymer Science, vol 2, nr 4, sid 32-38, 1959.
7. *E. J. Gibson.* "Creep of wood: Role of water and effect of a changing moisture content". Nature, vol 206, sid 213-215, 1965.
8. *C. A. Jentzen.* Tappi J., vol 47, sid 412, 1964.
9. *R. W. Erickson och D. J. Sauer.* Forest Product Journal, vol 19, nr 2, sid 45, 1969.
10. *R. Erickson, M. M. Chen och T. Lehtinen.* Forest Product Journal, vol 22, nr 10, sid 56, 1972.
11. *K. Kitahara och K. Yukawa.* "The influence of the change of temperature on creep in bending". J. Jap. Wood Res. Soc. vol 10, sid 169-175, 1964.

12. *J. Anthony Bristow, Christer Fellers, Ulla-Britt Mohlin, Bo Norman, Mikael Rigdahl och Lars Ödberg.* "Pappersteknik". Lärobok. Institutionen för Pappersteknik KTH, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 1992.
13. *Torbjörn Wahlström, Anna Lundh, Torbjörn Hansson och Christer Fellers.* "Biaxial straining of handsheets during drying - Effect on delamination properties". Swedish Pulp and Paper Research Institute (STFI), Stockholm, Sweden.
14. *Torbjörn Wahlström och Christer Fellers (1998).* "Biaxial straining of handsheets during drying - Effect on in-plane mechanical properties". Proceedings 1998 TAPPI Engineering Conference, Miami, Florida, USA.
15. *Poorvi Patel.* "Nonlinear creep model of paper and corrugated board materials". Doktorsavhandling. Lund University, Department of Engineering Logistics, Lund, Sweden, 1999.



# Bilaga 1

## väljvikter.m

```
% Detta program väljer systematiskt ut de skivstångsvikter som exakt
% bildar den önskade vikten

format short

% Vikterna till storlek (i gram) skrivs in som en enda lång
% radmatris. stv betyder stora vikter (ca 2,5 kg) och smv står för
% små vikter (ca 500 g)

stv = [2584.1 2391 2553.1 2616.5 2417.6 2602.6 2529 2490.7 2468.7 2479.7
2623.7 2490 2593.3 2567 2486.2 2486.6 2453.4 2490.7 2380 2601.7 2477.8
2411.3 2416.5 2450.6 2447.6 2572.6 2654.5 2591.5 2565.3 2562.5 2653.5
2627.2 2514 2455.2 2587.7 2434.6 2573.6 2590.7 2581.7 2450 2496.3 2427
2588.5 2668.8 2570.1 2546.1 2510 2588.2 2584.5 2528.3 2565.8 2526 2599.6
2529.5 2585 2561.7 2525.1 2636.8 2556.6 2583.9 2582.6 2592.3 2428.2 2440.2
2460.6 2407 2427 2450.5 2406.1 2437.6 2453.9 2438.1 2405.6 2447.1 2503.7];

stvttotal = [2380 2391 2405.6 2406.1 2407 2411.3 2416.5 2417.6 2427 2427
2428.2 2434.6 2437.6 2438.1 2440.2 2447.1 2447.6 2450 2450.5 2450.6 2453.4
2453.9 2455.2 2460.6 2468.7 2477.8 2479.7 2486.2 2486.6 2490 2490.7 2490.7
2496.3 2503.7 2510 2514 2525.1 2526 2528.3 2529 2529.5 2546.1 2553.1 2556.6
2561.7 2562.5 2565.3 2565.8 2567 2570.1 2572.6 2573.6 2581.7 2582.6 2583.9
2584.1 2584.5 2585 2587.7 2588.2 2588.5 2590.7 2591.5 2592.3 2593.3 2599.6
2601.7 2602.6 2616.5 2623.7 2627.2 2636.8 2653.5 2654.5 2668.8];

smv = [491.4 496 499.7 503 515 515.7 517.2 522.5 530.2 532.3 533.1 533.6
539.6 543.3 545.7 548.7 550.3 553.5 554.8 559 561.2 562.7 564 567.5 570.4];

smvttotal = smv;

vardeforall = input('Hur stor skall belastningen vara på pappersremsorna (i
N)? ');

% Här anges hur stora resultatmatriserna kommer att vara
storavikter = zeros(ceil((vardeforall*1000/9.82)/mean(stv))+1,5);
nrstoravikter = zeros(ceil((vardeforall*1000/9.82)/mean(stv))+1,5);
smavikter = zeros(4,5);
nrsmavikter = zeros(4,5);

text= ['          stång1          stång2          stång3          stång4
stång5'];

stangvikt = [1714.5 1715.9 1711.5 1700.9 1720.2];

% Slingan för utväljande av vikterna till alla fem stänger börjar här

for aa = 1:5

varde = vardeforall*1000/9.82 - stangvikt(aa);
tiondel=floor(rem(varde,mean(stv))/mean(smv));
svector=zeros(1,4);
```

```

% Följande loop väljer ut de mindre vikterna
if rem(varde,mean(stv)) <= 4.5*mean(smv)

    n = floor(floor((varde/mean(stv))/2));
    m = ceil(floor((varde/mean(stv))/2));
    ssum = 0;

    if rem(varde,mean(stv)) >= 0.5*mean(smv)

        v3=0;
        v4 = 1;

        while v3 ~= v4

            if tiondel == 0
                tiondel = 1;
            end
            svector = ceil(length(smv)*rand(1,tiondel));
            AA=svector'*svector;
            AAs=AA.^(0.5);
            v4=0;
            for i=1:tiondel-1
                for j=(i+1):tiondel
                    if svector(i) == AAs(i,j)
                        v4 = 1;
                    end
                end
            end

            if v4 == 0
                break
            end

        end

        for v2 = 1:tiondel
            ssum=ssum+smv(svector(v2));
            smavikter(v2,aa) = smv(svector(v2));
        end

        I = eye(length(smv));
        for a = 1:tiondel
            I(svector(a),svector(a)) = 0;
        end
        newsmv = I * smv';
        smv = zeros(1,(length(smv)-tiondel));
        b=1;
        for a = 1:(length(newsmv))
            if newsmv(a) ~= 0
                smv(b) = newsmv(a);
                b= b+1;
            end
        end

    end

end

digit=(varde-ssum)/(floor(varde/mean(stv)));

```

```

malvarde = n*digit;

else

    digit=varde/(ceil(varde/mean(stv)));
    % Nedan anges hur många stora vikter som skall användas under
    % första och andra urvalsloopen (n och m)
    n = floor(ceil(varde/mean(stv))/2);
    m = ceil(ceil(varde/mean(stv))/2);
    malvarde=n*digit;

end

% Här anges de olika räknarnas värde till första urvalet

c=0;
lee = length(stv)+1;
z = zeros(1,n-1);
vector = zeros(1,n);

% Denna for-loop gör att räknaren får formen 123456... osv

for a=1:(n-1)
    for b=1:(a-1)
        z(a)=z(a)+b*lee^(a-b);
    end
    c=c+a*lee^(n-a-1);
end

finalflag=0;

% I följande while-loop påbörjas första hälften av utväljandet av de
% önskade stora vikterna (n stycken)

while finalflag == 0

    for a =1:n-1

        vector(a)=floor(c/(lee^(n-a-1))-z(a));

    end

    for a = 1:(n-1)

        if vector(a) >= (lee+a-n)

            vector(a-1) = vector(a-1) + 1;

            for i = a:(n-1)

                vector(i)=vector(i-1)+1;

            end

            c=0;
            z = zeros(1,n-1);

            for i = 1:(n-1)

                for j=1:(i-1)

```

```

        z(i)=z(i)+vector(j)*lee^(i-j);
    end
    c=c+vector(i)*lee^(n-i-1);
end
for a =1:n-1
    vector(a)=floor(c/(lee^(n-a-1))-z(a));
end
break
end
end
for a=(vector(n-1)+1):(lee-1)
    vector(n)=a;
    flag = 0;
    summa=0;
    AA=vector'*vector;
    AAs=AA.^(0.5);
    for i=1:n
        for j=(i+1):n
            if vector(i)==AAs(i,j)
                flag = 1;
            end
        end
        summa = summa + stv(vector(i));
    end
    if flag == 0
        if summa > malvarde-1
            if summa < malvarde+1
                finalflag = 1;
            end
        end
    end
    if finalflag == 1
        break
    end
end
c=c+1;
end
vector
svector
for a = 1:n
    storavikter(a,aa) = stv(vector(a));
end

```

```

I = eye(lee-1);
for a = 1:n
    I(vector(a),vector(a)) = 0;
end
newstv = I * stv';
stv = zeros(1,(lee-1-n));
b=1;
for a = 1:(lee-1)
    if newstv(a) ~= 0
        stv(b) = newstv(a);
        b = b+1;
    end
end

% Räkna värde för andra halvan av väljandet

malvarde=m*digit;
c=0;
lee = length(stv)+1;
z = zeros(1,m-1);
vector = zeros(1,m);

for a=1:(m-1)
    for b=1:(a-1)
        z(a)=z(a)+b*lee^(a-b);
    end
    c=c+a*lee^(m-a-1);
end

% Påbörjar andra halvan av utväljandet (m stycken stora vikter)

finalflag=0;

while finalflag == 0

    for a =1:(m-1)

        vector(a)=floor(c/(lee^(m-a-1))-z(a));

    end

    for a = 1:(m-1)

        if vector(a) >= (lee+a-m)

            vector(a-1) = vector(a-1) + 1;

            for i = a:(m-1)

                vector(i)=vector(i-1)+1;

            end

            c=0;
            z = zeros(1,m-1);

            for i = 1:(m-1)

                for j=1:(i-1)

```

```

        z(i)=z(i)+vector(j)*lee^(i-j);
    end
    c=c+vector(i)*lee^(m-i-1);
end
for a =1:m-1
    vector(a)=floor(c/(lee^(m-a-1))-z(a));
end
break
end
end
for a=(vector(m-1)+1):(lee-1)
    vector(m)=a;
    flag = 0;
    summa=0;
    AA=vector'*vector;
    AAs=AA.^(0.5);
    for i=1:m
        for j=(i+1):m
            if vector(i)==AAs(i,j)
                flag = 1;
            end
        end
        summa = summa + stv(vector(i));
    end
    if flag == 0
        if summa > malvarde-1
            if summa < malvarde+1
                finalflag = 1;
            end
        end
    end
end
if finalflag == 1
    break
end
end
end
c=c+1;
end
for a = n+2:n+m+1
    storavikter(a,aa) = stv(vector(a-n-1));
end

```

```

I = eye(lee-1);
for a = 1:m
    I(vector(a),vector(a)) = 0;
end
newstv = I * stv';
stv = zeros(1,(lee-1-m));
b=1;
for a = 1:(lee-1)
    if newstv(a) ~= 0
        stv(b) = newstv(a);
        b = b+1;
    end
end
end

for i = 1:size(storavikter,1)
    for j = 1:size(storavikter,2)
        for k = 1:length(stvtotal)
            if stvtotal(k) == storavikter(i,j)
                nrstoravikter(i,j) = k;
            end
        end
    end
end

for i = 1:4
    for j = 1:5
        for k = 1:length(smvtotal)
            if smvtotal(k) == smavikter(i,j)
                nrsmavikter(i,j) = k;
            end
        end
    end
end

% Resultatet läggs i en matris som innehåller vikternas storlek och
% en matris som innehåller vikternas nummer och presenteras sedan i
% samma ruta som programmet körs i

format bank
diary data

disp('
                                STORA VIKTER'),disp(' '),disp('
'),disp(text),disp(' '),disp(storavikter)

disp(' '),disp(' '),disp('
                                SMÅ
VIKTER'),disp(' '),disp(' '),disp('
                                stång1        stång2
stång3        stång4        stång5'),disp(' '),disp(smavikter)

disp(' '),disp(' '),disp('
                                SUMMA')

disp(' '),disp(sum(storavikter)+sum(smavikter))

disp(' '),disp('
                                TOTALT (vikter + stång)')

disp(' '),disp(sum(storavikter)+sum(smavikter)+stangvikt)

disp(' '),disp(' '),disp('
                                STORA
VIKTER'),disp(' '),disp(' '),disp('
                                stång1        stång2
stång3        stång4        stång5'),disp(' '),disp(nrstoravikter)

```

```
disp(' '),disp(' '),disp('          SMÅ
VIKTER'),disp(' '),disp(' '),disp('          stång1          stång2
stång3          stång4          stång5'),disp(' '),disp(nrsmavikter)

disp(' ');disp(' ');disp(' ');
```



## Bilaga 2

### data.m

```
% Denna fil gör att jag med några få moment kan läsa in mätdata
% specifikt för x, y och z riktningen i tre separata datafiler

% Läser in data från mätresultat erhållna från programmet WindST

[file,patt]=uigetfile('c:\matlab\bin\*.dat','Get file');

eval(['load ' file]);

namn=file(1:length(file)-4);
matris=eval(namn);

% Läser x, y och z värdena och lägger dem i tre skilda filer

u_matris=matris(1:16,:);
v_matris=matris(17:32,:);
w_matris=matris(33:48,:);

save c:\matlab\bin\reslx u_matris
save c:\matlab\bin\resly v_matris
save c:\matlab\bin\reslz w_matris
```



## Bilaga 3

### tillansys.m

```
% Scriptfil för att skriva en textfil om nodernas förskjutningar i  
% x,y och z riktning vilket sedan skall matas in i Ansys.
```

```
clear all;  
zf=input('Vill du läsa in z-komponenten,n=NEJ, enter=JA: ','s');  
if isempty(zf)  
[filnamnx,pat]=uigetfile('c:\matlab\bin\*x.mat','Load Xdisp');  
[filnamny,pat]=uigetfile('c:\matlab\bin\*y.mat','Load Ydisp');  
[filnamnz,pat]=uigetfile('c:\matlab\bin\*z.mat','Load Zdisp');  
  
else  
[filnamnx,pat]=uigetfile('c:\matlab\bin\*x.mat','Load Xdisp');  
[filnamny,pat]=uigetfile('c:\matlab\bin\*y.mat','Load Ydisp');  
end;  
%-----X matrisen-----  
  
filnamnx=lower(filnamnx);  
eval(['load ' filnamnx]);  
xmat=u_matris;  
r=input('Hur många rader/kolumner ska tas bort?: ');  
  
%-----loop för att ta bort rader/kolumner!!  
  
if r>0  
xmat=xmat(2*r:16-r,2*r:16-r);  
end;  
  
X=flipud(xmat); %---- skiftar matrisen från topp till botten.  
fraga=input('Vad ska filen heta? ','s');  
t0=clock;fl=flops;  
fra=fopen('fraga','w'); % öppnar fil att skriva till  
[m,n]=size(X);  
nod=1:m*n;  
X=reshape(X,1,m*n);  
V=[nod;X];  
fprintf(fraga,'UX%g=%6.4f\n',V);  
  
%----- Y-matrisen-----  
  
filnamny=lower(filnamny);  
eval(['load ' filnamny]);  
ymat=v_matris;  
  
%-----loop för att ta bort rader/kolumner!!  
  
if r>0  
ymat=ymat(2*r:16-r,2*r:16-r);  
end;  
  
Y=flipud(ymat);  
fra=fopen('fraga','w');  
[m,n]=size(Y);
```

```

nod=1:m*n;
Y=reshape(Y,1,m*n);
V=[nod;Y];
fprintf(fraga,'UY%g=%6.4f\n',V);

%-----Z-matrisen-----

filnamnz=lower(filnamnz);
eval(['load ' filnamnz]);
zmat=w_matris;

%----loop för att ta bort rader/kolumner!!

if r>0
zmat=zmat(2*r:16-r,2*r:16-r);
end;

Z=flipud(zmat);
fra=fopen('fraga','w');
[m,n]=size(Z);
nod=1:m*n;
Z=reshape(Z,1,m*n);
V=[nod;Z];
fprintf(fraga,'UZ%g=%6.4f\n',V);

end;

disp(sprintf('Nu är filen skriven och heter: %s',fraga));
timeflop(fraga,t0,f1);
end;

```

## Bilaga 4

### kryp1.mac

!-----Detta program beräknar i ANSYS, med indata från DSP mätningen, ett tredimensionellt förskjutningsfält-----

```
/BATCH
/FILENAME,fall22ny
/PREP7
```

```
ET,1,SHELL43
R,1,0.1      ! PLATE THICKNESS = 1
```

!----- LINEAR ELASTIC MATERIAL PARAMETERS -----

```
EX1=6.42
EY1=84.5
EZ1=6.42
NUXY1=0.09
NUXZ1=0.29
NUYZ1=0.09
GXY1=9
GYZ1=9
GXZ1=2.48
```

```
MP,EX,1,EX1
MP,EY,1,EY1
MP,EZ,1,EZ1
MP,GXY,1,GXY1
MP,GXZ,1,GXZ1
MP,GYZ,1,GYZ1
MP,NUXY,1,NUXY1
MP,NUXZ,1,NUXZ1
MP,NUYZ,1,NUYZ1
```

!----- NODE GENERATION -----

```
N,1,0,0,0,0,0,0,
N,14,0,30,0,0,0,0,0,
N,183,30,0,0,0,0,0,0,
NPLOT
N,196,30,30,0,0,0,0,0,
FILL,1,14,12
FILL,183,196,12
FILL,1,183,12,15,14
RP14,1,1,,1
TYPE,1,
MAT,1,
REAL,1,
ESYS,0,
```

!----- ELEMENT GENERATION -----

```
EN,1,1,15,16,2
RP13,1,1,1,1,1
```

```

EN,14,15,29,30,16
RP13,1,1,1,1,1
EN,27,29,43,44,30
RP13,1,1,1,1,1
EN,40,43,57,58,44
RP13,1,1,1,1,1
EN,53,57,71,72,58
RP13,1,1,1,1,1
EN,66,71,85,86,72
RP13,1,1,1,1,1
EN,79,85,99,100,86
RP13,1,1,1,1,1
EN,92,99,113,114,100
RP13,1,1,1,1,1
EN,105,113,127,128,114
RP13,1,1,1,1,1
EN,118,127,141,142,128
RP13,1,1,1,1,1
EN,131,141,155,156,142
RP13,1,1,1,1,1
EN,144,155,169,170,156
RP13,1,1,1,1,1
EN,157,169,183,184,170
RP13,1,1,1,1,1

!----- LOAD FILE CONTAINING MEASURED DEFORMATIONS -----

/input,fall22ny,def

!----- APPLY BOUNDARY CONDITIONS -----

/input,set_boun,mac
CHECK

!----- SAVE MODEL -----

SAVE
FINISH

/SOLU
NALL
EALL

!-----SET ANALYSIS TYPE TO STATIC -----

ANTYPE,0

!--- ACTIVATE LARGE DEFORMATION ANALYSIS OPTION -----

NLGEOM,1

!----- APPLY PRESCRIBED DEFORMATIONS IN 10 STEPS -----

NSUBST,10
CSYS,0
OUTPR,,
CNVTOL,F,1.0,0.01,0,1.0,
EQLV,FRONT
NEQIT,60
SOLVE

```

SAVE  
FINISH

!----- END OF ANALYSIS -----

/EOF





## Bilaga 5

### resultatDSP.m

```
% Program för beräkning av medeltöjningen i papperet ur lokala
töjningsvärden från nod till nod beräknade i ANSYS med krypl.mac

[file,patt]=uigetfile('c:\matlab\bin\*.lis','Get file');% hämtar filen med
de lokala töjningsvärdena

eval(['load ' file]);

namn=file(1:length(file)-4);
matris=eval(namn);

% Skiljer värdena för töjningen i övre och undre sidan av papperet
u_matris1=matris(1:2:392,2);
v_matris1=matris(1:2:392,3);

u_matris2=matris(2:2:392,2);
v_matris2=matris(2:2:392,3);

% Beräknar töjningen från nod till nod i mitten av papperet
u_matris=(u_matris1+u_matris2)/2;
v_matris=(v_matris1+v_matris2)/2;

% Beräknar medeltöjningen i papperet och visar resultatet i %
disp(file)
disp('medeltöjning i MD är'),disp(mean(u_matris)*100)
disp('medeltöjning i CD är'),disp(mean(v_matris)*100)
```

