

Trä och fukt

– Mätmetoder för fuktrelaterade
dimensionsförändringar hos trä och deras
användbarhet, med två fallstudier inom
konservering



Sofie Simonson

Uppsats för avläggande av filosofie kandidatexamen i
Kulturvård, Konservatorsprogrammet
15 hp
Institutionen för kulturvård
Göteborgs universitet

2012:06



Trä och fukt
Mätmetoder för fuktrelaterade dimensionsförändringar
hos trä och deras användbarhet,
med två fallstudier inom konservering

Sofie Simonson

Handledare: Jonny Bjurman

Kandidatuppsats, 15 hp
Konservatorsprogrammet
Lå 2011/12

UNIVERSITY OF GOTHENBURG
Department of Conservation
P.O. Box 130
SE-405 30 Göteborg, Sweden

www.conservation.gu.se
Tel +46 31 7864700
Fax +46 31 786 47 03

Program in Conservation of Cultural Property
Graduating thesis, BA/Sc, 2012

By: Sofie Simonson
Mentor: Jonny Bjurman

Wood and moisture

Methods for measuring moisture-related dimensional changes of wood and their usefulness with two case studies in the field of conservation

ABSTRACT

This thesis deals with different methods for measuring moisture-related dimensional changes of wood. Typically relative humidity is measured to determine if the ambient climate around an object is harmful to it or not. Values between 40 to 65% RH are recommended for hygroscopic materials. To know how a wooden object actually reacts to changes in the surrounding environment requires methods that involve the object itself. Because of the wood anisotropy, differences in wood structure, finishes and other restraints, it is not always possible to predict the movements.

This paper addresses various measurement methods, primarily methods that have been tested in the field of conservation, with examples of their use. Topics that are discussed are how the methods work, what information they provide and their pros and cons. Two case studies provide detailed examples of some methods, first, the use of electric linear meters in the ceiling of Vänersborg church and second, weighing and shrinkage measurement with callipers on the warship Vasa.

The purpose was not to find the ultimate measurement method, it doesn't exist, but to explore different methods and their applications. All methods must be combined with measurements of RH and temperature to create a connection between cause and effect. Different methods give answers to different questions and may need to be combined with each other. When selecting the method of measurement, one must also question the usefulness of the information in relation to any damage to the object.

Title in original language: Trä och fukt – Mätmetoder för fuktrelaterade dimensionsförändringar hos trä och deras användbarhet, med två fallstudier inom konservering

Language of text: Swedish

Number of pages: 51

Keywords: Wood, moisture, dimensional change, measurement techniques, preventive conservation, the Vasa museum, the church of Vänersborg.

ISSN 1101-3303

ISRN GU/KUV—12/06—SE

Förord

När jag äntligen har nått målet vill jag tacka alla som hjälpt mig på vägen.

Tack Roger Nyqvist för all peppning genom åren och särskilt för hjälpen med att komma igång med detta arbete. Tack till min handledare Jonny Bjurman och till Margareta Ekroth Edebo på Institutionen för kulturvård, samt till Charlotta Bylund Melin, doktorand vid samma institution, för genomläsning och värdefulla synpunkter längs vägen.

Naturligtvis vill jag också tacka mina chefer och arbetskamrater Leif Berg och David Edvardson på K-Konservator, för information kring mätningarna i Vänersborg, för allt stöd och för att ni gav mig tid att skriva!

Till mina forna arbetskamrater Emma Hocker, konservator och Ove Olsen, konserveringstekniker på Vasamuseet: Tack för att ni orkade svara på alla mina mail och letade information åt mig!

Sist men inte minst vill jag tacka min sambo Mikael för att du stod ut med mig och för att du gav mig mat!

Sofie Simonson, 15 januari 2012

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	9
Bakgrund	9
Frågeställningar	9
Syfte och målsättning	9
Metod	9
Tidigare forskning	10
Avgränsningar	10
Källmaterial och källkritik	10
2. TRÄ – ETT HYGROSKOPISKT MATERIAL	11
<i>Det levande trädets uppbyggnad</i>	11
<i>Fuktkvot, fibermättnadspunkt och jämviktskurvor</i>	11
<i>Formförändringar hos trä</i>	12
Svällning och krympning	12
Deformation	13
Förändras trä med åldern?	14
<i>Rekommenderat klimat för kulturhistoriska föremål av trä</i>	14
Bemålat trä	15
3. GENOMGÅNG AV MÄTMETODERNA	16
<i>Enkla mätmetoder</i>	16
Manuell dimensionsmätning	16
Gravimetrisk metod	16
<i>Elektriska fuktkvotsmätare</i>	17
Resistiva mätare	17
Kapazitiva mätare	18
<i>Punktmätning med elektriska töjningsmätare</i>	18
Linjära töjningsmätare eller linjärgivare	18
Trådtöjningsmätare	20
<i>Punktmätning med optiska töjningsmätare</i>	20
Fiber Bragg Grating Sensors	20
<i>Helfältsmätning med fotografiska metoder</i>	22
Time-lapse foto	22
<i>Helfältsmätning med laseroptiska metoder</i>	23
Speckelfotografi	23
Holografi	23
ESPI/ DSPI	24
Shearografi eller Shear ESPI	26
<i>Mätning av fukt med ljudvågor</i>	26
Akustisk emission	26
Ultraljud	27

Mätning av fukt med elektromagnetisk strålning	27
Radiofrekvent spektroskopi.....	27
Mikrovågor.....	28
Infraröd termografi	28
NIR	28
NMR	28
4. EXEMPEL FRÅN TAK I VÄNERSBORGS KYRKA	30
<i>Bakgrund</i>	30
<i>Mätning med linjärgivare och spänningslogger</i>	30
Mätutrustning.....	30
Tolkning av mätvärdena.....	31
Slutsats.....	32
5. EXEMPEL FRÅN MÄTNINGAR PÅ VASASKEPPET	33
<i>Bakgrund</i>	33
Den nya klimatanläggningen installeras	33
Träets nedbrytning och PEG-halt	33
<i>Vägning</i>	34
Hur mätvärdena användes	34
Vad diagrammen visar.....	35
Kommentar	35
<i>Krympmätningar</i>	36
Tolkning av diagrammen	36
Betydelsen av mätpunkternas placering för typen av krympkurva	38
Kommentar och vidare undersökningar	39
6. DISKUSSION OCH SLUTSATSER	40
Mätmetoderna.....	40
Praktisk tillämpning - jämförelser mellan metoderna	40
Felkällor och problem.....	41
Kommentar till fallstudierna.....	42
7. SAMMANFATTNING	44
Trä och fukt	44
Mätmetoderna	45
Fallstudierna	46
BILDFÖRTECKNING	47
KÄLL- OCH LITTERATURFÖRTECKNING	48
Otryckta källor	48
Tryckta källor och litteratur	48
BILAGA 1 Sektionsritning av Vasa och klimatdiagram	
BILAGA 2 Viktdiagram för träbitar på Vasa	
BILAGA 3 Diagram från krympmätningar på Vasa	

1. Inledning

Bakgrund

När jag arbetade med klimatfrågor på Vasamuseet väcktes intresset för alternativ eller komplement till att mäta luftens relativa fuktighet(RF). Normalt mäts variationer i den relativa fuktigheten för att ta reda på om miljön som ett föremål vistas i, är lämplig eller inte. Värden mellan 40-65% RF rekommenderas för hygroskopiska material.¹ Att mäta luftens RF är ju möjligt men är inte tillräckligt för att avgöra hur föremålet egentligen reagerar. Hur mycket rör sig träet egentligen och hur snabbt reagerar det på förändringar i RF? För att ta reda på det, krävs andra mätmetoder som involverar själva föremålet. På Vasamuseet har man sedan 1960-talet gjort så kallade krympmätningar med skjutmått mellan stift inslagna i skeppet. Ursprungligen för att hålla koll på skeppets upptorkning under och efter konserveringen med polyetylenglykol(PEG). Mätningarna har dock med tiden även fått funktionen som en kontroll av hur träet reagerar på omgivande klimatförändringar. Man väger också träbitar ombord regelbundet av sistnämnda anledning.

När jag sedan arbetade hos K-Konservator, målerikonserveringsfirma i Göteborg, kom jag i kontakt med ytterligare en metod, där rörelser i trä mättes med elektriska linjärgivare. Där gjordes mätningar av hur gliporna mellan takbrädorna i Vänersborgs kyrka förändrades med förändringar i klimatet.

Båda dessa exempel gav mig insikter i att det finns flera metoder att mäta den relativa fuktighetens påverkan på föremål. De flesta metoder som involverar själva föremålet och dess reaktioner på variationer i RF, har främst används i olika tester och i vetenskapliga undersökningar och är inte allmänt använda. Jag blev dock nyfiken på att veta mer om olika metoder och hur de skulle kunna användas.

Frågeställningar

- Vilka egenskaper har trä som påverkar hur det rör sig?
- Vilka metoder har testats för mätning av dimensionsförändringar när det gäller kulturhistoriska föremål av trä?
- Vilka är metodernas begränsningar och fördelar? Till exempel om de bara mäter lokala rörelser eller hela formförändringar, ytliga förändringar eller på djupet.
- Vilka är möjliga att använda rent praktiskt? Till exempel om utrustningen är portabel och hur kunskaps- och kostnadskrävande den är.
- Vad vinner man på detta jämfört med att bara mäta luftens RF?

Syfte och målsättning

Mitt syfte är att belysa metoder för mätning av fuktrelaterade förändringar hos trä, som komplement till att mäta luftens RF. Mätmetoderna kräver ofta kunskaper som går utanför en konservators normala kompetens, men det jag velat göra är att försöka förklara metodernas principer och ge exempel på användning, så att det blir möjligt för en konservator att avgöra när en metod kan vara lämplig.

Målsättningen är med andra ord att ge läsaren insikter i de olika mätmetodernas funktion och därmed deras potentiella användning.

Metod

Jag har använt mig av litteraturstudier för att finna exempel på olika metoder som använts, eller i vissa fall som skulle kunna användas, på kulturhistoriska föremål. De fulltextdatabaser

¹ Thomson, G. (1978) s. 87.

man som student har tillgång till via universitetsbibliotekets hemsida, har varit ovärderliga, då få av artiklarna varit tillgängliga i Sverige. Det har dock inneburit att jag säkert missat intressanta artiklar, som inte varit nedladdningsbara. Att beställa artiklar från utlandet kostar en del, vilket gör att jag undvikit det, om jag inte varit säker på att artikeln tillför något viktigt. Mätningarna som utförts på Vasaskeppet och de i taket på Vänersborgs kyrka, kommer att användas som studieexempel.

I en inledande del behandlar jag träet som material och dess egenskaper, främst i förhållande till RF och tar upp vanliga begrepp och termer. Därefter går jag igenom hur olika mätmetoder fungerar, med exempel på tillämpning som jag funnit i litteraturen. I en tredje del tas de två fallstudierna upp från Vänersborgs kyrka och Vasamuseet. Uppsatsen avslutas med en diskussion.

Tidigare forskning

Inte mycket forskning har gjorts på området när det gäller att utvärdera olika mätmetoder. Dulieu-Barton et al. har gjort en genomgång av mätmetoder i artikeln: *Deformation and strain techniques for the inspection of damage in works of art* från 2005.² En genomgång av metoder som passar för fuktmätningar i väggar i kulturhistoriska byggnader finns i artikel: *Techniques for monitoring moisture in walls* av S. E. Pinchin från 2008.³ Dessa artiklar tar även upp mätmetoder för andra material än trä, särskilt då puts och sten. Från trätorkningsområdet hittade jag rapporten: *Fuktkvotsmätare för träindustrin: En kartläggning av metoder för mätning av fuktkvoter i intervallet 7-18 fuktkvotprocent* av T. Vikberg från 2010.⁴

Avgränsningar

Metoderna som undersöks är metoder tillämpbara på föremål av trä. De flesta har testats på kulturhistoriska föremål, men några andra metoder som kanske skulle kunna vara tillämpbara, har tagits med. Urvalet bygger till stor del på de metoder jag har lyckats hitta. Metoder som innebär stora ingrepp i föremålet eller är mycket förstörande undersöks inte.

Källmaterial och källkritik

Källmaterialet består till största delen av vetenskapliga artiklar, både inom konserveringsområdet och inom träforskningen. Artiklarna har överlag varit på en hög, vetenskaplig nivå, ofta med flera sidor av matematiska formler och diagram som jag, med mina grundkunskaper, inte kunnat förstå. De har även innehållit specialtermer och begrepp på engelska, som det har tagit tid att hitta de svenska motsvarigheterna till. Jag kan inte garantera att jag förstått allting korrekt. Särskilt svårt har det varit att förstå hur mätutrustningen egentligen fungerar och hur tolkningen av resultaten går till. I uppsatsen har jag bara tagit med den information som jag anser mig ha förstått. Värderingen jag gör av metoderna bygger också delvis på min subjektiva tolkning av vad jag förstått av metodernas användning.

Flera av metoderna är endast testade på pilotstadiet och utrustning som är anpassad för mätningar på kulturhistoriskt värdefulla föremål, finns inte att tillgå kommersiellt. Det innebär också att det endast är ett fåtal personer som testat metoderna och det kan därför vara svårt att värdera resultaten. Metoderna har helt enkelt inte testats tillräckligt och resultaten har sällan granskats kritiskt.

² Dulieu-Barton et al. (2005).

³ Pinchin, S. E. (2008).

⁴ Vikberg, T. (2010).

2. Trä – ett hygroskopiskt material

Det levande trädets uppbyggnad

Trädets stam består, utifrån och in, av ytterbark, innerbark (bast), kambium, ytved (splint), kärnved och märmg.

Ytterbarken består av döda celler och är trädets skyddande skikt, medan *innerbarken* eller basten består av levande celler.⁵

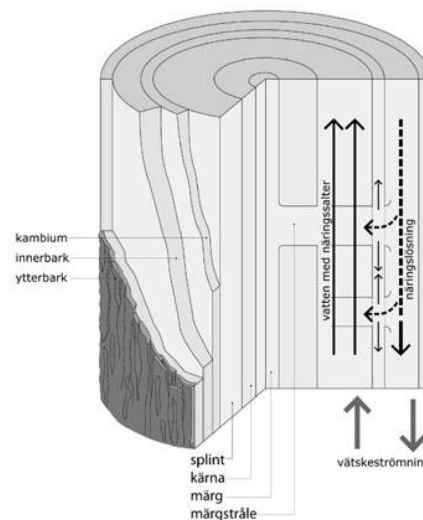
Innanför barken ligger det tunna *kambiet* där trädets tillväxt sker genom celledelning under sommar och höst. Under sensommaren blir de nya cellernas väggar allt tjockare innan tillväxten upphör för året. Detta syns i veden som en mörkare årsring, i synnerhet hos barrträd. Dessa skillnader i veden kallas vårved och höstved.⁶ Genom kambiet fördelas även den näringslösning som skapas i fotosyntesen i barren eller bladen.

Veden ser olika ut hos barrträd och lövträd. Barrträden har en enklare uppbyggnad och består nästan helt av vedceller (trakeider) samt har hartskanaler. Lövträden har en mer komplicerad uppbyggnad med stor variation mellan arterna. De har istället för trakeider kärl för att klara vattenförsörjningen under sommaren när träden har löv.

Veden består av kärnved och ytved. I den levande *ytveden* sker transporten av vatten och näringsämnen, från rötterna upp genom trädet till löv och barr där fotosyntesen sker. Den inre delen, *kärnveden*, bildas när de levande cellerna efterhand dör. Stärkelsen försvinner och istället sker en inlagring av hartser hos barrträden och färg-, garvämnen, gummi med mera hos lövträden. Kärnveden får därmed en mörkare färg hos flera trädslag. Vattentransporten hämmas och kärnveden innehåller mindre vatten än ytveden.

Veden innehåller även märmgstrålar som löper radiellt från innerbarken mot trädets märmg. *Märmgen* som finns i stammens centrum har en relativt liten diameter och består av celler som lagrar näring.⁷

Kärnveden uppstår först när trädet uppnått en viss ålder. För tall först efter 30-40 år. Inlagringen av hartser eller garvämnen i de döda cellerna, gör kärnveden mer motståndskraftig mot svampangrepp. Den är också mycket mindre hygroskopisk än ytveden.⁸



Figur 1. Trädstammens uppbyggnad.

Fuktkvot, fibermättnadspunkt och jämviktskurvor

Fuktkvoten anger mängden vatten i organiska material och uttrycks i % vatten av ett materials torra massa. Fuktkvoten har betecknats u eller MC (moisture content).

⁵ Sågvall, C. (1961), s. 8

⁶ Björdal, C. (1999), s. 115

⁷ Sågvall, C. (1961) s. 4-7

⁸ Ternstedt, E. (1976), s. 12-13

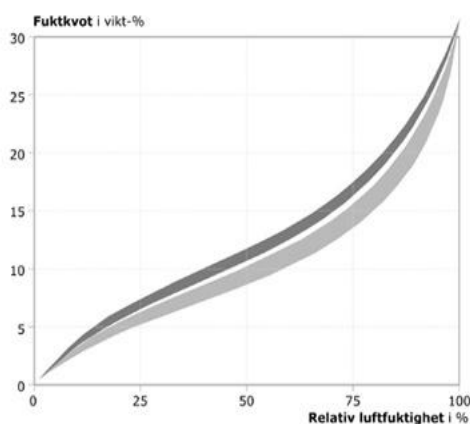
När ett träd är nyfällt är alla hålrum i och mellan cellerna fyllda med vatten liksom cellväggarna. Träet är mättat på vatten. Det vatten som finns i hålrummen kallas för *fritt vatten* och det i cellväggarna för *bundet vatten*.⁹

Vid torkning av virket avgår först det fria vattnet som rör sig inifrån och ut från cell till cell.¹⁰ Detta sker med kapillärkraft.¹¹ När allt fritt vatten avgått men det bundna är kvar, har träet nått *fibermättnadspunkten* (FMP). Detta sker vid en fuktkvot på 25-30%, beroende på träslag.¹² Vid torkning eller uppfuktning över FMP sker ingen formförändring hos träet.

Vid fortsatt torkning under FMP sker vattenavgången genom diffusion¹³ och träet börjar krympa. Så kallat lufttorrt virke har en fuktkvot på 15-18%, medan möbler och inredning i normal rumstemperatur ligger på 6-8%.¹⁴

Det är förändringar i fuktkvoten som orsakar formförändringar hos träföremål. Den exakta mängden vatten i träet beror på det omgivande klimatet, då den relativa fuktigheten och fuktkvoten har ett starkt samband. När ett träföremål förvaras i en konstant relativ fuktighet under en längre tid kommer trädets och luftens vatteninnehåll att uppnå en jämvikt med varandra. Träet uppnår en jämviktsfuktkvot, u_{jv} eller EMC (Equilibrium Moisture Content).

Jämviktsfuktkvotens förhållande till den relativa fuktigheten följer en ickeinjär kurva, sorptionskurvan. Kurvan är inte helt oberoende av temperaturen, men den skillnaden är liten i jämförelse med hur skillnaden i RF påverkar jämviktsfuktkvoten. Kurvan ser också lite olika ut för om träet tar upp fukt eller avger fukt. Figur 2 visar både kurvan för desorption (övre) och kurvan för adsorption (nedre) vid 20°C. Formerna är alltid densamma, men värdena skiljer sig åt något mellan olika träslag.¹⁵



Figur 2. Schematisk bild över desorptions- och adsorptionskurvan för trä vid 20°C.

Formförändringar hos trä

Svällning och krympning

Trä är anisotropt, det vill säga att det krymper och sväller olika mycket i olika riktningar. Formförändringen hos ett trästycke beror därför delvis på hur det är sågat ur stammen: axiellt, radiellt eller tangentiellt. Det axiella eller längsgående snittet, som följer fiberriktningen, är det mest stabila. Därefter kommer radialsnittet som går i samma riktning som märkestrålarna. Det mest föränderliga snittet är tangentiellsnittet, som går längs med årsringarna. (Se figur 3)

Många faktorer påverkar dock trädets formförändring. Splintved eller kärnved, halten höstved och vårved, hur mycket kvistar det finns i träet och om det finns tillväxtstörningar.¹⁶

⁹ Ternstedt, E. (1976) s. 16.

¹⁰ Ternstedt, E. (1976) s. 16.

¹¹ Wiberg, P. (1998) s. 6.

¹² Ternstedt, E. (1976) s. 16.

¹³ Wiberg, P. (1998) s. 6.

¹⁴ Ternstedt, E. (1976) s. 19.

¹⁵ Ternstedt, E. (1976) s. 18.

¹⁶ Ternstedt, E. (1976) s. 19.

Vresved är till exempel en tillväxtstörning som ger mycket oregelbundna fiberriktningar. Träet kan också innehålla sprickor som uppstått vid tillväxten.¹⁷

Förhindrad formförändring

Variationer i RF ger upphov till ständiga rörelser i träet, vilket är påfrestande och skapar spänningar av både yttre och inre natur. Yttre hinder finns till exempel i sammansatta konstruktioner, som en altarpupp eller pannå, där delarna är hindrade att röra sig fritt. Där kan förändringar i RF ge kraftiga deformationer eller sprickbildningar. Träföremål kan även vara sammanfogade av delar med olika fiberriktning.

Inre hinder är fuktkvotsgradienter och träets anisotropa egenskaper. Fuktkvotsgradienter uppstår när olika delar av träet har olika fuktkvot. Vid en sänkning av RF kommer de yttre delarna att avge fukt fortare än de inre. Ytlagren kommer då att utsättas för en tjanjning när de hindras från att krympa av den ännu fuktiga kärnan, som i sin tur utsätts för kompression av de yttre delarna, som vill dra ihop sig. Efter en tid i samma RF, jämnar det ut sig och spänningen släpper. Vid mycket långsamma förändringar i RF uppstår normalt inte skadliga fuktkvotsgradienter.

Fuktkvoten kan också vara mycket olika i olika delar av en konstruktion. Inbyggda delar eller kraftiga delar där endast en sida har kontakt med den omgivande luften, tar förstas mycket längre tid på sig att nå jämvikt, än tunnare delar med god luftväxling omkring sig.

Träets anisotropa egenskaper kan man inte påverka och även små och långsamma förändringar av RF ger upphov till påfrestningar. Särskilt stor betydelse får det för cylindriska föremål, som är tagna ur stammen som helhet, till exempel rundskulpturer och träkolonner. Där följer årsringarna och därmed tangentialsnittet, mer eller mindre formen, vilket ofta ger upphov till stora sprickor.¹⁸

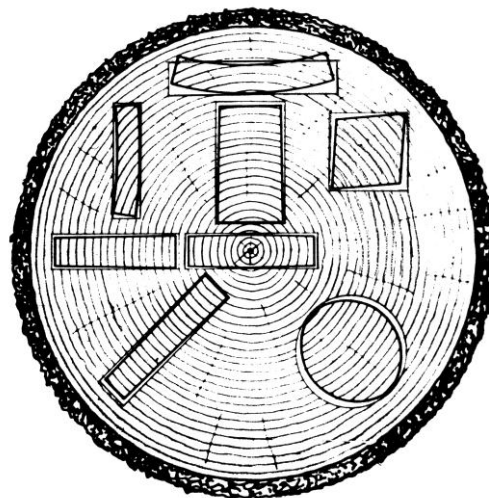
Deformation

Elastisk deformation kallas en tillfällig deformation hos ett föremål som går tillbaka när den deformerande kraften är borta. Blir kraften tillräckligt stor och föremålet når sin sträckgräns, uppstår *plastisk deformation*. Plastisk deformation går inte tillbaka utan blir permanent. För trä kan plastisk deformation uppstå vid stora eller hastiga förändringar i RF och kan till exempel leda till sprickor.¹⁹

Många typer av plastisk deformation uppstår redan vid torkningen av det färskt virket och kommer sedan att påverka hur träet rör sig i framtiden. Vanliga typer av deformation är kupighet, skevhet, flatböjning och kantkrokighet.

Kupigheten, beror på att träet krymper mer tangentiellt än radiellt. Vid en minskad fuktkvot vill årsringarna ”räta ut sig” och brädan kumar sig. Kupigheten beror också av hur brädan är sågad ur trästammen. (Se figur 3)

Skevhet kallas det när en bräda vrider sig som ett propellerblad. Det beror på att fibrerna i trädet inte växer rakt längs med stammens längdriktning utan lutar, eller vrider sig kring



Figur 3. Ett tvärsnitt genom en trädstam som visar hur träets anisotropa egenskaper påverkar deformationen vid torkning av träbitar, beroende på var i stammen de är tagna.

¹⁷ TräGuiden, Tillväxtstörningar. www.traguiden.se.

¹⁸ Jakiela, S. et al. Numerical modelling of moisture... (2008) s. 22.

¹⁹ Mecklenburg et. al. (1994) s. 465.

stammen. Fibrerna har också olika lutning i de yttre och inte delarna av stammen. Denna fiberlutning kan vara mer eller mindre påtaglig. Både skevhet och kupighet blir värre ju närmare mörgen en bräda är tagen på grund av att årsringsvinkeln är större där.

Flatböjning betyder att brädan, när den ligger ner, har uppåtböjda ändar. *Kantkrokighet* avser uppåtböjda ändar när brädan ligger på högkant, och liknar meden till en vagga. Dessa deformationer beror huvudsakligen på att trädet har växt på ett speciellt sätt och innehåller fiberstörningar och växtspänningar.²⁰

Trä är med andra ord långt ifrån ett homogent material och dess benägenhet eller möjlighet till formförändring är beroende av en mängd faktorer. Detta är anledningen till att det finns ett behov av att mäta de enskilda föremålen.

Förändras trä med åldern?

Uppfattningen att trä blir mer stabilt med tiden, har varit utbredd, men redan 1952 gjorde R. D. Buck en undersökning av tolv träbitar av varierande träslag och ålder. Åldersspannet varierade från en ett år gammal bit från en brädgård till en 3700 år gammal bit från en egyptisk sarkofag. Hans slutsats var att skillnaderna i att avge och ta upp fukt i förhållande till varierande RF, var små mellan bitarna. Med andra ord fann han inget stöd för att trä skulle bli mindre hygroskopiskt med tiden.²¹

Däremot kan andra förändringar ske med träet. R. D. Buck hänvisar till en undersökning av japansk cypress med en ålder av 250-1213 år från templet Horyuji i Japan. Teuichiro Kubo et. al. fann att densiteten verkade öka med åldern, men att förmågan att svälla vid fuktupptag, till och med var större hos det äldsta träet.²²

Mekanosorptiv krypning

När trä belastas under lång tid avtar med tiden dess styrka och belastningen kan leda till deformationer. Till exempel kan tunga böcker i en bokhylla, ge upphov till att hyllplanet med tiden bågna. Denna tidsberoende deformation kallas *krypning*.²³ När träet samtidigt som det belastas, utsätts för ett fluktuerande klimat och omväxlande tar upp och avger fukt, påskyndas processen. Detta fenomen kallas *mekano-sorptiv krypning*.²⁴ Ett så jämnt klimat som möjligt är därför att föredra.

Rekommenderat klimat för kulturhistoriska föremål av trä

Kring 50 % RF planar sorptionskurvan ut och förändringar i RF här, ger mindre förändringar i fuktkvoten hos organiska material och därmed i rörelserna. Detta är grunden till rekommendationen 45-55 % RF. Som en övre gräns räknas vanligen 65 eller 70 % RF eftersom risken för mögel och skadedjursangrepp ökar avsevärt vid höga fuktnivåer. En nedre gräns brukar sättas vid 35-40 % RF, då lägre nivåer leder till att materialen blir sköra och till olika uttorkningsskador.²⁵

Jakiela et. al. gjorde undersökningar på lindträ för att skapa en numerisk modell för fuktkvotsgradienten och den påfrestning den ger upphov till vid variationer i RF och temperatur. Målet var att hitta vilka förändringar i RF som kan tillåtas, utan att en mekanisk skada uppstår. Fokus låg alltså på att hitta området för den elastiska töjningen. Provbitarna var cylinderformade för att simulera skulpturers form och togs ur trä som lufttorkat i tre år. Fuktdiffusion, EMC, svällning/krympning, sträckgräns och brottgräns (styrka) undersöktes i förhållande till olika RF och förändringar av RF.

²⁰ Nordin, H. (2003) s. 12-13.

²¹ Buck, R. D. (1952).

²² Buck, R. D. (1952) not s. 43.

²³ Hoadly, R. B. (2000) s. 95.

²⁴ Morén T. & Sehlstedt-Persson, M. (1992) s. 96.

²⁵ Thomson, G. (1978) s. 87.

Undersökningarna visade att området kring 50 % är det mest optimala. Lindträ kan tolerera stegvisa förändringar i RF upp till 15 % i detta område, men utanför minskar det elastiska spannet avsevärt.²⁶

Mecklenburg et al. har gjort liknande undersökningar på ”cottonwood” (en poppelart), vit ek och amerikansk mahogny. Cottonwood visade sig klara ganska stora RF-förändringar, så länge det skedde mellan 35 och 60 % RF. Vid högre och lägre RF var de möjliga variationerna drastiskt lägre. Mätningarna utfördes i den tangentiella riktningen på trä som var förhindrat att röra sig fritt, det vill säga värsta tänkbara situation.²⁷

Båda dessa undersökningar utfördes på små provbitar och på obehandlat trä utan något ytskikt.

Bemålat trä

Få undersökningar har egentligen gjorts vad gäller klimatrekommendationer för bemålat eller ytbehandlat trä. En mycket vanlig skada är att färgen spricker och flagar av för att ytskiktet inte har hängt med i träets rörelser.

Mecklenburg et al. har gjort undersökningar av elasticiteten och svällningsmönstret hos hudlim, gesso och några oljefärger, vid olika RF. Kurvorna jämfördes sedan med kurvorna för cottonwood.

Deras resultat visade att om man utgår från 50 % RF skulle ett bemålat föremål tåla förändringar upp till 66 % RF, vilket är gränsen för vad träet klarar i den tangentiella riktningen. Vid en torkning skulle föremålet klara ner till 28 % RF, vilket är gränsen för vad gesson klarar i den tangentiella riktningen. Dessa gränser gäller för trä som kan röra sig fritt, att jämföra med gränserna för det förhindrade träet i avsnittet ovan.²⁸

Dessa undersökningar är dock gjorda på små prover och varje material är testat var för sig och sedan jämförda med varandra. Beräkningarna blir väldigt teoretiska och tar inte hänsyn till andra formförändringar hos träet än svällning och krympning. Effekten av att ytskiktet kan påverka upptag och avgivande av fukt hos träet finns inte heller med.

Andra faktorer som kan påverka om ytskikten spjälkar och flagar av, är hur väl bundna de är till träets yta och till varandra, samt mängden bindemedel. Träslag med lägre densitet är mer porösa och binder färgen bättre till sig. Formstabiliteten har förstås också betydelse, vilken skiljer mellan olika träslag och beror på hur träet är sågat ur stammen.²⁹

Mecklenburgs et al. slutsats är dock att det optimala klimatet ligger mellan 45-55 % RF på grund av att nästan alla material har den lägsta graden av respons på variationer i RF inom detta spann.

²⁶ Jakiela, S. et al. Numerical modelling of moisture... (2008).

²⁷ Mecklenburg, et al. (1994) s. 470.

²⁸ Mecklenburg et al. (1994) s. 472 ff.

²⁹ Mecklenburg et al. (1994) s. 480-481.

3. Genomgång av mätmetoderna

Enkla mätmetoder

Manuell dimensionsmätning

Den allra enklaste metoden för att synliggöra en storleksförändring är att mäta ett föremål eller en del av det, med manuella redskap som linjal eller skjutmått. Att trä är anisotropt kan enkelt konstateras genom att regelbundet mäta en träbits olika ledder, när den utsätts för förändringar i den relativa fuktigheten. Metoden kräver dock tydliga punkter att mäta mellan, till exempel kanter, en spricka eller stift inslagna i materialet. Att mäta hela föremål är svårt om de inte är små och plana. Med digitala skjutmått kan noggrannheten bli ganska hög och de finns även för invändiga mätningar, för till exempel mätning inuti en spricka.

Fördelar

- Metoden är enkel och kräver inga specialkunskaper
- Utrustningen är billig.
- Resultaten är enkla att tolka.
- Är normalt icke-förstörande.

Nackdelar

- Noggrannheten beror till stor del på val av mätutrustning och på noggrannheten hos personen som mäter.
- Kräver att någon är på plats och utför mätningarna regelbundet.
- För mätning mellan stift inslagna i träet, är metoden förstörande.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Krympmätningar på Vasaskeppet

På Vasamuseet används mätningar mellan metallstift inslagna i Vasaskeppets trä, som en kontroll av dimensionsförändringar. Metallstiften sitter i par som är inslagna på 40 ställen i Vasaskeppet. Se vidare under kapitel 5, s. 36.

Rörelsemätningar hos barkmålningar

Manuella mätningar användes av Smith et al. vid undersökningar av hur aboriginska barkmålningar snedvrider sig i en miljö med fluktuerande relativ fuktighet. Barkmålningarna lades på en skiva med ändträet placerat mot en bit plexiglas, som monterats vinkelrät mot skivan i ena änden. När den 5mm tunna barken tog upp fukt, började den vrida sig och ena hörnet vid plexiglaset reste sig. Denna förändring kunde mätas i mm mot plexiglaset. Samtidigt mättes RF och temperatur. Mätningarna utfördes en gång i veckan under ett år.³⁰

Gravimetrisk metod

Metoden utgör grunden för beräkning av fuktkvoten hos trä. Ett trästycke vägs före och efter torkning och den viktminskning som sker motsvarar den mängd vatten som fanns i träet. Efter en första vägning torkas trästycket i ugn i 100-103° C, tills träet nått en konstant vikt. Därefter beräknas fuktkvoten i procent enligt formeln:³¹

$$\frac{\text{vikt före torkning} - \text{torr vikt}}{\text{torr vikt}} \times 100$$

³⁰ Smith, N. et al. (2003) s. 71ff

³¹ Ternstedt, E. (1976) s. 16-17.

Det är en enkel och tillförlitlig metod som tidigt har använts inom trätorkningsindustrin, för att ta reda på när virket nått lämplig fuktkvot. Då sågades bitar ur en planka som prover. Metoden är således förstörande.

Detta förfarande är ju inte möjligt när det gäller kulturhistoriska föremål, men metoden kan användas som ett relativt mått utan att man behöver veta torrvikten. Om ett träföremål vägs regelbundet, samtidigt som den relativa fuktigheten mäts, får man information om hur föremålet reagerar med fluktuerande RF. Till exempel hur lång tid det tar för träet att reagera på en förändring i RF. Vågen måste ha hög noggrannhet och bör inte flyttas mellan vägningarna.

Ett annat alternativ är att använda referensbitar. Om dessa först torkas, så att man erhåller en torrsvikt, kan en fuktkvot beräknas för referensbitarna.

Fördelar

- Metoden är enkel och kräver inga specialkunskaper.
- Utrustningen är relativt billig.
- Ger korrekt använd mycket säkra resultat.
- Tillsammans med mätning av RF, får man en bild av i vilken takt föremålet tar upp och avger fukt i förhållande till förändringar i klimatet.

Nackdelar

- För att ta reda på en exakt fuktkvot får metoden räknas som förstörande och kan inte användas på kulturhistoriska föremål.
- Kräver att någon är på plats och utför mätningarna regelbundet.
- Vikten och fuktkvoten är enbart genomsnittliga mått, som inte säger något om fuktfördelningen i föremålet eller formförändringen.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Vägning på Vasaskeppet

Vägning av referensbitar används på Vasamuseet som en kontroll av förändringar i fukthalten och av klimatanläggningens funktion. Se vidare under kapitel 5, s.33.

Vägning av barkmålningar

Vid undersökningar av de aboriginiska barkmålningar som nämnts ovan, användes bland annat en våg för att ta reda på hur snabbt den ca 5mm tunna barken reagerade på förändringar i klimatet. En nutida barkmålning fick uppnå jämvikt under en vecka i 22°C och 50% RF. Därefter flyttades barkmålningen till en kammare med 30% RF och vikten dokumenterades under ett dygn tills vikten stabiliserade sig och en jämviktsfuktkvot var uppnådd. Efter att åter ha stabiliserats i 50% RF utfördes ett nytt test i 70% RF. Testet visade tydligt att barken genast började tappa i vikt i det torra klimatet och började öka i vikt efter ca tio minuter i det fuktiga klimatet. Barken reagerar med andra ord mycket snabbt på klimatförändringar och risken för färgresningar är stor om klimatet fluktuerar.³²

Elektriska fuktkvotsmätare

Resistiva mätare

Ett mycket vanligt, handhållet verktyg för att mäta fuktkvot i olika material. Används bland annat inom trätorkningsindustrin och byggsektorn. Genom att trycka in två stift i materialet

³² Smith, N. et al. (2003) s. 71ff.

och skicka elektrisk ström mellan dem, kan det elektriska motståndet genom materialet mätas. Ju högre vattenhalt desto lägre motstånd. Känsligheten är mycket hög och utrustningen måste kalibreras noga för det material man ska mäta i. Även om känsligheten är hög är noggrannheten inte särskilt hög. Förekomst av salter påverkar mätningarna, liksom temperatur och ojämnheter i materialet.³³

Kapazitiva mätare

Denna typ av mätare är den vanliga i sågverksindustrin.³⁴ Kapasivitet är ett mått på ett materials dielektriska konstant, det vill säga, dess förmåga att hålla ett elektriskt fält. Hos vatten är denna konstant mycket hög. Mätaren sänder en radiofrekvent signal genom materialet och styrkan hos signalen när den uppfattas av en mottagare, bestämmer fuktkvoten. Mätaren måste ha tät kontakt med föremålets yta och inträngningsförmågan är inte stor, endast några millimeter enligt Pinchin.³⁵

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Fuktkvotsmätare är ganska trubbiga instrument vars noggrannhet är för låg för att mäta små förändringar.

Mätningar på Vasaskeppet

Mätning med resistiva mätare har testats på Vasaskeppet. Då gjordes mätningarna mellan de permanent inslagna stiften som används för krympmätningar med skjutmått. På så sätt behövde inte instrumentet göra nya hål vid varje mätning. Instrumentet fick dock skraddarsys för att passa de särskilda förhållandena hos Vasas PEG-konserverade trä. Resultaten visade också svårigheter i att jämföra mätningar gjorda på olika ställen, eftersom nedbrytningsgraden hos träet påverkade värdena.³⁶

Punktmätning med elektriska töjningsmätare

Dessa mäter förändringar i elektriskt motstånd som uppstår vid en töjning eller en ihoptryckning.

Linjära töjningsmätare eller linjärgivare

Benämns även LVDT-givare (Linear Variable Differential Transformers). Dessa givare är oftast mekaniska och av typen potentiometer. De har en utstickande, rörlig del som sitter på en glidskena. Till givaren leds elektrisk ström via en transformator som ser till att strömmen är så stabil som möjligt. När den rörliga delen trycks in eller glider ut, förändras spänningen (Volt). Förändringen i spänning kan sedan omräknas till förskjutning i till exempel millimeter. Den rörliga delen måste antingen ha ett mothåll att mäta mot, till exempel ett vinkelbeslag, eller ha en fästansordning i änden. För att samla in och lagra mätningarna används en spänningslogger. Med hjälp av anpassade datorprogram kan man få ut förändringarna i diagram.³⁷

Givarna finns i olika utföranden med lite olika teknik. En del liknar en penna, andra har en rektangulär kropp med en utskjutande, rörlig del. De måste fästas mot underlaget, liksom

³³ Pinchin, S. E. (2008) s. 37.

³⁴ Vikberg, T. (2010) s. 6.

³⁵ Pinchin, S. (2008) s. 38.

³⁶ Håfors, B & Persson, U. (1997).

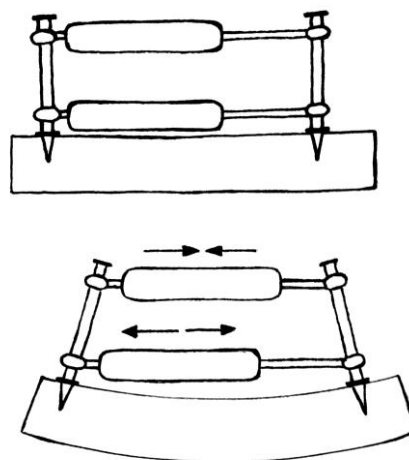
³⁷ Informant 1.

eventuellt mothåll och oftast skruvas de fast, men kan även limmas. Olika instrument har olika noggrannhet, vanligen mäter de ner till 0,01V.³⁸

Användning av linjärgivare för att mäta kupning

Detta är en metod som utvecklats av Luca Uzielli et al. för att kunna mäta hur en träpannå kumar sig, utan att mätutrustningen skadar eller är synlig på framsidan.³⁹

Vid en kupning av en bräda, sker en svällning på den ena sida och en krympning på den andra. För att konstatera en kupning måste man normalt utföra mätningar på båda sidorna. Med den här metoden sker mätningen endast på en sida och både svällning, krympning och kupning mäts samtidigt. Både mätningar i ett plan och i djupled kan alltså utföras samtidigt. Två metallstift fästs i träet i en linje som går tvärs emot träets fiberriktning. Avståndet mellan dessa mäts regelbundet av två linjärgivare på olika höjd. När den övre givaren visar lägre värden än den undre, har en konkav kupning skett och tvärtom. Se figur 4.



Figur 4. Vid en konkav kupning av brädan kommer den övre linjärgivaren att tryckas ihop och den undre att dras isär.

Fördelar

- Relativt billiga, men priset beror på typen och noggrannheten.
- Tillsammans med mätning av RF, får man en bild av i vilken takt en förändring sker i förhållande till förändringar i klimatet.
- Passar bra för att mäta över till exempel en spricka.
- Med Uziellis metod kan även kupning mätas på bara en sida.

Nackdelar

- Givaren måste fästas mot föremålet och skruvas oftast fast, vilket är förstörande.
- Mäter normalt endast lokala dimensionsförändringar i ett plan och säger inget om helheten.
- Något klumpiga och kräver en del elkablar mellan transformator, givare och logger. Särskilt om man vill ha flera mätpunkter.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Mätningar i taket på Vänersborgs kyrka

Mätning med linjärmätare användes för att mäta förändringen hos konstruktionssprickor i innertaket i Vänersborgs kyrka. Se vidare under kapitel 4, s. 30.

Mätningar på träpannå

Luca Uzielli och hans medarbetare M. Fioravanti, O. Casazza och G. Perucca testade metoden med dubbla linjärmätare på Giottos målning Maestà di Ognissanti, efter att den restaurerats. Mätningarna utfördes på plats där målningen normalt hänger i Uffizierna i Florens. Tre par av linjärgivare av typen potentiometer sattes fast på metallstift som skruvades in i pannåns baksida. Det första paret placerades över en konstruktionsspricka mellan två brädor, det andra över en torkspricka och det tredje paret mitt på en bräda utan synliga defekter. Ytterligare en enkel givare placerades över en stor spricka. Samtliga placerades vinkelrätt mot träets

³⁸ Regal AB, Linjärgivare, <http://www.regal.se/produkter/linjargivare>, 2011-11-08.

³⁹ Uzielli, L. et al. (1992) s. 501.

fiberriktning. En givare monterad på en plexiglasskiva i målningens närhet, användes som referens. Samtliga givare var kopplade till samma logger, som läste av värdena en gång i timmen. En temperatur och RF logger placerades intill som mätte var 30 minut.

Dagliga fluktuationer av RF tycktes inte ha någon inverkan, medan förändringar som varade i flera dagar gav små utslag. Svårigheter fanns dock att veta vad man mäter. Måleriskiktet skyddar träet på framsidan och en krympning eller svällning uppstår därför först på baksidan vid förändringar i RF. En kupning av brädan uppstår på grund av fuktgradienten. Efter någon dag har fuktfördelningen dock jämnat ut sig och kupningen planar ut.⁴⁰

Träpannå på Läckö slott

Metoden används även av Ottaviano Allegretti (IVALSA-CNR Trees and timber institute) och Charlotta Bylund Melin, doktorand vid institutionen för kulturvård, för pågående mätningar på pannåer på Läckö slott.

Trådtöjningsmätare

Dessa givare består av en tunn film med ett ledande element av metalltrådar, vanligen koppar. Hela filmen fästs mot föremålets yta med lim. Det finns särskilda lim för ändamålet, vanligen cyanoakrylat. Genom elementet skickas ström och när träet rör sig följer det med och sträcks eller trycks ihop. Deformationen av det ledande elementet ger en förändring i det elektriska motståndet vilket ger utslag på en voltmätare, på samma sätt som med linjärmätarna.⁴¹

Fördelar

- Relativt billiga och enkla att använda.
- Tillsammans med mätning av RF, får man en bild av i vilken takt en förändring sker i förhållande till förändringar i klimatet.
- Smidigare än linjärmätarna eftersom filmen är böjlig och kan fästas även mot kurviga ytor.

Nackdelar

- Hela givaren måste vara noga fäst mot underlaget med lim, vilket kan vara svårt att lösa utan att skada föremålet. Cyanoakrylatlim är mycket svårslösligt.
- Kräver en del elkablar.
- Mäter endast förändring på den yta den är fäst mot.
- Själva limningen och givaren i sig kan bidra till att lokalt förstärka materialet man mäter på, så att mätningarna blir missvisande. Den täta folien kan också förändra fukthalten under givaren.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Begränsad användning just för att givaren måste limmas så noga mot föremålet. Har dock använts för mätningar på träpannåer.⁴²

Punktmätning med optiska töjningsmätare

Fiber Bragg Grating Sensors

Fiber Bragg Grating Sensors är optiska töjningsmätare som består av mycket tunna glasfibrer med inlagda gitter som givare. Optiska töjningsmätare började utvecklas redan på 1960-talet, men fanns inte tillgängliga kommersiellt förrän vid mitten av 1990-talet. De används främst i

⁴⁰ Uzielli, L. et al. (1992) s. 502 ff.

⁴¹ Dulieu-Barton, J. M. et al. (2005) s. 64.

⁴² Dulieu-Barton, J. M. et al. (2005) s. 64.

konstruktioner som utsätts för stora påfrestningar som vindkraftsverkens rotorblad och flygplansvingar. Fibrerna kan gjutas in i moderna kompositmaterial och bli en del av konstruktionen. Normalt fäster man dock fibrerna mot föremålets yta med hjälp av lim.⁴³

Genom fibern skickas ljus av ett visst våglängdsintervall med hjälp av en laser. De så kallade Bragg-gittern (Bragg gratings) sorterar upp ljuset och reflekterar endast tillbaka UV-strålning av en mycket smal våglängdsbredd, vilken beror på avståndet mellan punkterna i gittret. När fibern töjs ökar avståndet mellan punkterna och det reflekterade ljuset får en annan våglängd. Med hjälp av en så kallad interrogator (elektronisk enhet) kan förändringarna läsas av. Även negativ töjning (kompression) kan mätas.⁴⁴

Upp till 20 gitter, och därmed mätpunkter, kan placeras på rad i samma fiber (upp till 100 med särskild teknik).⁴⁵ Varje gitter har då olika Bragg-våglängder så att samma interrogator kan hantera alla mätpunkterna.⁴⁶

Fibrerna med gitter har en inre kärna med extremt liten diameter på 4-9 μm . Kärnan har en tillsats av germanium som ger glaset ett högre ljusbrytningsindex. Ett yttre hölje består av rent glas och ger fibern en diameter på 125 μm . (Ett hårstrå är ca 60-80 μm tjockt). Skillnaderna i ljusbrytning mellan kärna och hölje gör att ljuset endast färdas inuti fibern. Utanpå detta läggs ett polymerskal för att fibern lätt ska kunna hanteras.⁴⁷

Fördelar

- Fibrerna är tunna och lättviktiga och ger därmed liten åverkan på föremålet.
- En enda fiber kan innehålla flera gitter, det vill säga mätpunkter och ingen extra fiber som leder ljuset tillbaka är nödvändig, vilket minimerar antalet trådar som behöver dras.
- Fibrerna innehåller ingen metall som kan korrodera.
- Mätresultaten påverkas inte av långa avstånd mellan mätpunkt och interrogator/ljuskälla.
- Fibrerna har lång hållbarhet och anses enkla att installera. Känsliga ytor kräver dock särskilt förfarande.
- Kan användas i miljöer med hög spänning eller hög explosionsrisk.
- Påverkas mycket lite av magnetiska fält.
- Okänsliga för vibrationer.⁴⁸

Nackdelar

- Fibrerna måste fästas mot föremålet.
- Sensorerna är mycket temperaturkänsliga, varför mätningen påverkas om temperaturen ändras. Det finns dock metoder för att kompensera för detta.⁴⁹
- Interrogator-instrumentet är dyrt. (Omkring 100 000 kr)⁵⁰
- Fibrerna är stelare än metallfolien hos elektriska trådtöjningsmätare, vilket kan göra dem svårare att fästa.⁵¹

⁴³ Kreuzer, M. (2007) s. 1.

⁴⁴ HBM Sverige. Optical sensing. <http://www.hbm.com/se/menu/applikationer/experimentiell-spaenningsanalys/optical-sensing/working-principle/>

⁴⁵ Kreuzer, M. (2007) s. 1.

⁴⁶ Falciai, R. et al. (2003) s. 286.

⁴⁷ Kreuzer, M. (2007) s. 2.

⁴⁸ Kreuzer, M. (2007) s. 1.

⁴⁹ Falciai, R. et al. (2003) s. 286.

⁵⁰ Bylund Melin, C. (2008) s. 6.

⁵¹ Kreuzer, M. (2007) s. 2.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Mätningar på träpannå

Inom kulturvårdsområdet har metoden testats av R. Falciai et al. för att mäta RF-relaterade rörelser i en träpannå. De tillverkade en träpannå med samma teknik som på 1400-1500-talen, av tre stående brädor i poppel med tre tvärsålar på baksidan i ek. Framsidan preparerades med en blandning av harlim och krita. För att fastlimningen av fibrerna inte skulle skada pannåns framsida, limmades först en bit japanpapper fast med en akrylharts. Därefter fästes Melinex (PET) med Beva 371 (termoplastiskt lim). På detta limmades fibern fast med cyanoakrylatlim. Fibern limmades med en liten limpunkt på var sida om varje gitter. Tre gitter fästes på baksidan, varav en på en tvärsåla och två på framsidan. Ett gitter på varje sida lämnades lösa utan fastlimning för att fungera som temperaturmätare, en på framsidan och en på baksidan. Deras våglängder drogs sedan av från de andra våglängderna, för att göra dem oberoende av temperaturen. En RF-mätare placerades också på pannån för att jämföra formförändringarna med förändringar i RF. Experimentet utfördes i ett laboratorium utan reglering av temperatur eller RF.⁵²

Experimentet visade tydligt att träet rörde sig mycket mer tangentiellt än längs med fibrerna, som sig bör. Vid jämförande mätningar mellan panelen och tvärsåarna visade det sig att tvärsåarna märkbart hindrade panelens naturliga rörelser. Skillnader i rörelser hos panelen beroende på närheten till en tvärsåla kunde påvisas, vilket skapade spänningar i panelen. Avlägsnande av tvärsåarna är ett vanligt förfarande vid konservering av pannåer, för att förhindra att de spricker. Därför gjordes även mätningar i samband med att de togs bort. Dessa mätningar visade att panelen omedelbart kupade sig och fortsatte att röra sig med varierande klimat. Slutsatsen blev att avlägsnandet av tvärsåarna därför kan vara en stor fara för pannåns färgskikt.⁵³

Kritik

Dulieu-Barton et al. påpekar dock att det kan finnas en osäkerhet i mätningarna som gjordes efter att tvärsåarna tagits bort. De menar att eftersom sensorerna endast är fästa med lim på var sida om varje mätpunkt, kan endast stäckning mätas till en början och att den sedan uppmätta kompressionen inte kan vara större än den stäckning fibern utsatts för tidigare. För att göra en sådan mätning måste hela sensordelen med gittret vara limmad mot ytan.⁵⁴

Helfältsmätning med fotografiska metoder

Time-lapse foto

Vid time-lapse fotografering tar man stillbilder med ett visst intervall och sätter ihop dem till en filmsekvens, så att långsamma förlopp kan spelas upp i ett snabbare tempo. Vanliga motiv är blommor som slår ut och moln som rör sig över himlen. Förändringar som inte är märkbara för blotta ögat kan synliggöras med metoden.

Vid vanlig filmning används oftast 24 bildrutor i sekunden. Det är också den hastighet som man spelar upp filmen i. Väljer man istället att ta 12 bilder i sekunden men spela upp dem i vanlig filmhastighet, visas förloppet dubbelt så snabbt som i verkligheten. Intervallen mellan bilderna som tas kan varieras från flera i sekunden till en bild om dagen eller mindre, beroende på hur långsamma rörelserna är hos objektet man vill studera.

Om videokameran inte har inställningar för time-lapse foto, kan en så kallad *intervalometer* kopplas till kamerans slutarsystem. Det går på vissa modeller. Man kan också ta stillbilder

⁵² Falciai, R. et al (2003) s. 287 f.

⁵³ Falciai, R. et al. (2003) s. 288 ff.

⁵⁴ Dulieu-Barton, J. M. et al. (2006) s. 66.

manuellt med längre tidsintervaller och i efterhand sätta ihop dem till en film, men detta ger sämre resultat.⁵⁵

För vanliga digitalkameror med filmfunktion finns det, åtminstone för Canon, gratis programvaror som kan laddas ner och installeras i kameran via ett minneskort.⁵⁶

Fördelar

- Utrustningen är relativt billig och enkel att använda.
- Förändringar blir visuellt tydliga.
- Enkelt att tolka resultaten.

Nackdelar

- Endast relativt stora förändringar kan dokumenteras.
- Kameran får inte rubbas ur läge i förhållande till objektet under undersökningsperioden.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Mätning av rörelser hos barkmålningar

Vid de manuella mätningarna av rörelsen hos de aboriginiska barkmålningarna som beskrevs tidigare, användes även time-lapse fotografering. En digital filmkamera med utrustning för time-lapse foto tog bilder var 10 minut under ett dygn. Detta upprepades tre gånger för varje barkmålning. Temperatur och RF mättes var femte minut och denna information kunde sedan läggas på i filmen. Det blev ett effektivt sätt att visa förändringarna i förhållande till fluktuerade RF. Resultatet visade att det tog ca en timme mellan en förändring i RF till en märkbar vridning hos barken.⁵⁷

Helfältsmätning med laseroptiska metoder

Dessa metoder är också fotografiska men laser används för att belysa objektet.

Speckelfotografi⁵⁸

Speckelfotografi är en teknik som kan mäta deformationer i ett och samma plan genom att jämföra bilder före och efter en deformation. Här utnyttjas den grynighet eller det fläckmönster, *speckle pattern*, som bildas av det återkastade ljuset från ett föremål, som belyses med ljus från en laser. Mönstret är helt slumpmässigt men unikt för varje yta. För att dessa fläckar ska uppstå krävs en viss optisk skrovlighet hos föremålets yta. Med en kamera fotograferas en första bild som blir referensbild. En andra bild tas som en dubbel exponering vilket skapar ett *specklegram*. Formförändringar hos föremålet ger upphov till förskjutningar i bildens fläckmönster och dessa kan sedan analyseras.

Metoden är relativt enkel att använda. Allt som behövs är en kamera och en laser, samt en dator för behandling av informationen. Den kräver inte heller samma mekaniska stabilitet som de holografiska metoderna, men den är heller inte lika noggrann och behandlingen av bilderna tar tid. En annan nackdel är att den bara mäter förändringar i ett plan.⁵⁹

Holografi

Ett hologram ger en tredimensionell bild av ett föremål till skillnad från ett vanligt fotografi. Hologrammet ger information i djupled och gör det möjligt att betrakta ett föremål ur olika

⁵⁵ Wikipedia, Time-lapse photo.

⁵⁶ CHDK (Canon Hack Development Kit). <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>, 2011-11-07.

⁵⁷ Smith, N. et al. (2003) s. 71f.

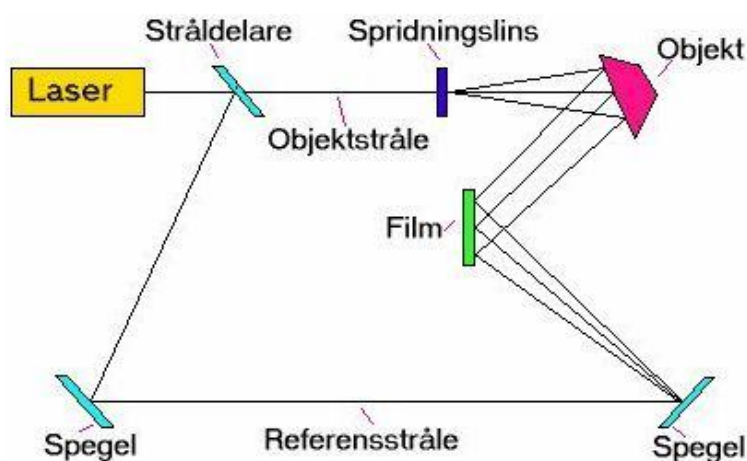
⁵⁸ I svensk text ska ändelsen vara -el, trots att det är ett låneord från engelskans *speckle*.

⁵⁹ Meinschmidt, G. et al. (1994) s. 138-140.

vinklar. Teorin bakom holografen utarbetades redan 1948, men den blev inte praktiskt tillämpbar förrän lasern kom till användning under 1960-talet. Nästan lika tidigt började man experimentera med holografisk fotografering av kulturhistoriska föremål. Främst har metoden varit användbar för dokumentation och för att hitta svårupptäckta defekter hos föremål. Holografiskt foto kan också användas för att skapa 3D-bilder av ömtåliga föremål, så att dessa kan studeras medan originalen ligger i tryggt förvar, något som kallas ”display holography”.⁶⁰

Grundprincipen för holografisk fotografering

Vid holografisk fotografering krävs en ljuskälla med ett enhetligt och samlat ljus, vilket fås av en laser. Ljusstrålen delas sedan upp i två, en objektstråle och en referensstråle. Objektstrålen är det ljus som träffar objektet, vilket reflekterar ljuset till en mycket ljuskänslig fotografisk plåt. Referensstrålen går direkt till den fotografiska plåten, utan att belysa objektet (figur 5). När de två strålarna sammanfaller på plåten, skapas interferens och det är interferensmönstret som fastnar på plåten i form av en mängd våglinjer. Mönstret är knappt urskiljbart med blotta ögat. Ingen avbildning av föremålet är synlig på plåten. För att återskapa föremålet som ett hologram, måste bilden belysas med en ljuskälla som är identisk med referensstrålen.⁶¹



Figur 5. Schematisk bild över hur holografisk fotografering går till. Illustration av Björn Lindell.

Holografisk interferometri

Holografisk interferometri kallas tekniken när den används för att mäta formförändringar och förskjutningar hos föremål och ytor, genom att jämföra bilder tagna före och efter en deformation. Precis som vid speckelfotografi, kan bilderna registreras som en dubbelexponering. Där före och efterbilderna inte överensstämmer, syns en särskild sorts interferens, eller ”fransar”. Med hjälp av mönstret kan deformationen beräknas.⁶² Som en följd av utvecklingen av ESPI används metoden knappast längre.

ESPI/ DSPI

Speckelfotografen och holografen har genom ny teknik vidareutvecklats till *electronic speckle pattern interferometry* (ESPI) och senare till *digital speckle pattern interferometry* (DSPI). Vanligen kallas dock metoden ESPI trots att den numera är digital.⁶³ Metoden kallas också

⁶⁰ Boone, P. M. et al. (1995) s. 103.

⁶¹ Asmus, J. F. et al (1973) s. 50.

⁶² Wikipedia: *Holographic interferometry*

⁶³ Boone, P. M. et al. (1995) s. 104.

TV- eller video-holografi, eftersom man kan se hela förlopp som en film i realtid på en bildskärm. Metoderna används främst för ickeförstörande tester inom ingenjörsvetenskap och maskinteknik.⁶⁴ Tekniken kan mäta med en noggrannhet ner till delar av en våglängd och används bland annat för att mäta påfrestning, töjning och vibrationer.⁶⁵

ESPI är som en holografisk version av speckelfotografen, där inte bara interferensmönstret utnyttjas, utan också grynigheten eller fläckmönstret, *speckle pattern*, som uppstår spontant i bilden. När det gryniga mönstret som bildas av det återkastade ljuset från objektstrålen, sammanfaller med ljuset från referensstrålen, skapas ett holografiskt fläckmönster. Vid en deformation hos föremålet, förändras avståndet mellan föremålet och bilden, ljuset får en längre eller kortare väg, och därmed ändras också mönstret. Med hjälp av olika programvaror beräknas deformationen direkt och kan ses i realtid på en bildskärm. Även hela förlopp kan spelas in.⁶⁶ Referensbilden dras automatiskt av från senare tagna bilder, så att endast deformationerna blir synliga. Om ingen förändring har skett, syns inget på skärmen.⁶⁷

Fördelar:

- Metoden är ickeförstörande.
- Både förskjutningar i samma plan och i djupled kan mätas.
- Noggrannheten är mycket hög, ner till 1/2000 mm.⁶⁸
- Det finns portabel utrustning som kan användas i fält.
- Kontinuerliga mätningar kan utföras.

Nackdelar:

- Begränsning av storleken på föremålet som kan undersökas. Ambrosini och Paoletti anger 30x40cm i en artikel från 2004.⁶⁹
- Ingen tydlig bild av själva föremålet, utan endast deformationerna är synliga.
- Krav på att utrustningen inte rubbas i förhållande till föremålet, då mätningarna störs av minsta förskjutning. Detta försvårar mätningar över längre tid.
- Utrustningen är dyr och kräver specialkunskap för att användas.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Mätningar av spänningar i violiner

ESPI har bland annat använts av Langhoff, Facchini och Zanetta för att undersöka två violiner från 1600-talet som ännu är i bruk. Genom att dra åt en av strängarna en aning, skapades tillräcklig spänning i instrumentet, för att en deformation på mikronivå skulle uppstå. ESPI användes för att registrera deformationen före och efter att strängen spänts. Man kunde då tydligt se vilka områden som påverkades och upptäcka svaga delar innan en skada uppstått. Deformationsmönstret var också helt olika för de båda violinerna. Slutsatsen blev att metoden kan ge användbar information både för instrumentbyggare och särskilt för den som restaurerar instrumenten.⁷⁰

Mätningar av spänningar i träpanel, dukmåleri och keramik

Boone och Markov testade ESPI på en träpanel, en målning på duk och en keramikvas. De koncentrerade sig dock på att lokalisera spänningar i föremålen orsakade av värme, genom att belysa dem med en IR-lampa. De stora förändringar som uppstod i träpannan och målningens

⁶⁴ Langhoff, A. et al. (1994) s. 155.

⁶⁵ Wikipedia: *Holographic interferometry*

⁶⁶ Paoletti, D. et al. (1995) s. 127.

⁶⁷ Meinschmidt, G. et al. (1994) s. 141.

⁶⁸ Meinschmidt, G. et al. (1994), 141f.

⁶⁹ Ambrosini, D. & Paoletti, D. (2004) s. 44.

⁷⁰ Langhoff, A. et al. (1994).

träram ansåg de dock inte som tillförlitliga på grund av träets anisotropiska egenskaper och fuktutbytet med omgivningen.⁷¹ Detta visar dock att metoden mycket väl skulle kunna användas för just fuktrelaterade mätningar hos trä.

Skadedokumentation av muralmålningar

Paoletti och Schirripa Spagnolo har främst använt tekniken för muralmålningar. De har bland annat testat en portabel utrustning för TV-holografi vid undersökning av fresker. Även här användes en IR-lampa för lätt uppvärmning av ytan. Därefter kunde osynliga sprickor och spjälkningar under ytan upptäckas.⁷²

Shearografi eller Shear ESPI

Shearografi eller Shear ESPI är en modifierad form av ESPI som inte kräver ett rubbningsfritt förhållande mellan kamera och föremål och som kan användas på längre avstånd. Här används inte någon referensstråle utan det reflekterade ljuset från objektet delas i två strålar av en stråldelare som sitter nära kameran. Interferensen skapas när dessa två strålar sammanfaller i kameran. Eftersom ljuset med den här metoden färdas samma optiska väg och därmed utsätts för samma störningar blir metoden inte så känslig för vibrationer och rubbningar. Deformationsmönstren är mer svårtolkade än vid ESPI och det är svårare att lokalisera förändringarna. Metoden är dock användbar som en översikt och där det inte är nödvändigt att veta exakt hur deformationen ser ut, utan främst att den finns.⁷³

Mätning av fukt med ljudvågor

Akustisk emission

Alla material som utsätts för någon form av påfrestning avger ljudvågor som kan mätas på ytan. Påfrestningen kan vara friktion, flöden, vibrationer, sprickbildning, deformationer, tryck och liknade. De spänningar som uppstår i träet vid variationer i RF, ger också upphov till akustisk emission. Olika typer av vågor skapas av olika händelser. De kan ha olika frekvens, styrka och vara olika länge i tid. På så sätt går det att skilja på till exempel sprickbildning och deformation. Ingen energi tillsätts föremålet, utan man mäter endast de ljud som föremålet själv producerar.⁷⁴ Metoden mäter varken fukthalt eller fuktfördelning, utan snarare spänningar och mikrobrott i träet.

Fenomenet upptäcktes redan på 1930-talet och testades under 40-talet i gruvor för att mäta de ljud som förebådar ett ras. På 50-talet upptäckte Kaiser att när ett metallföremål utsätts för cykler av allt större belastning, kommer ingen akustisk emission (AE) att avges förrän den förra belastningen har överstigit. På så sätt kan man mäta den högsta påfrestning ett material varit utsatt för. Denna AE teknik kom att kallas *Kaiser-effekten*.⁷⁵

Då akustisk emission är den enda icke förstörande tekniken som kan användas för att upptäcka defekter under en tillverkningsprocess, har metoden fått störst utbredning där.⁷⁶ När det gäller trä, har metoden sedan 1980-talet mest testats inom trätorkningsindustrin för kvalitetssäkring av virket under torkningen.⁷⁷

Sensorn som känner av ljudvågorna måste ha kontakt med föremålets yta, men kan spännas fast och behöver inte limmas. En piezoelektrisk omvandlare förvandlar vibrationerna till

⁷¹ Boone, P. M. et al. (1995).

⁷² Paoletti, D. et al. (1995).

⁷³ Meinschmidt, G. et al. (1994), 143-145.

⁷⁴ Skåre, T. (2005) s. 1.

⁷⁵ Kawamoto, S. et al. (2002) s. 4.

⁷⁶ Kawamoto, S. et al. (2002) s. 2.

⁷⁷ Bernatowicz, G. et al. (1992) s. 84.

voltsignaler som med hjälp av en för-förstärkare blir tillräckligt starka för att kunna läsas av. Lågfrekvent bakgrundsbrus kan filtreras bort. De uppmätta signalerna lagras på en dator och visas som våglängder över tid med olika signalstyrka och frekvens i ett diagram.⁷⁸ Signaler kan uppmätas på ett större djup om sensorn är fäst vid träets tvärsnitt, då ljudet färdas lättast längs med fiberriktningen.

Fördelar

- Metoden är helt ickeförstörande.
- Förändringarna i ett material kan observeras i realtid.
- Förändringar kan detekteras långt innan en synlig skada eller deformation uppstår.
- Det är möjligt att bestämma position och riktning hos till exempel en spricka, men för trä är detta svårt. Se under nackdelar.

Nackdelar

- Kräver stor kunskap för att användas.
- Svårt att tolka resultaten och bakgrundsbrus stör signalerna.
- På grund av träets uppbyggnad, färdas ljud olika lätt i olika riktningar. Det försvårar möjligheten att lokalisera skadan, vilket annars är en stor fördel med metoden när den används i homogena material.⁷⁹

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Mätningar på träskulptur

Jakiela et. al. som utvecklat en numerisk modell för beräkning av hur lindträ uppför sig vid förändringar i RF, testade modellen med AE. De ansåg att metoden fungerade väl för att upptäcka att ett brott är på väg att uppstå på mikronivå och därmed kan användas för att förutse större skador.⁸⁰ De har också testat AE på en träskulptur i en altarpupp på plats i en kyrka, där intermittent uppvärmning tillämpades. De fann ett tydligt samband mellan signalstyrkan och förändringar i RF. Hastiga förändringar i RF gav stora utslag medan långsamma förändringar, inom vissa gränser, inte gav något utslag alls.

Ultraljud

Genom att sända ultraljudsvågor genom ett material kan man antingen mäta den våg som transmitteras eller reflekteras. Vanligen behövs en mottagare på andra sidan av föremålet. Metoden bygger på att ljud transporteras lättare i vatten än i luft och torra material. Metoden ger inte information om mängden fukt, men har använts för att lokalisera fuktiga områden i väggar.⁸¹ Försök har gjorts att mäta fuktkvoten i tall, men bruset i mätningarna ansågs vara allt för stora för en bestämning av fuktkvot.⁸²

Mätning av fukt med elektromagnetisk strålning

Radiofrekvent spektroskopi

Radiovågor har den längsta våglängden i spektrumet och har använts för kontroll av fukthalten i bl. a. värmevlis, men även inom virkestorkning. Det finns kommersiella och

⁷⁸ Jakiela, S. et al. (2007) s. 102.

⁷⁹ Kawamoto, S. et al. (2002) s. 2.

⁸⁰ Jakiela, S. et al. Acoustic emission.. (2008) s. 269.

⁸¹ Pinchin, S. (2008) s. 41.

⁸² Vikberg, T. (2010) s. 11

handhållna mätare.⁸³ Radiovågorna reflekteras och transmitteras olika för olika material och det är vågornas rörelsemönster som anger vattenhalten i materialet.⁸⁴ Noggrannheten för den enda handhållna typen av mätare jag hittat, verkar dock vara ganska låg och mätningarna ger mer en indikation om hög eller låg fukthalt.⁸⁵

Mikrovågor

Mikrovågor har våglängder som ligger mellan radiovågor och infraröda vågor. När mikrovågor sänds genom ett material som innehåller vatten, kommer vattenmolekylerna, på grund av sina dipolära egenskaper, att ställa sig parallellt med det elektromagnetiska fältet. Detta kräver energi och den energin tas från fältet. Man kan alltså mäta mängden vattenmolekyler genom att mäta energiförlusten hos det elektromagnetiska fältet. Eftersom vattenmolekylerna sätts i rörelse, avges alltid energi till objektet, men den uppvärmning det ger upphov till är väldigt liten. Vågen som sänds genom materialet går också olika fort genom olika material och här påverkar inte bara fukthalten utan även träets densitet.⁸⁶ Det finns ett flertal olika typer av arrangemang för mätning av fukt med mikrovågor. En del kräver en mottagare på andra sidan av föremålet. Djupet man kan mäta på beror på materialet men rör sig om ca 50mm. Metall i materialet stör mätningarna.⁸⁷ Vid låga fuktkvoter är metoden inte heller lika tillförlitlig. Metoden har testats inom virkestorkningsindustrin, med lovande resultat, förutom att utrustningen inte passade i en virkestork⁸⁸.

Infraröd termografi

Allt som är varmare än den absoluta nollpunkten avger infraröd strålning och denna kan registreras med en IR-kamera. För fuktmätning bygger metoden på att vatten har en hög värmelagrande förmåga och metoden används bland annat för att skanna av och upptäcka fuktiga områden i byggnader. Metoden ger endast en översikt och kan inte mäta mängd.⁸⁹

Infraröd termografi har används för att visualisera fuktavdunstningen från trätytor vid torkning, genom att mäta skillnader i temperatur. Ju större avdunstning desto lägre temperatur har träytan och ju lägre temperatur desto mörkare färg ger bilden. Genom detta har man i laboratorieförsök till exempel kunnat se att kärnveden har betydligt lägre avdunstning än ytveden.⁹⁰

NIR

NIR står för *Near Infra Red* och avser strålning med våglängderna 780-3000nm, vilket är nära det synliga ljuset. Metoden kan mäta fuktkvoten i träet direkt, men endast i ytskiktet, eftersom vågorna har dålig inträngning. Vid mätningarna får man ett spektrum över vibrationsenergies, där varje molekyl har en specifik energinivå. Spektrumet är dock svårtolkat och det kräver stor kunskap. En mängd faktorer kan också påverka resultatet.⁹¹

NMR

NMR står för *Nuclear Magnetic Resonance*, eller kärnmagnetisk resonans och bygger på att atomer har ett kärnspinn som gör att de kan liknas vid små minimagneter och därmed kan påverkas av ett magnetfält. Vid mätning av fukt påverkas väteprotonerna i vattnet. När

⁸³ Vikberg, T. (2010) s. 10

⁸⁴ Hägg, K. (2008) s. 19.

⁸⁵ Protimeter MMS. (2008).

⁸⁶ Vikberg, T. (2010) s. 9.

⁸⁷ Pinchin, S. (2008) s. 40

⁸⁸ Vikberg, T. (2010) s. 9.

⁸⁹ Pinchin, S. (2008) s. 38.

⁹⁰ Morén, T. (1993) s 1219ff.

⁹¹ Vikberg, T. (2010) s. 8.

undersökningsobjektet placeras i ett magnetfält ordnar sig kärnspinnen parallellt med fältet. När de därefter utsätts för en elektromagnetisk våg, vanligen en radiovåg, får den kärnspinnen att ändra sin orientering. Detta ger upphov till en elektrisk signal. Hastigheten med vilken signalen avtar är olika för olika material och det är denna man mäter för att bestämma fukthalten i träet. Den här beskrivningen är mycket förenklad och det finns många varianter på NMR beroende på vad man vill undersöka.^{92 93}

Normalt placeras undersökningsobjektet inuti en jättemagnet, men det finns även portabla, ”ensidiga” varianter, till exempel NMR-MOUSE (Mobile Universal Surface Explorer), som placeras intill objektet. Sensorn måste ha god kontakt med föremålets yta.⁹⁴ Dessa har sämre noggrannhet men är lämpliga för undersökningar av föremål i fält. NMR-MOUSE kan användas där väte finns närvarande och på objekt som inte är elektriskt ledande eller magnetiska. Det sistnämnda gör det mer komplicerat att mäta på träföremål med till exempel spikar i! Den mäter heller inte särskilt djupt. Tre olika sensorer finns och 25 mm mäter den djupaste, vilken används för fuktmätning i byggnadsmaterial.⁹⁵ Tekniken för den så kallade ”ensidiga”, portabla NMRen är ganska ny och fortfarande under utveckling och kan säkert bli mer användbar i framtiden.

Fördelar:

- Metoden är icke-förstörande.
- Den fasta utrustningen kan med stor exakthet mäta fukthalten i olika material.
- Portabel utrustning finns som kan användas i fält.

Nackdelar

- Dyr utrustning.
- Kräver specialkunskap för att hanteras.
- Inte helt enkelt att tolka resultaten.
- Ingen möjlighet till kontinuerliga mätningar.
- Mäter endast i ytskiktet.

Exempel på användning inom kulturvårdsområdet

Metoden har använts för analyser av målningar för att särskilja olika skikt, mätningar av fukthalt i papper i vattenskadade böcker och mätningar av fukt och nedbrytning i träföremål. Mest använd och kanske också mest lämpad för, är utrustningen för mätning av fukthalt i byggnader och då främst murade och putsade väggar.⁹⁶

⁹² Vikberg, T. (2010) s. 10.

⁹³ Nationalencyklopedin (1994) NMR och NMR-spektroskopi.

⁹⁴ Pinchin, S. (2008) s. 40.

⁹⁵ Blümich, B. et al. (2009) s. 763.

⁹⁶ Blümich, B. et al. (2009) s. 766.

4. Exempel från tak i Vänersborgs kyrka

Bakgrund

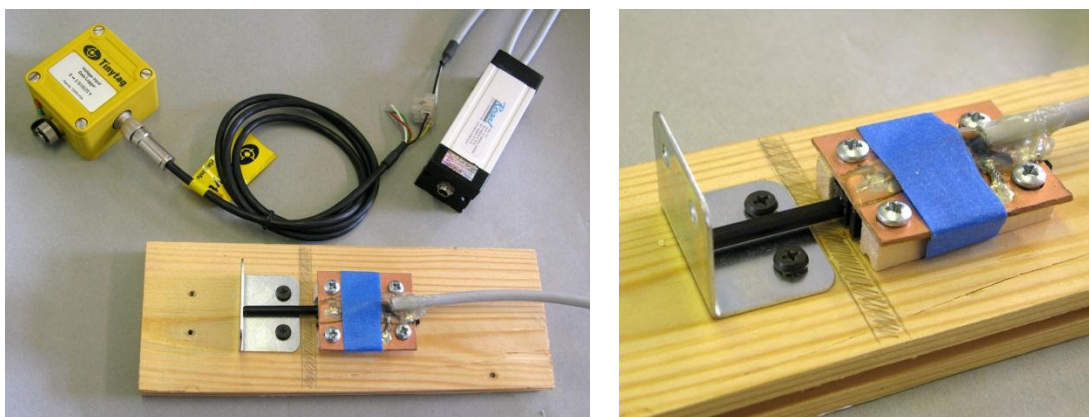
Det tunnvälvda trätaket i Vänersborgs kyrka från 1784, var täckt med en glasfiberväv från 1972. Sannolikt var väven uppsatt för att förhindra sågspån och skräp att falla ner genom fogsprickorna mellan brädorna. Det spontade taket hade på grund av uppvärmning torkat isär, i vissa fall så mycket att de gått ur spont. Önskemålet från församlingen var att återställa taket till ett mer ursprungligt utseende. När väven togs ner vid restaureringen 2010 blev de stora fogsprickorna synliga och behövde tätas på något sätt. Konservatorerna Leif Berg och David Edvardson på K-Konservator i Göteborg, valde efter en del tester att tätta de största fogsprickorna med trälistor som limmades mot notbrädan, efter att glipan gjorts jämn med en överhandsfräs. För att ta reda på vilken rörelsemån som behövdes och därmed hur breda listerna måste göras, behövde de veta hur mycket fogsprickorna varierade i storlek över året. Kyrkan används flitigt och är under den kalla årstiden ständigt uppvärmd till ca 20°C.

Mätning med linjärgivare och spänningslogger

Mätutrustning

I samarbete med K-Konservator utvecklade Regal Components AB en mätutrustning med en linjärgivare och en spänningslogger. Mätningarna utfördes över en fogspricka under drygt ett år, från februari 2009 till april 2010. Mätningar av relativ luftfuktighet och temperatur hade redan påbörjats i november 2008 och avslutades i oktober 2009. Dessa mätningar utfördes med en digital datalogger (Tinytag).

För att mäta avståndsförändringar över en fogspricka i bräddtak, användes en linjärgivare av typen potentiometer (Regal AB, modell nr 9615). Mätning med linjärgivare beskrivs även på s. 18. Den består av en fast del och en rörlig del med en fjädrande stav. Linjärmätaren skruvades fast i den ena brädan med den rörliga staven skjutande ut över fogsprickan. I brädan på andra sidan fogen skruvades ett vinkelbeslag som mothåll för staven (se fig. 6 & 7). Arbetsavståndet för staven var 15 mm och räknas från linjärmätaren fram till skruvarna som fäster vinkelbeslaget. Till linjemätaren leds elektrisk ström via en transformator (Regal AB,) som ger en mycket jämn och stabil spänning. Den stabila spänningen är viktig för att inte svängningarna ska påverka mätresultatet.



Figur 6 & 7: Bilden till vänster visar utrustningen som användes. Den gula kuben är spänningsloggern och den rektangulära i silver och svart är transformatorn. Bilden till höger visar en närbild på den monterade linjärmätaren och vinkelbeslaget. Det gråstreckade området symboliserar en spricka. Foto: Sofie Simonson.

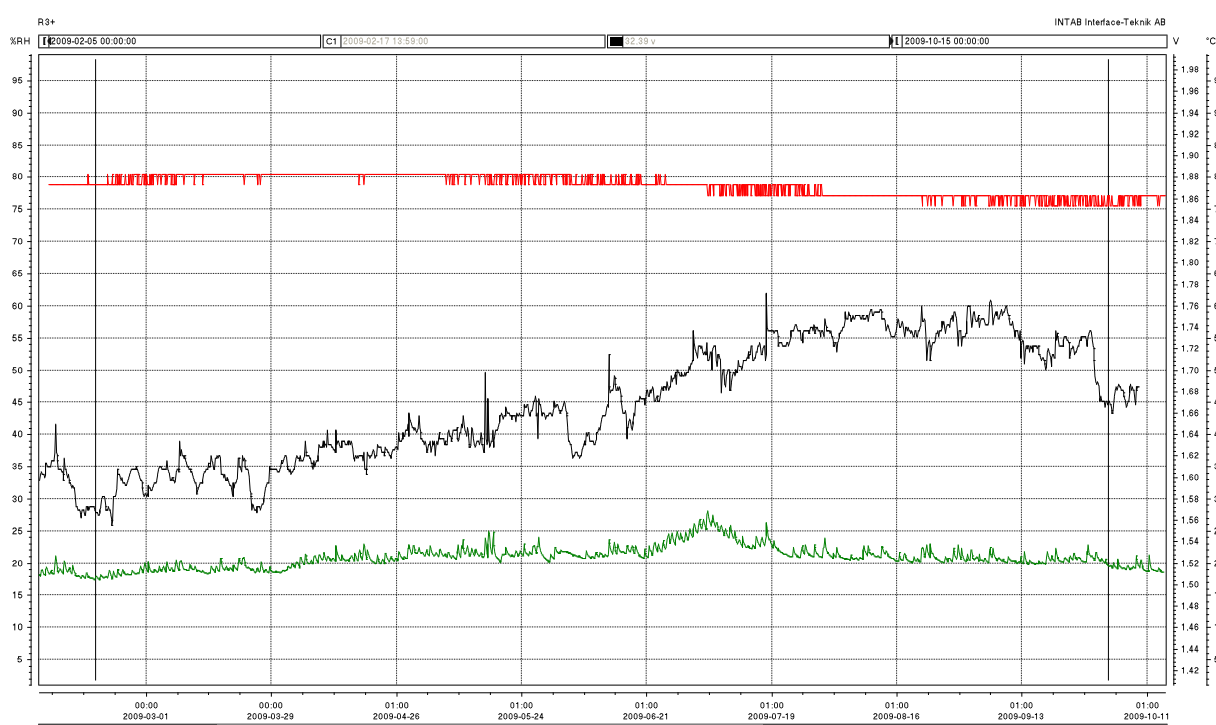
När glipan mellan brädorna krymper på grund av träets svällning eller vidgas på grund av krympning, ökar och minskar stavens längd, vilket ger utslag i spänningsförändringar. Med hjälp av en spänningslogger (Tinytag) mättes och lagrades förändringarna i spänning (V). Linjemätarens noggrannhet var 0,01 V, vilket motsvarade 0,1 mm.⁹⁷

Montering

Elkabeln från transformatorn monterades på linjärgivarens ovansida med hjälp av ett kretskort med hål för givarens stift. Detta utfördes av personal hos Regal AB. Givaren skruvades fast i trätaket genom kretskortets hörn och genom träbitar på var sida om givaren. På detta vis klämdes givare fast.

Tolkning av mätvärdena

Med hjälp av en datormjukvara (Easy View), kunde värden från både spänningslogger och RF/temperatur-logger samköras och visas i samma diagram. Se figur 8 nedan.



Benämning	Enhet	Med	Min	Max
Humidity	%RH	44,55	25,81	64,75
Voltage	V	1,87	1,85	1,88
Temperature	°C	20,77	17,33	28,10

Figur 8: Mätning av spänning, relativ fuktighet och temperatur vid en konstruktionsspricka i innertaket i Vänersborgs kyrka under perioden februari - oktober 2009.

Diagrammet visar den del av mätperioden då både RF, temperatur och spänning mättes samtidigt, från februari till mitten av oktober 2009. En minskning av konstruktionssprickans bredd, när träet sväller i samband med att RF ökar, ger utslag i form av ett lägre voltal. För spänningsmätningens hela period uppmättes maxvärden på 1,89 V och minimivärden på 1,85 V. Omräknat blir det en förändring på maximalt 0,4 mm eller 2,6 % på de 15 mm som var stavens arbetsavstånd.

⁹⁷ Informant 2, 2011-08.

Den relativa fuktigheten varierade över året med de högsta värdena (65 % RF) under sensommar och tidig höst och de lägsta (26 % RF) under senvintern. Takbrädorna följde tydligt den relativa fuktigheten men med en viss fördröjning och en mätbar förändring uppstod först efter 3-4 veckor.

Slutsats

Slutsatsen blev att förändringarna var så små att de i stort sett saknar betydelse. Det ansågs tillräckligt med en liten rörelsefog och att den kunde tätas med elastisk latexfog, utan risk att den spricker upp och att skräp åter börjar falla ner genom gliporna.

Om intermittent uppvärmning skulle införas kommer dock variationerna i klimatet att bli större och därmed också rörelserna. Risk finns då att rörelsefogarna är för små.

5. Exempel från mätningar på Vasaskeppet

Bakgrund

Skeppet Vasa förläste på sin jungfrufärd 1628 och bärgades 1961. Det konserverades med PEG(polyetylenglykol), ett vattenlösligt ämne med vaxartad konsistens. Under 17 år besprutades skeppet med PEG-lösning, för att stabilisera det nedbrutna träet och hindra kollaps av trästrukturen vid upptorkningen. Efter PEG-impregneringen följde en nio år lång upptorkning från ett klimat med 90 % RF till 60 % RF.⁹⁸ Därefter flyttades skeppet till det nuvarande museet som invigdes 1990. Museets klimatanläggning visade sig dock inte klara de stora luftmassorna i skeppshallen och de många besökarna. Skillnaderna i klimatet var stora mellan olika höjdnivåer i hallen och mellan olika tider på året. En RF på över 70 % var inte ovanligt på sommaren. Detta ledde till att hela skeppsskrovet rörde på sig och den hygroskopiska PEG:en blev klibbig. Den regniga sommaren 2000 blev läget akut när mängder av gula och sura saltutfällningar dök upp på skeppet. Då började arbetet med att försöka få till stånd en ny klimatanläggning.

Den nya klimatanläggningen installeras

2003 börjar den nya klimatanläggningen att installeras och i maj 2004 blev den helt styrande för klimatet i skeppshallen. Injusteringen av anläggningen hade nyss påbörjats när jag började som vikarierande konservator där samma sommar. En stor del av mitt arbete kom att handla om kontroll och analys av klimatet i skeppshallen. Ett huvudaggregat cirkulerar konditionerad luft omkring och inuti skeppet, vilket skapar en klimatsköld kring skeppet. Två hjälpaggregat finns också, som på utsatta ställen kan avfukta luften lokalt. På och i skeppet finns 42 givare som mäter både temperatur och RF (se Bilaga 1 för placeringen av dessa ombord). Ytterligare 14 finns i systemet och i huset, samt en utomhus. Valfria givare styr de olika utblåsen. Genom att logga in på servern kommer man åt data från mätningarna och diagram över valfri tidsperiod och givare kan tas fram upp till två år bakåt i tiden.⁹⁹

Den gamla anläggningens börvärden för klimatet i skeppshallen var 58,5 % RF och 17°C på vintern och 60 % RF och 20°C på sommaren. Börvärdena för den nya anläggningen sattes till en relativ fuktighet på 55 % ± 4 % och en temperatur på 18,5 °C ± 1,5°C.¹⁰⁰ Årstidsomställningen togs bort, men i övrigt är det önskade klimatet i stort sett detsamma.

I och med att den gamla anläggningen avinstallerades och den nya togs i bruk steg för steg, följde en osäker period med många justeringar. Kompletterande mätningar av klimatet blev nödvändiga. Dels användes separata dataloggrar som flyttades runt och dels användes information från krympmätningar, det vill säga mätning mellan stift i träet, samt värden från vägning av träbitar ombord. Dessa mätningar blev viktiga referenser för att kontrollera hur klimatanläggningen fungerade.

Träets nedbrytning och PEG-halt

Vasas trä är förhållandevis välbevarat i jämförelse med andra marinarkeologiska skeppsfynd beroende på de speciella förhållanden som rådde där vraket låg. Nedbrytningen har främst skett från träytan och ca två centimeter in, där bakterier ätit upp cellulosan och lämnat ett skelett av ligninrika cellväggar.¹⁰¹ Så länge cellhållrummen är fyllda med vatten är formen intakt, men vid en upptorkning kollapsar strukturen om den inte fylls med ett stabiliserande ämne, i detta fall PEG. Då PEG:en främst finns i de yttre lagren, har kraftigare trädimensioner

⁹⁸ Hocker, E. (2010) s. 3

⁹⁹ Hocker, E. (2010) s. 6.

¹⁰⁰ Klimatkrav i Vasamuseets skeppshall (2001).

¹⁰¹ Sandström, M. et al (2003) s. 15ff.

som balkar en mindre andel PEG, ca 10%, än medelkraftiga delar som däcksplankor, som har ca 30% PEG. Tunnare delar har ännu högre halt.¹⁰²

Vägning

På trossdäck förvaras sammanlagt sju träbitar som vägs varje vecka av konserveringstekniker Ove Olsen. Fem av dessa är PEG-konserverade bitar av trä från Vasa, varav två är i furu och tre är i ek. Dessa är konserverade samtidigt som Vasa, men är lösa delar, vars rätta plats man inte kunnat bestämma. För jämförelsens skull finns även en bit ny furu och en bit ny ek, som inte är konserverade. För vägningen används en decimalvåg som är permanent placerad på trossdäck.(Fig. 9) Fyra av vasaträbitarna har mätvärden sedan 1996, medan de övriga har tillkommit senare. Träbitarna har olika form och dimension och någon torrviikt har aldrig undersökts, utan vikten är endast ett relativt mått. Vid en förändring i RF märks en viktförändring redan inom en vecka och efter tre kan man lätt se om det är en trend eller en tillfällig förändring.

Hur mätvärdena användes

När den nya klimatanläggningen blev helt styrande för klimatet i skeppshallen i maj 2004, började träbitarna ombord att öka i vikt och fortsatte öka under flera månader. Värden från vägningen matades in i Excel och diagram för perioden 2000-2005 skapades för att synliggöra hur träbitarna påverkades under bytet av klimatanläggning. Se exempel i figur 10. Samtliga träbitar uppvisade samma mönster, men vikten ökade och minskade i olika hög grad.

När kurvorna från vägningen jämfördes med RF-värden från den gamla och nya klimatanläggningens givare under 2004, syntes inte någon förändring i klimatet som kunnat ge upphov till viktökningen. Då uppstod misstankar om att det kunde vara fel på anläggningens mätningar. Därför gjordes kontrollmätningar med assmanpsykrometer ombord som visade andra värden än anläggningens givare. Två av givarna skickades därför in för fabrikskalibrering. De visade sig mäta tre procentenheter för lågt med resultat att RF sänktes i januari 2005 och träbitarna började åter minska i vikt. Tyvärr finns inte diagram från den gamla anläggningens givare sparade. Ett diagram med värden från tre av den nya anläggningens givare från juni till september 2004 finns dock i Bilaga 1.



Figur 9: Vägning på trossdäck. Fyra av träbitarna hänger fritt till vänster. De övriga tre ligger på strön till höger. På bilden ligger en av träbitarna, den i ny furu, på vågen i mitten. Foto: Ove Olsen, SMM.

Jämförelser mellan träbitarnas viktökning

När den nya anläggningen blev styrande ökade vikten på samtliga träbitar under perioden maj till och med december 2004.(Tabell 1) Det tunna ramstycket 06971 i ek ökade mest, 2,3 %, medan den nya ekbiten med liknande dimensioner endast ökade 0,5 %. Näst mest ökade brädbiten i ek 6499, 1,7 %. Den nio kg tunga ekklotsen 19948 ökade ca 0,8 %.

Furubrädan 19499 ökade med 1 %. Den nya furubiten ökade 0,5 %, men väger mer än dubbelt så mycket som furubrädan, vilket gör dem svårare att jämföra.

Den knappt 26 kg tunga furuplankan 11884 ökade 0,8 %.

¹⁰² Håfors, B. (2001) s. 115ff.

Tabell 1. Presentation av träbitarna och deras viktförändring.

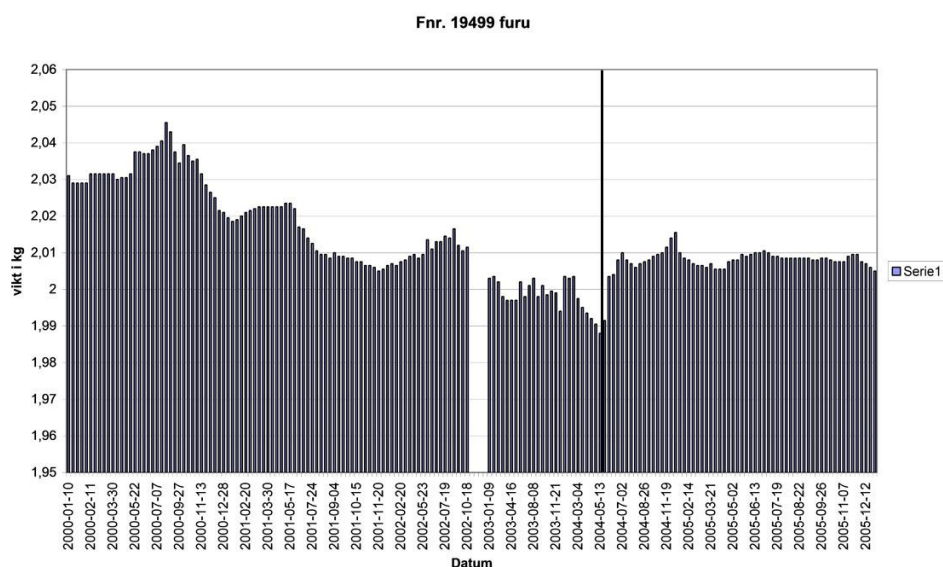
Typ	Fyndnr.	Ungefärlig vikt	Viktökning i % maj-december 2004
Ek, ramstycke, PEG-konserverat	06971	1,1 kg	2,3 %
Ek, klots, PEG-konserverad	19948	9,2 kg	0,8 %
Ek, brädbit, PEG-konserverad	6499	2,5 kg	1,7 %
Furu, bräda, PEG-konserverad	19499	2 kg	1 %
Furu, plank, PEG-konserverad	11884	25,6 kg	0,8 %
Furu, plankbit, Nytt trä		4,7 kg	0,5 %
Ek, brädbit, Nytt trä		1,3 kg	0,5 %

Vad diagrammen visar

Nedan visas ett diagram för en bit PEG-konserverad furu, fnr 19499. (Fig. 10) Diagram för samtliga träbitar finns i Bilaga 2. I diagrammen kan man lätt urskilja en skillnad mellan de fuktigare somrarna och de torrare vintrarna. I det längre perspektivet har dock en ständig upptorkning skett, vilket syns i ett diagram över perioden 1996-2010 som finns sist i Bilaga 2.

Mätvärden saknas under en period, då bitarna flyttades vid arbeten ombord i november 2002. Samtidigt kalibreras klimatanläggningens givare och efter en justering i januari 2003, sänks RF och bitarna minskar i vikt. Därefter följer en orolig period med fluktuerande klimat. En höjning av RF på grund av en felkalibrering vid jul 2003 ger en tydlig topp, liksom sänkningen efter omkalibreringen ger en dal, där träbitarnas vikt sjunker till den lägsta någonsin, under tiden som den nya klimatanläggningen börjar bli klar.

När den nya anläggningen blir styrande för klimatet i maj 2004 ökar dock vikten stadigt och går en bra bit över värdena vid jul 2003. Felaktigheter i mätningarna upptäckts och efter en fabrikskalibrering av två givare sänks RF i januari 2005 och bitarna minskar åter i vikt.



Figur 10: Diagram över viktförändringen hos en bit PEG-konserverad vasafuru mellan åren 2000-2005. Fyndnummer 19499. Den svarta linjen visar när den nya klimatanläggningen blev styrande för klimatet.

Kommentar

PEG:en tycks öka förmågan att ta upp och avge fukt och då tunnare trä har en procentuellt högre halt av PEG, förändras de mest. Av de nya träbitarna förändras eken mindre än furen, men då ekbiten är hyvlad och furubiten är sågad och således har en större yta, är det svårt att jämföra dem. De olika dimensionerna och vikterna försvårar också jämförelserna mellan vasaek och vasafuru. Säkert är dock att en förändring i RF snart avspeglas i en viktförändring och är en tillförlitlig metod för att upptäcka förändringar i klimatet.

Tillverkaren av givarna trodde att de felaktiga mätningarna kunde bero på att en beläggning av okända substanser från Vasa lade sig på sensormembranen och störde mätningarna. Lösningen blev en portabel mätare med en självrenande funktion, där membranet hettas upp under två minuter och bränner bort alla föroreningar. En gång om året skickas den in för fabrikskalibrering och därefter justeras alla sensorer på skeppet mot denna.¹⁰³

Krympmätningar

Träets krympning mäts med skjutmått mellan par av stålstift, som är inslagna tre centimeter i Vasas trä. Dessa användes ursprungligen för att mäta träets krympning under och efter konserveringen med PEG. De första tolv paren sattes in redan 1965 och utökades 1975 till 67 stycken.¹⁰⁴ Fortfarande används 40 stycken av dessa, samt ytterligare 11 punkter med fastmonterade, digitala skjutmått. De fyrtio mätpunkterna har nummer mellan 3 och 112, medan de 11 mätpunkterna med fasta skjutmått saknar nummer. De fasta måtten tas inte upp här. Avstånden mellan stiften varierar mellan 110-170 mm. Mätningarna utförs varannan vecka av konserveringstekniker Ove Olsen. Tidigare användes ett vanligt skjutmått, men sedan 2002-02-20 används ett digitalt.¹⁰⁵ Då mätningarna görs manuellt, kan de avvika något från gång till gång och enstaka mätresultat ska inte tas för absoluta. Krympkurvorna visar trender över längre tid. Samtliga mätpunkter sitter i ek och det är förmodade tangentiella mått. På grund av konstruktionsdelens placering och den PEG-behandlade ytan kan det vara svårt att se hur träet är orienterat. Mätpunkternas placering i förhållande till konstruktionsdel och däck visas i tabell 2. Balkar, balkvägare, kattspår och köl tillhör de kraftigaste konstruktionsdelarna, medan bordläggning, garnerings- och däcksplankor är något tunnare. Tunnast dimensioner har relingen.

Tabell 2. Mätpunkternas placering.

	Övre däck	Övre batteri-däck	Undre batteri-däck	Tross-däck	Hål-skepp	Under Skeppet
Balk			III	IIII	I	
Balkvägare		I	II	III	I	
Bordläggning						IIII
Däcksplanka			I	III		
Garnering		I		II	IIII	
Kattspår					IIII	
Köl						II
Reling	I					

Tabellen visar mätpunkternas placering i förhållande till konstruktionsdel och däck. De romerska ettorna anger antal.

Tolkning av diagrammen

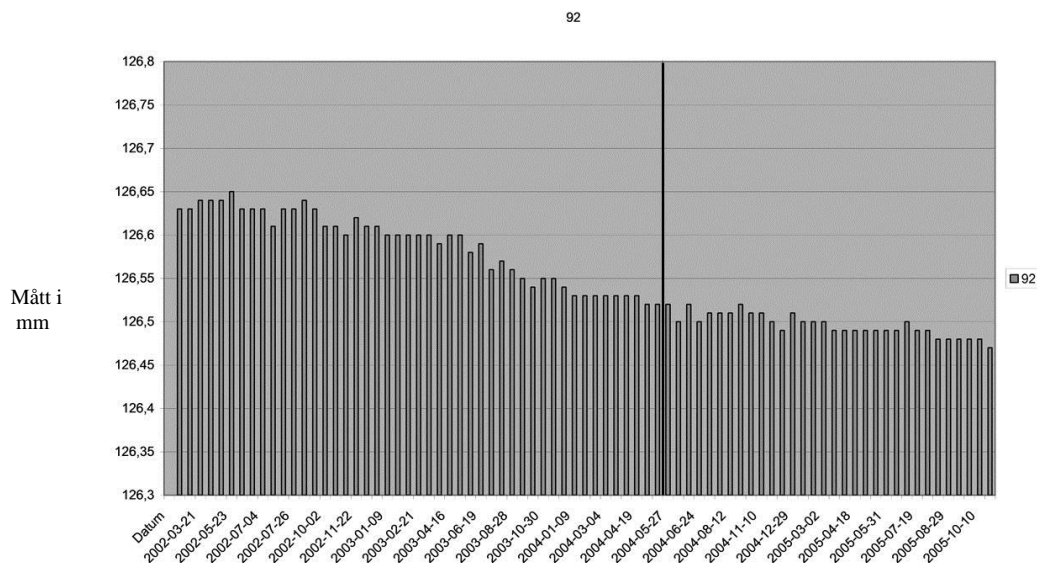
För att kontrollera hur träet reagerat före, under och efter bytet av klimatanläggning, fördes mätvärden från februari 2002 till november 2005 in i Excel och gjordes om till stapeldiagram. Diagrammen fick en likvärdig skala med 0,05mm mellan skalstrecken för enkel jämförelse. Det visade sig att krympningarna uppvisade två huvudmönster och därför delade jag in dem i två grupper:

¹⁰³ Hocker, (2010) s. 7.

¹⁰⁴ Håfors (2001) s. 139.

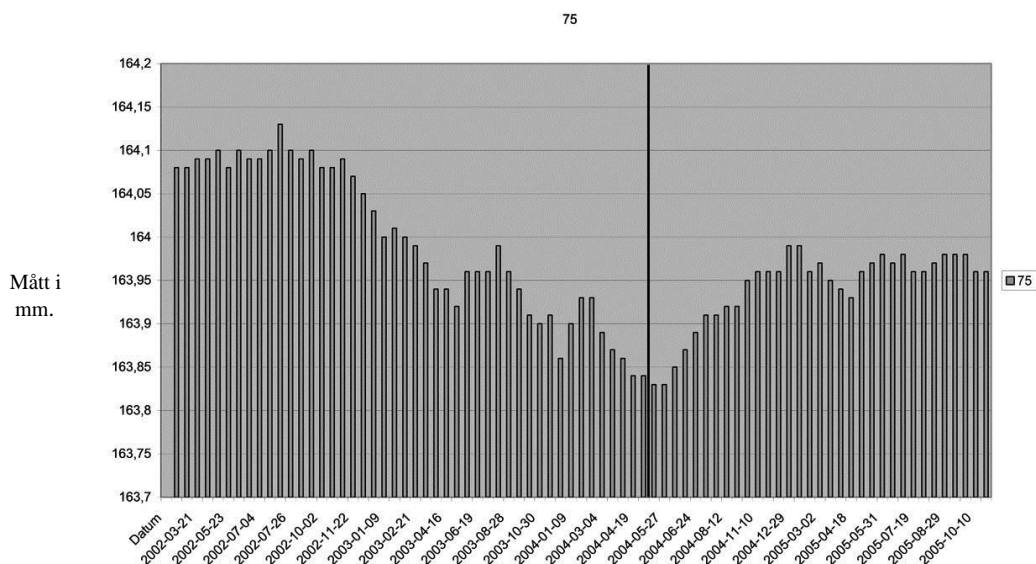
¹⁰⁵ Informant 3, 2011-10-25.

1. Första gruppen har en stadig krympning från 2002. I denna grupp ligger det sist uppmätta värdet bland de lägsta (Fig. 11).



Figur 11: Mätpunkt 92. Exempel på diagram ur den första gruppen. Diagrammet visar krympningen av träet mellan stiften på en balk på trossdäcks babordssida. Den svarta linjen visar när den nya klimatanläggningen blev styrande för klimatet.

2. Andra gruppen har en stadig krympning fram till mitten av 2004 och därefter en svällning, så att en dal bildas i diagrammen. I denna grupp är det sist uppmätta värdet tydligt högre än vid mitten av 2004 (Fig 12).



Figur 12: Mätpunkt 75. Exempel på diagram ur den andra gruppen. Diagrammet visar krympning och svällning av träet mellan stiften på en garneringsplanka. Hålskeppet på styrbord sida. Den svarta linjen visar när den nya klimatanläggningen blev styrande för klimatet.

Den svacka som syns i den andra gruppens diagram härrör från tiden då den nya klimatanläggningen tas i bruk en bit i taget. Träet har fram till maj 2004, då den nya anläggningen blir helt styrande, stadigt krympt. Därefter sker en tydlig förändring och träet sväller. Mönstret är mycket likt viktförändringarna hos träbitarna på trossdäck. Dessa

förändringar har inte kunnat utläsas av anläggningarnas mätningar av RF, då dessa periodvis varit felaktiga, som jag beskrev i avsnittet om vägning.

Avvikelser

Sex mätpunkter har krympkurvor som avviker, eller som inte säkert kan hänföras till någon av de första två grupperna. Här återfinns alla fyra mätpunkterna på kattspår i hålskeppet, samt mätpunkt 70 på ett vaterbord på trossdäck och 3B på en bordläggningsplanka under skeppet. Mätpunkt 60, en däcksplanka på undre batteridäck, har en extrem topp sensommaren 2002, som är svår att förstå om den inte beror på ett mätfel.

Betydelsen av mätpunkternas placering för typen av krympkurva

I tabellen nedan (tabell 3) visas hur mätpunkterna är fördelade på skeppet. Antalet mätpunkter på skeppssida, konstruktionsdel och däck visas i förhållande till de två typerna av krympkurva som kunnat identifieras. Ettor inom parentes är mätpunkter som inte uppvisar typiska kurvor.

Tabell 3. Mätpunkternas fördelning på skeppssida, konstruktionsdel och däck i förhållande till typ av krympkurva

	Grupp 1: Jämn kurva	Grupp 2: Kurva med svacka
Skeppssida		
Babord	IIIIIIII	IIIII
Midskepps	II	II
Styrbord	IIIIII	IIIII
Konstruktionsdel		
Balk	IIIIII	I
Balkvägare	III	III
Bordläggning	I	III
Däcksplanka, Vaterbord	II	II
Garnering	II	IIIII
Kattspår	(I)	(I)
Köl	II	
Reling	I	
Däck		
Övre däck	I	
Övre batteridäck		II
Undre batteridäck	III	III
Trossdäck	IIIIIIII	IIIII
Hålskepp	III	III
Under skeppet	III	III

Skeppssida

Ingen synlig skillnad finns mellan mätpunkter på styrbord eller babord sida. Antalet mätpunkter är i stort sett lika många på vardera sidan i de två huvudgrupperna. Vilken sida konstruktionsdelen befinner sig på tycks därmed sakna betydelse, utan det är andra faktorer som styr rörelsemönstret.

Konstruktionsdel

Balkarna är klart överrepresenterade i den första gruppen och det är förstås logiskt att de stora dimensionerna på träet gör att de inte hinner reagera på kortare förändringar i klimatet.

Bordläggningsplankorna under skeppet uppvisar små förändringar, även om tre av fem har en liten svacka kring maj 2004.

Tunnare dimensioner som garneringsplankorna är flest i grupp två och har tydligt reagerat på förändringen i klimatet. Dessa har en upptorkning fram till maj 2004 och därefter en viss svällning. Garneringsplankan på övre batteridäck är den enda som till och med ökat mer än värdet i början av 2002.

De kraftiga kattspåren nere i hålskeppet, har jag ansett som avvikande, men två av dem kan eventuellt hänföras till varsin grupp, nr 86 till grupp 1 och nr 88 till grupp 2. Mönstret är dock otydligt.

Kölen däremot har en dramatisk krympning, men här rör det sig knappast enbart om upptorkning utan snarare om att den tryckts ihop av skeppets tyngd!

En mätpunkt, nr 61, finns på övre däck och sitter i en relingsstötta. Den har en jämn krympkurva utan svacka trots att dimensionerna inte är så stora.

Däck

De övre däckerna har så få mätpunkter att det inte går att dra några slutsatser.

Undre batteridäck har lika många i varje grupp och det är både balkvägare och balkar i varje. Varför det är skillnader kräver en djupare analys.

När det gäller trossdäck är det absolut flest mätpunkter i grupp 1. Det är inte så förvånande eftersom trossdäck är trångt och med få öppningar. Luftutbytet där är långsammare och det är det klart fuktigaste däck. Ett typiskt mönster för flera av dessa är att de har en dramatisk krympning sensommaren 2004 och därefter en utplaning, till exempel, mätpunkt 95.

I hålskeppet återfinns en mätpunkt av samma typ som nr 95 ovan. Mätpunkterna är dock jämnt fördelade mellan de båda grupperna där. De tre som finns i grupp två är alla garneringsplankor. Ytterligare en garneringsplanka finns dock i grupp ett.

Under skeppet ser fördelningen också lika ut, men två av mätpunkterna i grupp 1 sitter på kölen. Som är nämnt ovan är denna mätning inte så tillförlitlig på grund av det tryck kölen utsätts för. I grupp 2 är alla bordläggningssplankor, men förändringarna är ganska små.

Kommentar och vidare undersökningar

Rörelser i träet och viktförändringar är faktiska värden som på ett relativt enkelt sätt ger svar på hur skeppets trä reagerar på förändringar i RF. Krympmätningarna och vägningen av träbitarna på trossdäck, är också ett värdefullt komplement till och en kontroll av att RF-mätningarna fungerar tillförlitligt. Med hjälp av resultat från vägningen på trossdäck upptäcktes ett fel, som efter kalibrering av två av givarna i januari 2005, kunde rättas till. Krympmätningarna visar också, över större tidsspann, att skeppet fortfarande är under upptorkning och endast de senaste åren har kurvorna börjat plana ut och träet närmar sig jämvikt.

Större dimensioner av trä, i synnerhet balkar, är inte särskilt känsliga för klimatförändringar som varar några få månader. Mindre dimensioner som garneringsplankor reagerar betydligt snabbare och uppvisar en förändring på några veckor. På det trånga och instängda trossdäck är förändringarna långsamma. Här verkar också den nya anläggningen, med utblås inuti skeppet, gjort stor skillnad och krympningen har för flera mätpunkter planat ut på en tydligt lägre nivå än tidigare.

Mätresultaten från de fasta skjutmått har inte tagits med här och kan komplettera undersökningen. Vidare kan mätpunkternas placering i förhållande till klimatanläggningens utblås och befuktning/avfuktning också undersökas. Fördelningen för/akter har inte heller beaktats. Vad jag kunnat se verkar det dock vara av underordnad betydelse.

6. Diskussion och slutsatser

Syftet med den här uppsatsen har inte varit att hitta den ultimata mätmetoden, den finns inte, utan att undersöka hur olika typer av metoder fungerar och vilken information de kan ge. Samtliga metoder måste kombineras med mätningar av luftens RF och temperatur för att skapa ett samband mellan orsak och verkan. Metoderna kan också behöva kombineras med varandra då de ger olika typer av information. Vid val av en mätmetod finns flera aspekter att tänka på, som vilken information man behöver och om värdet av informationen är större än skadan av eventuella ingrepp. Hur kunskaps- och kostnadskrävande är de? Kan de användas i fält? Hur noggranna är mätningarna? Det är inte alltid nödvändigt att mätresultaten ger absoluta värden. Mäter man över en längre tid är graden och hastigheten av en förändring viktigare än exakta fukthalter och liknande. Relativa mått kan ge tillräcklig information.

Att mäta luftens RF och temperatur är förstås viktigt och eftersom träföremål tar tid på sig att reagera på en förändring av klimatet, har man då möjlighet att justera förändringar i tid, så att skadliga nivåer aldrig uppstår. Den möjligheten har man inte om man bara mäter på föremålen, eftersom en förändring hos föremålet då redan har skett. Ett så noga kontrollerat klimat är dock sällsynt och vill man veta om det klimat man råkar ha är skadligt för föremålet eller inte, kan mätningar på själva föremålet vara nödvändiga

Mätmetoderna

De metoder jag gått igenom ger olika typer av information, som fuktupptag, dimensionsförändringar punktvis eller över hela, påfrestning och fukthalt. Vägning ger information om att ett upptag eller ett avgivande av fukt sker och hur snabbt detta sker i förhållande till förändringar i RF. För mätning av fuktkvoten eller fukthalten i föremål finns flera metoder, men de är inte särskilt tillförlitliga och mäter endast i ytskikten. Av de metoder som använder elektromagnetiska vågor av olika slag, verkar NMR och mikrovågor vara de mest intressanta.

Mätningar med töjningsmätare visar på lokal svällning/krympning och lokala rörelser, medan de manuella mätningarna även kan användas för hela föremål. Vill man veta hur fuktförändringar påverkar formen över hela föremålet behövs en helfältsmetod som ESPI, vilken visar formförändringar hos hela föremål på ett visuellt sätt.

När man ställs inför ett val av mätmetod, behöver man veta vilken typ av information som man är ute efter. Är det till exempel rörelsen i en viss riktning som är intressant eller är det hastigheten med vilken föremålet reagerar i stort? Det är också viktigt att ställa nyttan av informationen i förhållande till en eventuell åverkan på föremålet. Arbetsinsats och kostnad är andra faktorer. Det sistnämnda har varit svårt att ge svar på, då mätutrustning anpassad för kulturhistoriska träföremål sällan finns kommersiellt tillgänglig, utan måste skraddarsys eller modifieras för ändamålet. Flertalet metoder kräver avancerade beräkningsmodeller, anpassade för det material man vill undersöka, för att resultaten ska kunna tolkas korrekt.

Utvecklingen går också hela tiden framåt och utrustning som är dyr och svåränvänd idag är kanske lättillgänglig och prisvärd om några år.

Praktisk tillämpning - jämförelser mellan metoderna

Det är knappast en slump att metoder som manuell mätning och mätning med elektriska töjningsmätare varit de mest använda metoderna för att mäta dimensionsförändringar och rörelser i trä. När det gäller kulturhistoriska föremål har dock användningen av de elektriska töjningsmätarna begränsats av att de måste fästas i materialet. Annars är utrustningen förhållandevis billig och finns tillgänglig kommersiellt. Det är också lätt att förstå hur metoderna fungerar. Dock krävs det specialkompetens för att välja rätt typ av töjningsmätare för ändamålet, samt få den monterad och kalibrerad.

Den manuella mätningens stora fördelar är att den är icke-förstörande och inte kräver någon montering på föremålet, så länge man inte behöver slå i stift att mäta mellan. Man är heller inte beroende av el och utrustningen är i högsta grad portabel. Den kräver dock någon på plats med jämna mellanrum och mätpunkterna måste vara lättillgängliga.

De elektriska töjningsmätarna skruvas fast och innebär ett ingrepp i föremålet, medan de optiska töjningsmätarna normalt limmas med ett svårlösligt lim. Den "kaka" av skyddsskikt och lim som Falciai använde sig av för att limma Fiber Bragg sensorerna, är en skonsammare variant, men kan vara problematisk. De elektriska töjningsmätarna är dock sannolikt för tunga för att limmas på ett både skonsamt och säkert sätt.

De optiska fibrernas stora fördelar är deras litenhet och lätthet och att många mätpunkter kan finnas i samma fiber. Antalet kablar blir också färre än hos de elektriska töjningsmätarna. Utrustningen blir med andra ord mer diskret och kan passa bra till mindre föremål, men den är betydligt dyrare. Då hela sensordelen eller gittret antagligen måste vara fäst vid ytan, är det dock inte möjligt att mäta annat än töjning över en spricka.

När det gäller de helt icke-förstörande metoder som mäter formförändringar på avstånd utan att vidröra föremålet, är det svårare att mäta under längre tidsperioder. De fotografiska metoderna som time lapse-foto och olika holografiska metoder kräver att utrustningen inte rubbas i förhållande till föremålet. De holografiska metoderna kräver också en hel del apparatur som tar plats och även om det finns portabel utrustning för ESPI, kan den knappast användas för mätning över längre tid i lokaler som används under tiden. ESPI är intressant för att den kan mäta förändringar både i djupled och i samma plan. Metoden kräver dock specialkompetens och den är, än så länge, kostnadskrävande. Att kunna visa formförändringar och deformationer som en filmsekvens kan ha ett stort pedagogiskt syfte. De holografiska metoderna är dock endast på teststadiet när det gäller att mäta fuktrelaterade rörelser. Främst används de för skadeinventering och dokumentation. Metoden har dock potential om den vidareutvecklas.

Akustisk emission är också helt icke-förstörande, men sensorn måste ha god kontakt med föremålets yta. Metoden är speciell för att den varken mäter fukt i föremålet eller en formförändring, utan endast ger utslag när föremålet utsätts för en påfrestning som kan vara fuktrelaterad. Frågan är hur man med säkerhet kan veta vad det är man mäter i ett så heterogent material som trä?

Felkällor och problem

I verkligheten, i ett okontrollerat klimat, når sällan ett träföremål jämvikt med omgivande klimat, eftersom den relativa fuktigheten vanligen skiftar snabbare än föremålet kan ta upp och avge fukt. Något stabilt tillstånd uppstår då inte utan föremålet är i ständig rörelse och fukt transporteras in och ut. Förändringar sker också fort i ytan på ett föremål, men det kan ta flera dagar innan en förändring märks längre in. Fukten är också sällan jämnt fördelad i hela föremålet. Ytskikt, liksom inbyggda delar i sammansatta konstruktioner hindrar ett fritt fuktutbyte med omgivande luft. På grund av detta kan det vara svårt att använda metoder som mäter fukthalt och fuktkvot. På vilket djup ska man mäta och var på föremålet?

För att få korrekta mätresultat är det viktigt att utrustningen är väl kalibrerad för ändamålet. Det kan betyda att utrustningen måste ställas in för just det föremål man vill mäta på. Träslag, ytbehandlingar, massa och liknande kan påverka mätningarna.

När mätinstrument limmas fast, kan man aldrig vara helt säker på att det inte sker en rörelse i själva limningen, eller att limmet förstärker materialet lokalt och ger missvisande mätresultat.

Vid manuella mätningar beror noggrannheten även på den som mäter. Hur noga man än är kan olika personer få olika resultat. Bäst är om samma person utför alla mätningar på samma ställe. Små skillnader i handhavandet kan annars ge avvikelser i mätvärdena.

Att mäta korrekt är en sak, att tolka mätresultaten rätt är en annan och ofta svårare uppgift. Vad betyder egentligen mätresultaten? En mätning på ena sidan av en pannå som ger en indikation om en krympning, kan lika gärna vara orsakad av en kupning av brädan. Likaså kan andra typer av deformationer ge upphov till feltolkningar. Växtstörningar och kvistar kan också påverka mätningarna. Vid användning av mer avancerad mätutrustning som NMR, ESPI eller akustisk emission måste korrekta beräkningsmodeller användas för att mätvärdena ska kunna tolkas på rätt sätt. Dessa är till stor del beroende på materialet. För industrin finns anpassade dataprogram som kan sköta beräkningarna, men för kulturhistoriska föremål har beräkningsmodeller i flera fall utarbetats i samband med de försök som gjorts och finns inte tillgängliga kommersiellt.

Kommentar till fallstudierna

Vänersborgs kyrka

Mätningen som utfördes i taket i Vänersborgs kyrka utfördes på en enda punkt, vilken fick representera rörelserna hos fogsprickorna i hela taket. Det är ju inte alls säkert att rörelserna är likvärdiga överallt, beroende på träets beskaffenhet och luftens rörelser. Mätutrustningens placering är också viktig, så att den inte sitter för nära spikarna som taket är fäst med. Nu var rörelserna så små att även om de varit tre gånger så stora någon annanstans i taket, är rörelsefogarna ändå tillräckliga. Intressant är dock att rörelserna var så små trots att RF varierade mellan 25-65% över året. Här rör det sig dock om trä som sitter fast i en konstruktion och som är fastspikat och inte kan röra sig fritt. 65 % RF ligger på maxgränsen för de rekommenderade värden som diskuterades i kapitel 1, eller till och med över när det gäller försöken med fastlåst trä. Det lägsta värdet, 25 %, är långt under rekommenderade värden och ännu lägre värden har säkert förekommit när vintrarna varit kallare. Detta har också visat sig i att takbrädorna torkat isär och till och med gått ur spont på flera ställen. Den krympning som skett har gett upphov till en plastisk deformation som inte kan gå tillbaka hur mycket man än befuktar. Skadan är med andra ord redan skedd.

Vasaskeppet

Vasaskeppet är en mycket komplex konstruktion, som dessutom består av trä med olika nedbrytningsgrad som är konsoliderat med hygroskopisk PEG.

De referensbitar av trä som vägs på trossdäck har alla olika storlek och form och utgörs dels av överblivna delar från Vasa, dels av ett par nya träbitar. Vägningen började som ett test som blev permanentat och bitarna valdes för att representera olika träslag och dimensioner. Överensstämmelsen mellan bitar av olika träslag och mellan nytt och PEG-behandlat trä, är dock dålig på grund av de olika storlekarna som gör dem svåra att jämföra. Bäst hade varit om två bitar, en med kraftiga dimensioner och en med klenare, hade funnits för vardera PEG-behandlad furu och ek, samt ny furu och ek, med vikter som låg nära varandra inom varje dimension. Om de nya träbitarna först hade torkats, hade man också kunnat beräkna fuktkvoten för dessa. Att bestämma en fuktkvot i PEG-behandlat trä är dock vanskligt. PEG:en smälter om den utsätts för värme.

Krympmätningarna mellan stift inslagna i träet kom till tidigt i konserveringsprocessen för att kontrollera att träet inte krympte för mycket och för fort. Manuella mätningar var det enda som fungerade i den miljö som rådde under konserveringen när skeppet besprutades med PEG-lösning. Mätningarna har sedan fortsatt på samma sätt, med skillnaden att ett digitalt skjutmått används för större noggrannhet. Normalt utförs mätningarna av samma person, vilket säkrar att de utförs på ett likartat sätt. Ett sätt att komma ifrån eventuella skillnader i hur man mäter, är att ha fastmonterade mått. På Vasa finns tio sådana, vars värden dock inte är med i den här undersökningen. Mätningarna uppvisar en del stora skillnader mellan

mätpunkterna, som främst kunnat härledas till att delar med stora dimensioner inte reagerar på kortare förändringar i RF, vilket mindre eller tunnare delar gör.

Det enda säkra som träbitarna och krympmätningarna visar, är fuktrelaterade förändringar i vikt eller mått, vilket dock visat sig vara värdefull information. Det har gett information om olika träslag och dimensioners reaktioner vid förändringar i RF, indikerat problem med klimatanläggningen och i det längre tidsperspektivet visat att skeppet fortfarande är under upptorkning, något som enbart en mätning av RF och temperatur aldrig kunnat ge svar på.

Mätningarna på Vasa visar också på några svårigheter med mätningarna av RF. Vilka värden man får beror mycket på var sensorerna är placerade. Sitter en styrande sensor för nära ett utblås av konditionerad luft, blir mätningarna helt missvisande. Det är därför väldigt viktigt att välja var de styrande givarna ska sitta. Regelbunden kalibrering och kompletterande mätningar med till exempel en assmanpsykrometer är också nödvändigt.

7. Sammanfattning

Normalt mäts luftens relativa fuktighet(RF), för att ta reda på om miljön, som ett träföremål vistas i, är skadlig för föremålet eller inte. Värden mellan 40-65 % RF rekommenderas för hygroskopiska material. För att veta hur föremålet egentligen reagerar krävs dock mätningar som involverar själva föremålet och dess rörelser. Flera metoder har testats på träföremål inom kulturvårdsområdet. För att ta reda på mer om dessa metoder och deras användbarhet inom konservering, ställdes följande frågor:

- Vilka egenskaper har trä som påverkar hur det rör sig?
- Vilka mätmetoder har testats för mätning av dimensionsförändringar hos kulturhistoriska föremål av trä?
- Vilka är metodernas för- och nackdelar?
- Vilka är möjliga att använda rent praktiskt?
- Vad vinner man på detta jämfört med att bara mäta luftens RF?

I ett inledande kapitel behandlas trä som material i relation till fukt. Därefter gås olika mätmetoder igenom. För- och nackdelar anges liksom exempel på eventuell användning inom kulturvårdsområdet. Två fallstudier ger mer ingående exempel på tillämpning av några mätmetoder. Dels vägning och manuell mätning på Vasaskeppet, dels mätning med elektriska töjningsmätare i taket i Vänersborgs kyrka.

Trä och fukt

Trä är hygroskopiskt och för att förstå hur trä påverkas av fukt, behövs kunskap om träets uppbyggnad och dess egenskaper. När färskt trä torkas, sker ingen formförändring förrän allt fritt vatten i träet avgått och träet nått fibermättnadspunkten. För trä som ska användas till föremål och konstruktioner, krävs ytterligare torkning och då sker en krympning av träet. På grund av träets anisotropa egenskaper, krymper, och vid uppfuktning sväller, träet olika mycket axiellt, radiellt och tangentiellt. Andra faktorer påverkar också formförändringen, till exempel var träet är taget ur stammen, andelen kärnved, kvistighet och olika tillväxtstörningar. Dessa faktorer kan ge upphov till olika typer av deformationer som kupighet, skevhet, flatböjning och kantkrokighet. Om en deformation är tillfällig och kan gå tillbaka när den inte utsätts för påfrestning längre, kallas den för elastisk. Blir påfrestningen för stor och deformationen blir permanent eller leder till brott, kallas det plastisk deformation.

Träets vatteninnehåll eller fuktkvot beror på det omgivande klimatets RF. När RF ändras, ändras även fuktkvoten hos träet och träet rör sig. Endast om RF är konstant tillräckligt länge för att hela träföremålet ska få samma fuktkvot rakt igenom, nås en jämvikt med omgivande klimat. Sambandet mellan jämviktsfuktkvoten och RF illustreras i sorptionskurvor. Dessa ser lite olika ut för olika träslag, men har samma form. Sorptionskurvan planar ut kring 50 % RF vilket betyder att förändringar i RF här, ger små förändringar i fuktkvoten. Detta en grundläggande orsak till att klimatrekommendationerna för trä ligger i detta område. Detta förhållande förändras inte med åldern hos träföremålet.

På grund av träets heterogena egenskaper, är det svårt att förutse hur ett träföremål reagerar på förändringar i RF. Är det dessutom bemålat eller sitter fast i en konstruktion och inte kan röra sig fritt, är det ännu svårare. Det finns därför ett behov av att mäta fuktrelaterade formförändringar hos träföremål.

Mätmetoderna

Samtliga mätmetoder måste kombineras med mätningar av RF och temperatur, för att få ett samband mellan orsak och verkan.

De enklaste metoderna för att mäta fuktrelaterade förändringar är manuell mätning och gravimetrisk metod (vägning). Båda har låga kostnader, är enkla att förstå och utföra. Den manuella mätningen kräver tydliga punkter att mäta mellan och visar på svällning och krympning av hela eller delar av föremål. Vägning visar på att ett upptag eller avgivande av fukt sker, samt hur mycket och hur fort det går. Båda dessa metoder används på Vasamuseet.

Töjningsmätare måste fästas på föremålet, vilket är en nackdel. De mäter rörelser hos delar av träet, eller hos en fog eller spricka. Elektriska töjningsmätare skruvas vanligen fast och består av en fast del och en rörlig del som kan tryckas ihop eller dras ut vid rörelser i träet. Genom mätaren leds ström och när det sker en rörelse förändras spänningen. Mätningar med denna metod utfördes i taket på Vänersborgs kyrka. En variant med dubbla töjningsmätare används just nu på paneler på Läckö slott.

De optiska töjningsmätarna (Fiber Bragg Grating Sensors), limmas fast och består av tunna glasfibrer med inlagda gitter som givare. Genom givaren skickas ljus som delas upp av gittret och återsänder UV-strålning av en viss våglängd. När fibern töjs eller komprimeras förändras våglängden på UV-strålningen, vilket registreras av en elektronisk enhet. Fibrerna är tunna och lätta och kan innehålla flera mätpunkter. Utrustningen är dock dyr. Metoden har testats på en rekonstruerad träpannå.

Metoder för helfältsmätning avser fotografiska metoder som kan visa förändringar hos ett helt föremål i bilder eller som en filmsekvens. Mätningar kan utföras utan att föremålet vidrörs. Time-lapse foto kan synliggöra förändringsförlopp som inte är märkbara för blotta ögat, genom att man tar bilder på ett föremål med ett visst intervall och sedan spela upp dem så att långsamma förlopp visas snabbt. Metoden har använts för att synliggöra fuktrelaterade rörelser hos barkmålningar, men endast relativt stora rörelser kan registreras.

Helfältsmätning med holografiska mätmetoder och då främst ESPI (electronic speckle pattern interferometry), använder sig av laser för att belysa föremålet. Laserstrålen delas upp i två, där den ena belyser föremålet vars återkastade sken sammanfaller med den andra strålen på en fotografisk film eller digitalt dito. Mellan dessa strålar skapas ett interferensmönster. Vid förskjutningar hos föremålet ändras mönstret och en förändring registreras. Både förskjutningar i samma plan och i djupled kan mätas med hög noggrannhet. Metoden har bland annat använts för att mäta deformationer hos violiner och träpannåer som utsatts för en påfrestning.

Vid användning av akustisk emission mäter man de ljud som alla material avger som utsätts för påfrestning, till exempel. fuktrelaterade rörelser. Sensorn måste ha god kontakt med föremålets yta, men kan spännas fast och metoden är icke-förstörande. Den har testats på en skulptur i en altaruppsats.

Flera metoder som mäter fukthalt, använder sig av elektromagnetiska vågor. De är alla icke-förstörande, men behöver kontakt med föremålets yta och ingen av metoderna mäter särskilt djupt. De jag tar upp är radiofrekvent spektroskopi, mätning med mikrovågor, infraröd termografi, mätning med Nära infraröd strålning (NIR) och kärnmagnetisk resonans (NMR). Av dessa är den endast NMR som jag hittat belägg för att ha använts inom kulturvårdsområdet. Metoden bygger på att ett magnetfält påverkar orienteringen av väteprotonerna i vattnet. När de sedan utsätts för en radiovåg rör de på sig och ger upphov till en elektrisk signal som kan mätas. Det finns portabel utrustning men den har sämre noggrannhet. Metoden används regelbundet för analys och skadedokumentation, men har även testats för mätning av fukt i träföremål och böcker.

Fallstudierna

I Vänersborgs kyrka utfördes mätningar av K-Konservator med en linjärmätare över en fogspricka i innertaket. Takbrädorna hade torkat isär och gett upphov till stora glipor där skräp från vinden ramlade ner. Taket hade tidigare varit täckt med glasfiberväv, men församlingen ville återställa taket. Det beslutades att de största gliporna skulle tätas med trälister. Syftet med mätningen var att utröna hur stor rörelsefog som skulle behövas. En linjärmätare av typen potentiometer användes, med ett mothåll i form av ett vinkelbeslag och utrustningen skruvades fast. Mätningarna pågick ett år, liksom mätningar av RF och temperatur. RF varierade över året mellan 25-65 %, men rörelserna över fogsprickan var mycket små med en maximal förändring på 0,4 mm.

På Vasamuseet utförs manuella krympmätningar med skjutmått mellan stift inslagna i Vasaskeppets trä. Ursprungligen kom de till för att mäta krympningen under och efter konserveringen med polyetylenglykol. Ombord på skeppet finns också träbitar som vägs regelbundet, dels PEG-konserverade träbitar från Vasa och dels nytt trä. Dessa används för att se hur träet reagerar med variationer i klimatet. I uppsatsen undersöks mätvärden från tiden före, under och efter bytet av klimatanläggning under 2004. Fram till dess hade träbitarna stadigt minskat i vikt med säsongsvisa avvikelser. När den nya anläggningens sensorer blev styrande för klimatet ökade träbitarna ombord markant i vikt under flera månader, trots att klimatanläggningens givare visade ett stabilt klimat. Två av de styrande givarna skickades då in för kalibrering och visade sig mäta tre procentenheter för lågt.

Krympmätningarna uppvisar på flera mätpunkter ett likartat mönster som värdena för vägnigen, medan andra mätpunkter har en stadig krympning och har inte märkbart påverkats av bytet av klimatanläggning. De två typerna undersöks beträffande placering på skeppssida, konstruktionsdel och däck. Den slutsats man kan dra, är att skeppssida och däck verkar sakna betydelse. Däremot är konstruktionsdelar med kraftigare dimensioner som balkar, balkvägare och kattspår överrepresenterade i gruppen som inte svällde utan fortsatte krympa trots den nya anläggningens felaktiga klimat. De påverkades alltså inte av en RF höjning som varade i ett halvår. Resultatet är dock inte entydigt och alla typer av dimensioner finns i båda grupperna.

Slutsatser

De olika mätmetoderna ger olika typer av information. Vid val av en mätmetod finns flera aspekter att tänka på, som vilken information man behöver och om värdet av informationen är större än skadan av eventuella ingrepp. Hur kunskaps- och kostnadskrävande är de? Kan de användas i fält? Hur noggranna är mätningarna?

Samtliga metoder måste kombineras med mätningar av luftens RF och temperatur för att skapa ett samband mellan orsak och verkan. Metoderna kan också behöva kombineras med varandra för att få fullödig information.

Bildförteckning

Omslagsbild: Detalj av dopängel i Svarttorps kyrka före konservering. Foto: Sofie Simonson.

Figur 1: Trädstammens uppbyggnad. Cornelia Thelander, Thelander Arkitektur & Design AB för Träguiden.

<http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=1059&contextPage=4962>, 2012-01-07.

Figur 2: Sorptionskurva. Cornelia Thelander, Thelander Arkitektur & Design AB för Träguiden.

<http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=1004&contextPage=999>, 2011-11-10.

Figur 3: Snitt genom trädstammen. Ur: Ternstedt, E. (1976) *Kompendium i trämateriallära*. 6 uppl. Stockholm: Statens Industriverk, SIFU-Träteknik.

Figur 4: Mätning med dubbla linjärmätare. Förenklade skisser av Sofie Simonson efter bilder i artikeln: Uzielli, L., Fioravanti, M., Casazza, O., Perucca, G. (1992) "A technique for double-sided monitoring..." Se litteraturförteckningen.

Figur 5: Holografisk fotografering. Bild av Björn Lindell. [Lasergruppen](#) för kursen *Informationssökning i fysik, energi eller energiteknik*, 5p (Chalmers, VT 1998)

<http://www.arctia.org/lasersidan/hologram.html> 2011-07-13.

Figur 6 & 7: Linjärmätare med kringutrustning för mätning i taket på Vänersborgs kyrka. Foto: Sofie Simonson.

Figur 8: Diagram över spänning-, RF- och temperaturmätningar i Vänersborgs kyrka. K-Konservator, Göteborg.

Figur 9: Vägning på trossdäck. Foto: Ove Olsen, SMM/Vasamuseet.

Figur 10: Diagram över viktförändringar hos trästycke fnr. 19499. Sofie Simonson.

Figur 11: Diagram över krympning för mätpunkt 92. Sofie Simonson.

Figur 12: Diagram över krympning för mätpunkt 75. Sofie Simonson.

Käll- och litteraturförteckning

Otryckta källor

Bylund Melin, C. (2008) *Sammanställning av metoder för mätning av fukt, spänning och dimensionsförändring i material orsakade av ändringar i relativ luftfuktighet och temperatur*. KTH. Stockholm.

Klimatkrav i Vasamuseets skeppshall, (2001) Beslutsprotokoll 2001-10-22, Dnr. 697/01-12. Vasamuseet. Stockholm.

Informanter

Informant 1: Daniel Mörtsjö, Regal Components AB, Samtal 12/8 2011.

Informant 2: David Edvardson, Konservator, K-Konservator, Göteborg. Samtal under augusti 2011.

Informant 3: Ove Olsen, Konserveringstekniker, Statens Maritima Museer/Vasamuseet. Samtal och mailkontakt: 25/10, 4/11 och 23/11 2011.

Tryckta källor och litteratur

Ambrosini, D. & Paoletti, D. (2004) Holographic and speckle methods for the analysis of panel paintings. Developments since the early 1970s. I: *Reviews in conservation*, nr 5, s. 38-48.

Asmus, J. F.; Guttari, G.; Lazzarini, L.; Musumeci, G. & Wuerker, R. F. (1973) Holography in the conservation of statuary. I: *Studies in Conservation*, vol.18, nr. 2, s. 49-63. London: IIC.

Bernatowicz, G., Militzer, K-E. & Niemz, P. (1992) Using of acoustic emission analysis for the assessment of the material quality during the drying of wood. I: *Understanding the wood drying process: a synthesis of theory and practice*. 3rd IUFRO International Wood Drying Conference 1992, s. 84-89. Wien: IUFRO.

Björdal, C. (1999) Trämateriäl – historiskt och arkeologiskt. I: *Tidens tand*, s. 113-127. Fjaestad, M. (red.) Stockholm: Riksantikvarieämbetet.

Blümich, B., Casanova, F., Perlo, J., Presciutti, F., Anselmi, C., Doherty, B. (2010) Noninvasive testing of art and cultural heritage by mobile NMR. I: *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, nr. 6, s. 761-770.

<http://pubs.acs.org.ezproxy.ub.gu.se/doi/pdfplus/10.1021/ar900277h>

Boone, P. M. & Markov, V. B. (1995) Examination of museum objects by means of video holography. I: *Studies in Conservation*, vol. 40, nr 2, s. 103-109. London: IIC.

Buck, R. D. (1952) A note on the effect of age on the hygroscopic behaviour of wood. I: *Studies in Conservation*, vol. 1, nr 1, s. 39-44. London: IIC.
<http://www.jstor.org/stable/1504944>, 2011-09-09.

Dulieu-Barton, J. M.; Dokos, L.; Eastop, D.; Lennard, F.; Chambers, A. R. & Sahin, M. (2005) Deformation and strain techniques for the inspection of damage in works of art. I: *Reviews in Conservation*, nr. 6, s. 63-73.

Falciai, R., Trono, C., Lanterna, G., Castelli, C. (2003) Continuous monitoring of wooden works of art using fiber Bragg grating sensors. I: *Journal of Cultural Heritage*, nr. 4, s. 285-290.

HBM Sverige. Optical sensing. <http://www.hbm.com/se/menu/applikationer/experimentiell-spaenningsanalys/optical-sensing/working-principle/>, 2011-06-10.

Hoadly, R. B. (2000) *Understanding wood: A craftsman's guide to wood technology*. Newtown: The Taunton Press.

Hocker, E. (2010) Maintaining a stable environment: Vasa's new climate-control system. I: *APT Bulletin: Journal of preservation technology*, vol. 41, nr. 2-3, s. 3-9.
<http://vasamuseet.se/Documents/Forskning%20och%20bevarande/Emma%20Hocker%20climate%20article.pdf>, 2011-12-02.

Håfors, B. & Persson, U. (1997) Monitoring changes in water content of the Vasa wood with a resistance meter. I: *Proceedings of the 6th ICOM Group on Wet Organic Archaeological Materials conference*. Hoffmann, Per; Daley, Thomas W.; Grant, Tara; and Spriggs, James A.(Red.). ICOM Committee for Conservation. Working Group on Wet Organic Archaeological Materials (1997), s. 35-46,

Håfors, B. (2001) *Conservation of the Swedish warship Vasa from 1628*. Stockholm: Vasamuseet.

Hägg, K. (2008) *Mätning av träddelar och flis på Dävamyran, Umeå energi*. Examensarbete. Umeå: SLU, Institutionen för skoglig resurshushållning.
http://ex-epsilon.slu.se:8080/archive/00002649/01/Arbetsrapport_223.pdf, 2011-11-11.

Jakiela, S., Bratasz, L. & Kozłowski, R. (2008) Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. I: *Wood science and technology*, vol. 42, nr. 1, s. 21-37.
<http://www.springerlink.com.ezproxy.ub.gu.se/content/xq5662608823231t/fulltext.pdf>, 2011-11-15.

Jakiela, S., Bratasz, L. & Kozłowski, R.(2008) Acoustic emission for tracing fracture intensity in lime wood due to climatic variations. I: *Wood science and technology*, vol. 42, nr. 4, s. 269 -279.
<http://www.springerlink.com.ezproxy.ub.gu.se/content/2677210206p5m64g/fulltext.pdf>, 2011-11-16.

Kawamoto, S & Williams, R. S. (2002) Acoustic emission and acousto-ultrasonic techniques for wood and wood-based composites: a review. Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki, Japan.
<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=umn.31951d02988683e;page=root;view=image;size=100;seq=4;num=2>. 2011-11-16.

Kreuzer, M. (2007) *Strain measurement with Fiber Bragg Grating Sensors*. Darmstadt. HBM.
http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/2007/FBGS_StrainMeasurement_en.pdf . 2011-06-10.

Langhoff, A.; Facchini, M. & Zanetta, P. (1994) Static deformation measurements on violins by optical TV-holography. I: *4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art*, Berlin 3-8 Oktober 1994, s. 155-161.

Mecklenburg, Tumosa & Erhardt (1994) Structural response of painted wood surfaces to change in ambient relative humidity. I: *Painted wood: History and conservation*, del 6: Scientific Research, s. 464-483. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Meinlschmidt, P.; Gülker, G.; Hinsch, K. D.; Wolf, K.; Oldenburg (1994) Laser optical deformation monitoring in historical monuments. I: *4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art*, Berlin 3-8 Oktober 1994, s.137-146.

Morén, T. (1993) *Creep, deformation and moisture redistribution during air convective wood drying and conditioning*, diss. Luleå:Luleå tekniska högskola.

Morén, T. & Sehlstedt-Persson, M. (1992) Creep deformations of the surface layer of timber boards during air circulation drying. I: *Understanding the wood drying process: a synthesis of theory and practice*. 3rd IUFRO International Wood Drying Conference 1992, s. 96-103. Wien: IUFRO.

Nationalencyklopedin. [Bd] 14, (1994) Engström, C. (red.). Höganäs: Bra böckers förlag.

Nordin, H. (2003) *Virkets formförändring och dess betydelse vid postning*. Examensarbete, D-nivå. Uppsala: SLU, Institutionen för skogens produkter och marknader..
http://ex-epsilon.slu.se:8080/archive/00000208/01/exjobb_23.pdf, 2011-11-17.

Paoletti, D. & Schirripa Spagnolo, G. (1995) The potential of portable TV-holography for the examining of frescoes in situ. I: *Studies in Conservation*, vol. 40, nr 2, s.127-132. London: IIC.

Pinchin, S. E. (2008) Techniques for monitoring moisture in walls. I: *Reviews in Conservation*, nr. 9. London. IIC.

Protimeter MMS: För fuktmätning i byggnader och omgivning. (2008) Finisterra AB, Nacka. Produktbeskrivning.
<http://www.kimo.se/pdf/mms.pdf>, 2011-11-11.

Regal AB. Linjärgivare. <http://www.regal.se/produkter/linjargivare>, 2011-11-08.

Sandström, M., Fors, Y. & Persson, I. (2003) *The Vasa's new battle: Sulfur, acid and Iron*. Vasa studies 19. Stockholm: National Maritime Museums.

Smith, N.; Roth, K. & Otieno-Alego, V. (2003) Dimensional change of Australian Aboriginal bark paintings using non-destructive monitoring techniques. I: *Conservation Science 2002*, s. 70-75. London: Archetype Publications Ltd.

Skåre, T. (2005) *Hur kan den oförstörande provningsmetoden akustisk emission användas som en kvalitetssäkrings- och övervakningsmetod vid plåtformning*. Högskolan i Kristianstad.
http://www.hkr.se/upload/EK/doc/pdf/Forskningensdag/Thoams_Skare.pdf

Sågvall, C. (1961) *Trämateriellära*. Stockholm. Brevskolan.

Ternstedt, E. (1976) *Kompendium i trämateriellära*. 6 uppl. Stockholm: Statens Industriverk, SIFU-Träteknik.

Thomson, G. (1978) *The museum environment*. London. 2 uppl. Butterworth-Heinemann.

TräGuiden. www.traguiden.se, 2011-10-15.

Uzielli, L., Fioravanti, M., Casazza, O., Perucca, G. (1992) A technique for double-sided monitoring of the deformations of the wooden supports of panel paintings: The experience of Giotto's 'Maestà di Ognissanti'. I: *3rd International Conference on Non-Destructive Testing, Microanalytical Methods and Environment Evaluation for Study and Conservation of Works of Art*, Viterbo 4-8 oktober 1992, vol. I, s. 499-514. Brescia: Italian Society for Nondestructive Testing.

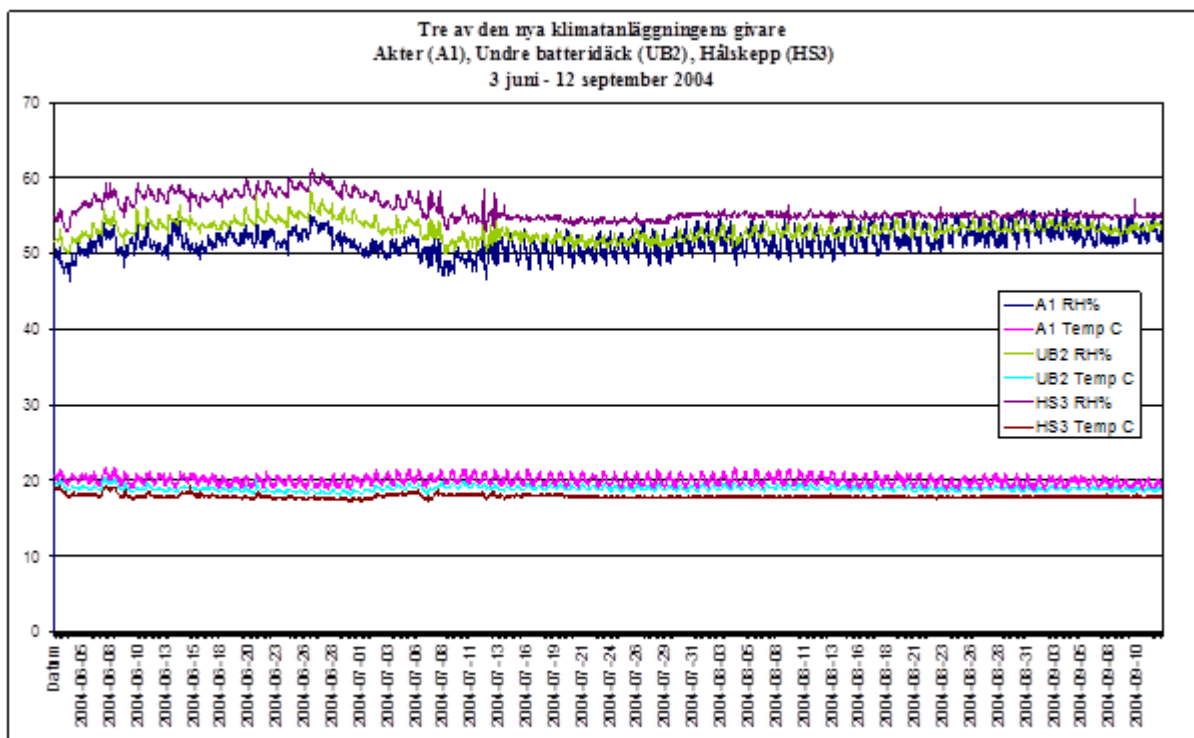
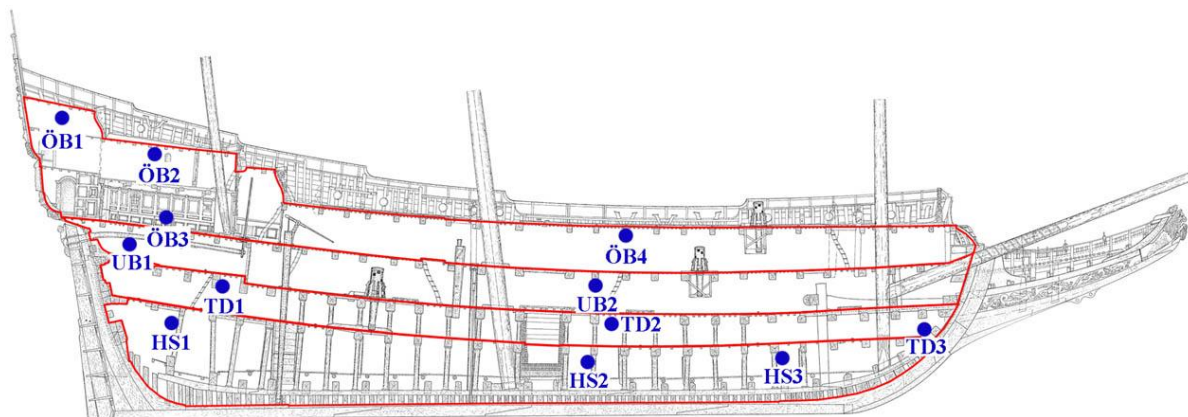
Wiberg, P. (1998) *CT-scanning of moisture distribution and shell formation during wood drying*. Licentiatavhandling. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.

Vikberg, T. (2010) *Fuktkvotsmätare för träindustrin: En kartläggning av metoder för mätning av fuktkvoter i intervallet 7-18 fuktkvotprocent*. Teknisk rapport. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
http://pure.ltu.se/portal/files/5233206/Fuktkvotsmatere_for_traindustrin, 2011-11-11.

Wikipedia: *Holographic interferometry*. http://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_interferometry
2011-10-16.
Time-lapse photo. http://en.wikipedia.org/wiki/Time-lapse_photography, 2011-11-07.

BILAGA 1 Sektionsritning av Vasa och klimatdiagram

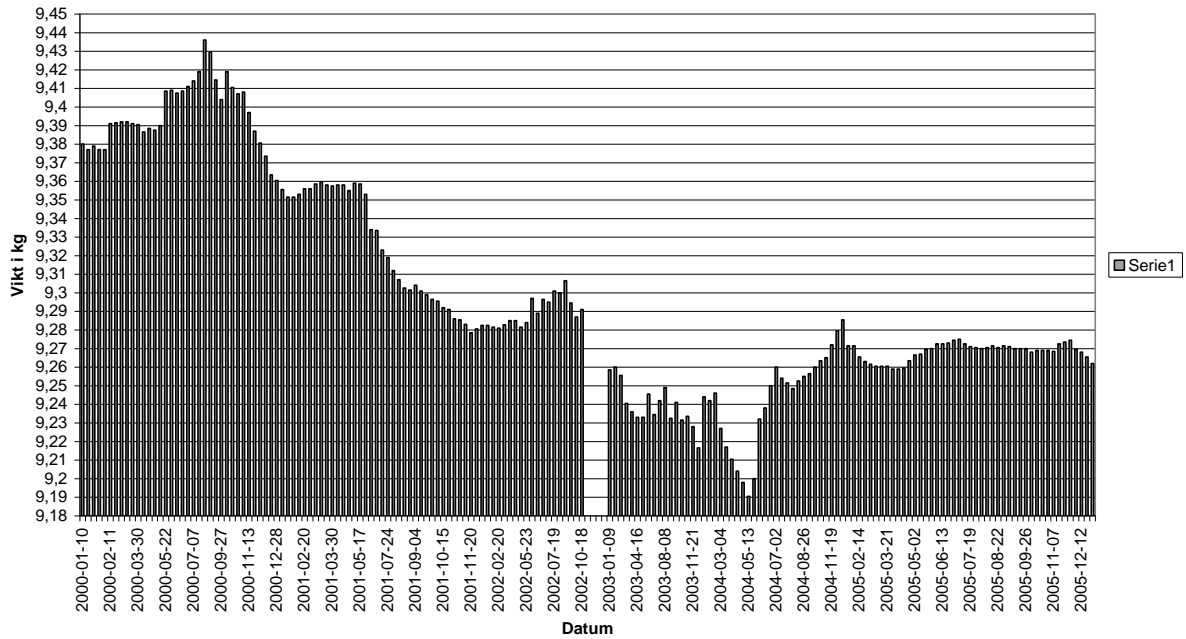
Placeringen av de 12 av klimatanläggningens givare som finns ombord på Vasaskeppet, samt diagram med klimatkurvor från tre av dessa under perioden juni-september 2004.



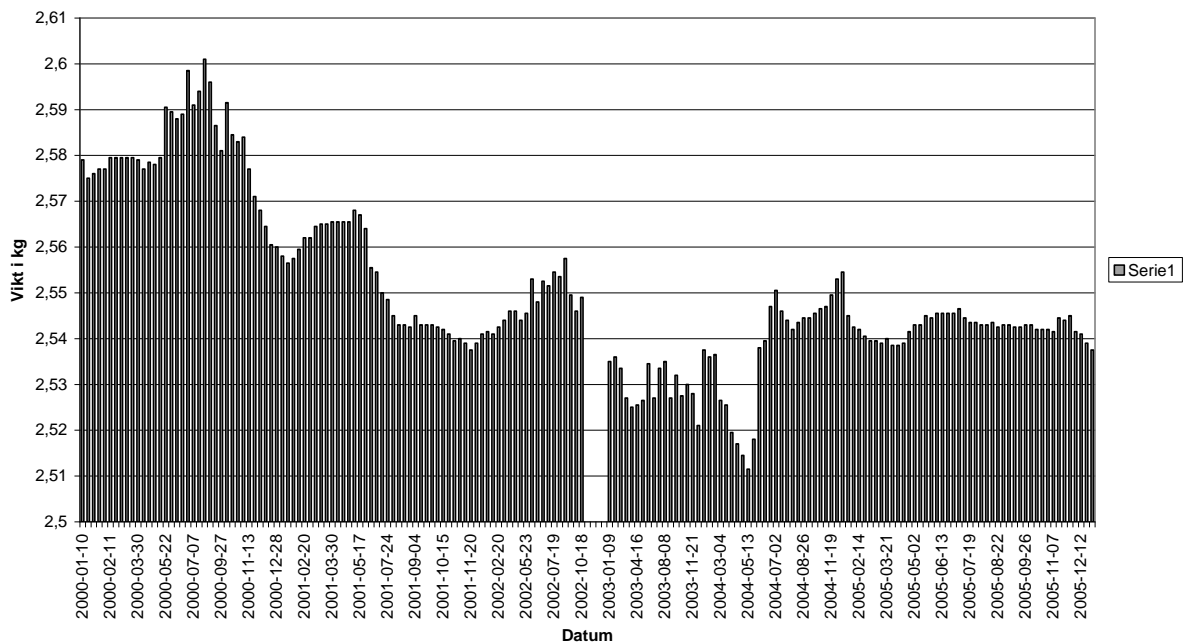
BILAGA 2. Viktdiagram för träbitar på Vasa

Diagram över viktförändringen hos träbitar förvarade på Vasaskeppets trossdäck 2000-2005. På grund av bitarnas olika vikt, ser diagrammen olika ut, men mellan skalstrecken är det 10 gram på samtliga.

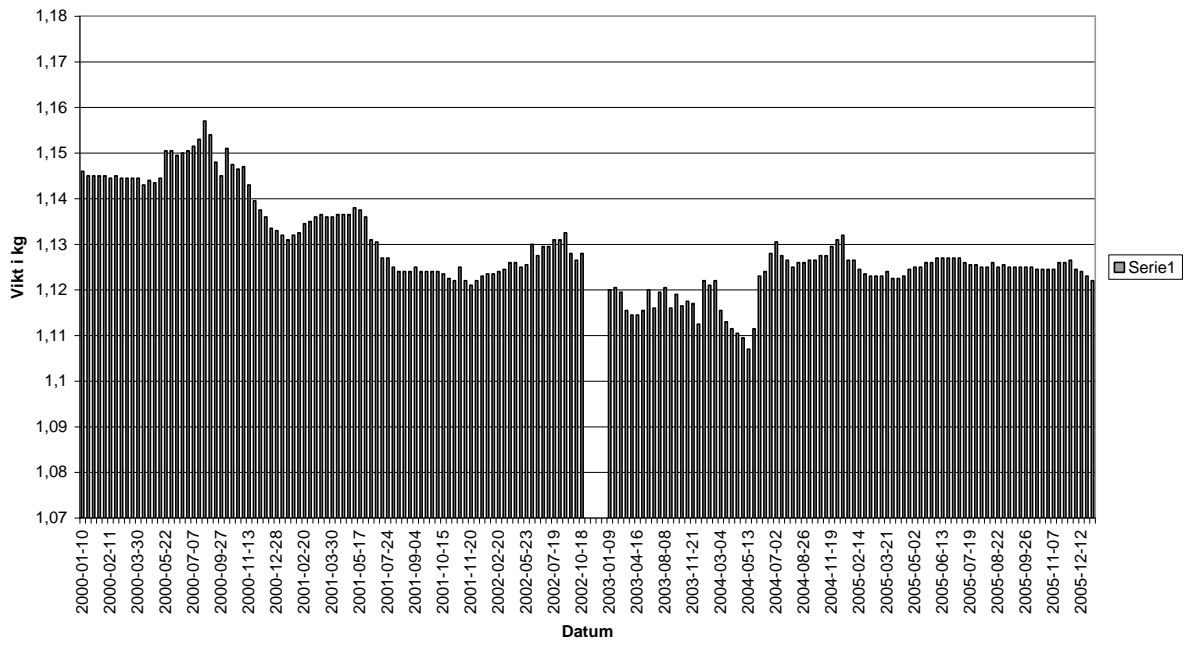
Fnr. 19948 ek



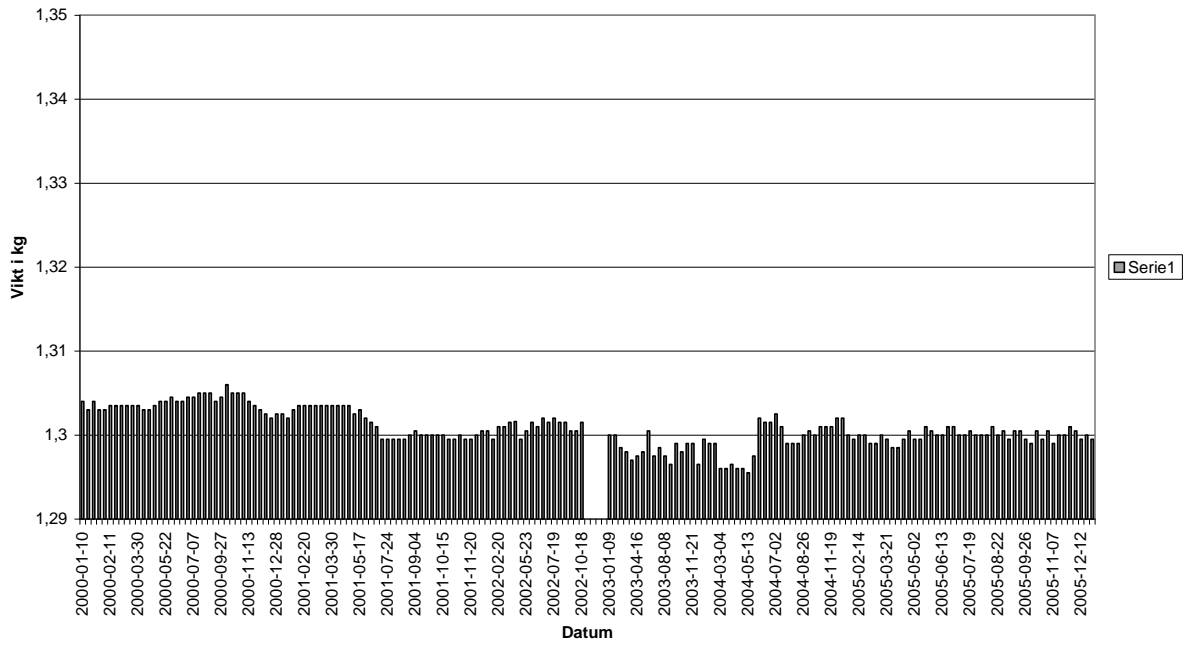
Fnr. 6499 ek



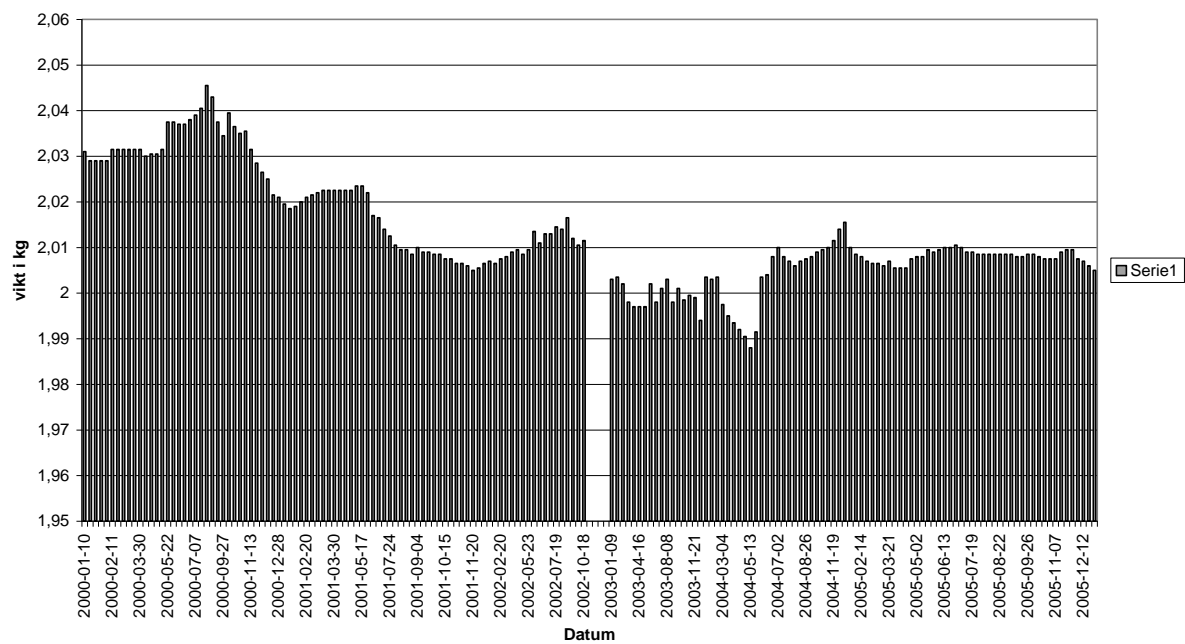
Fnr. 6971 ek



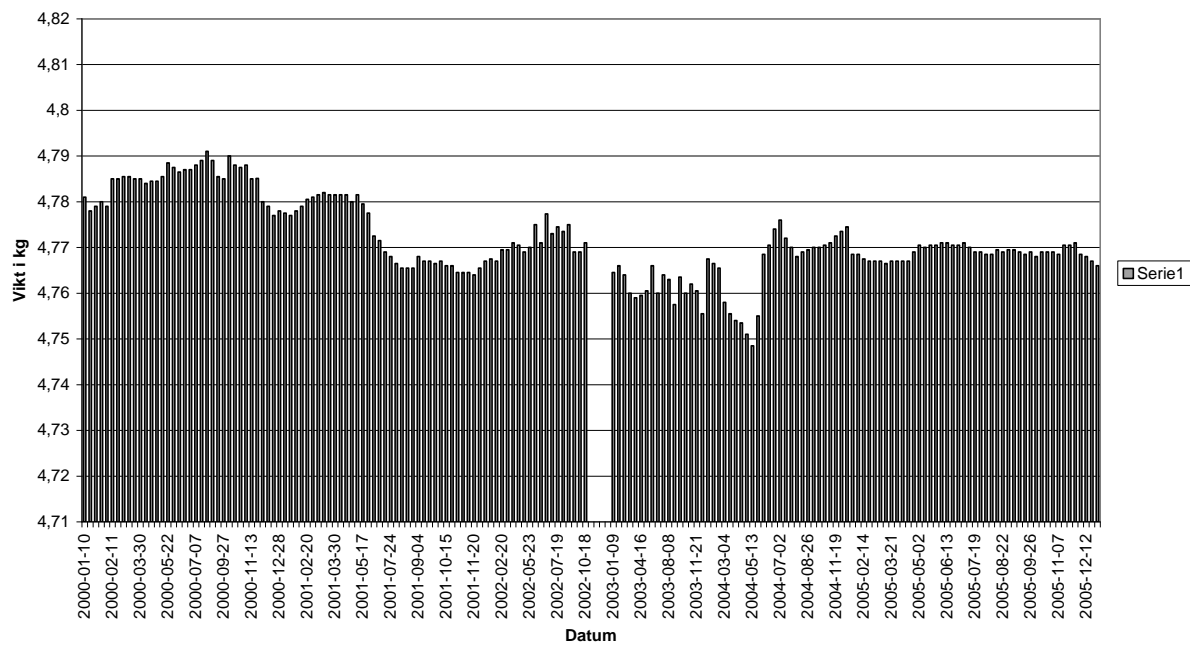
Ny ek



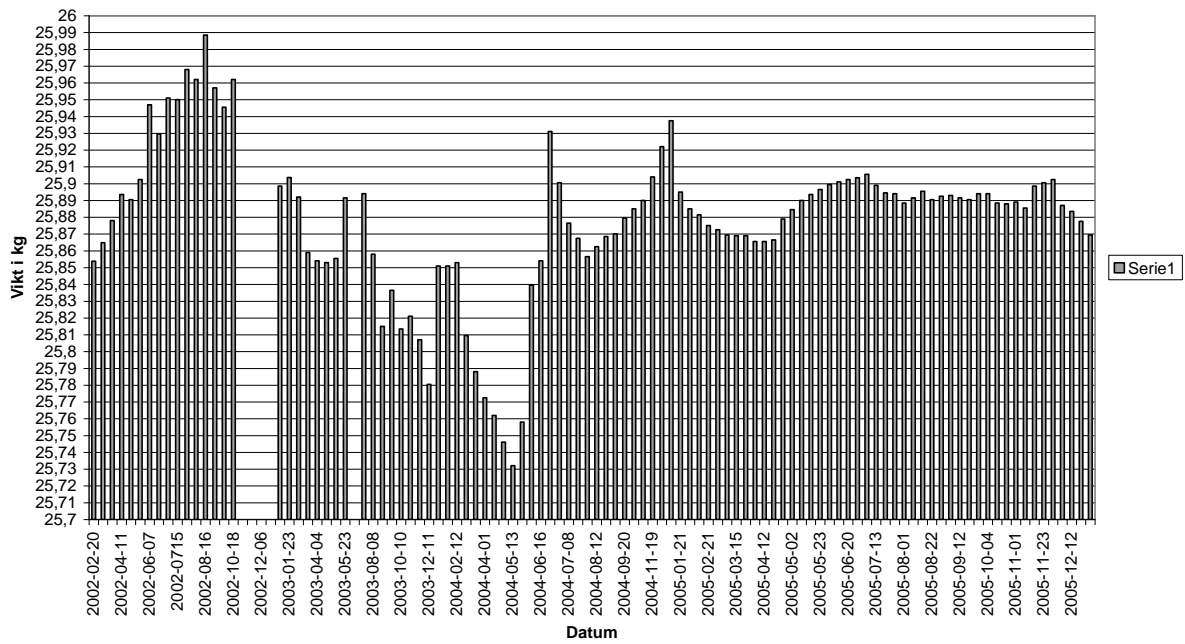
Fnr. 19499 furu



Ny furu

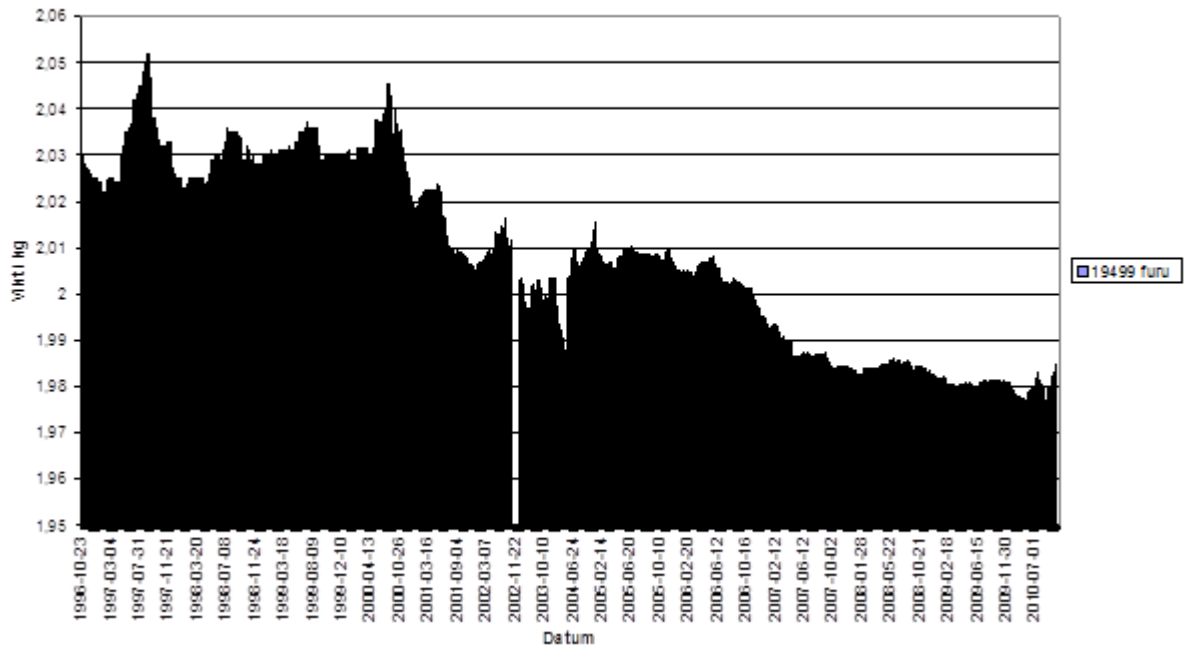


Fnr. 11884 furu



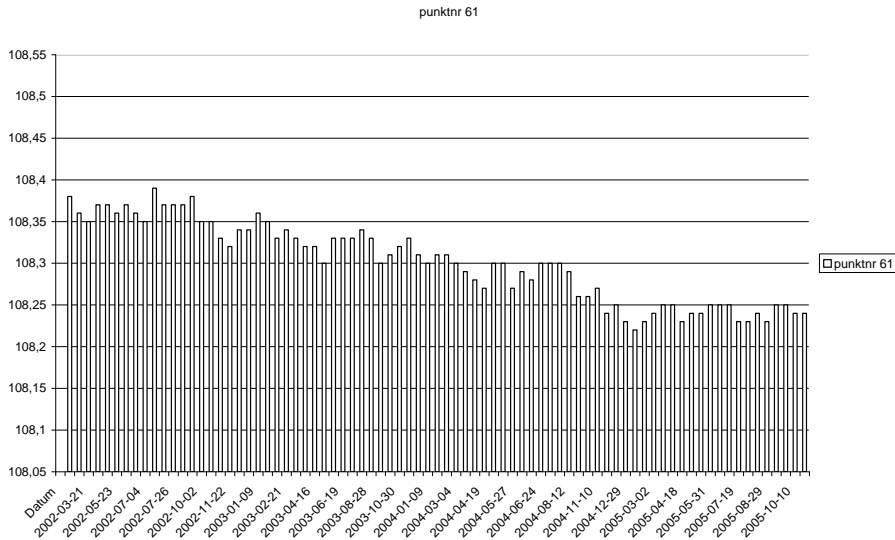
Viktdiagram för PEG-konserverad furu, perioden okt.1996-juli 2010.

Fnr. 19499 furu



BILAGA 3. Diagram från krympmätningar på Vasa

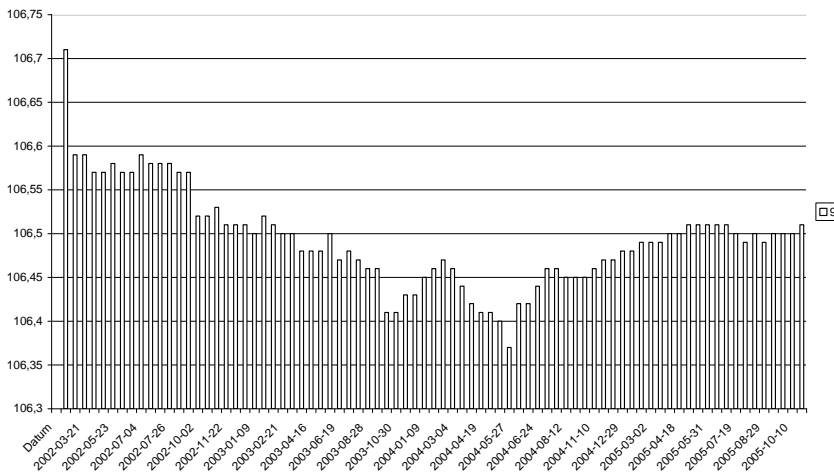
Diagram över krympmätningar på och i Vasaskeppet. Mätvärden från perioden 2002-2005. Diagrammen är ordnade efter däck. Från övre däck till hålskeppet och därefter under skeppet. Skala i mm.



Mätpunkt 61

Relingsstötta i ek.
Övre däck
Babord sida
Balksektion 4.

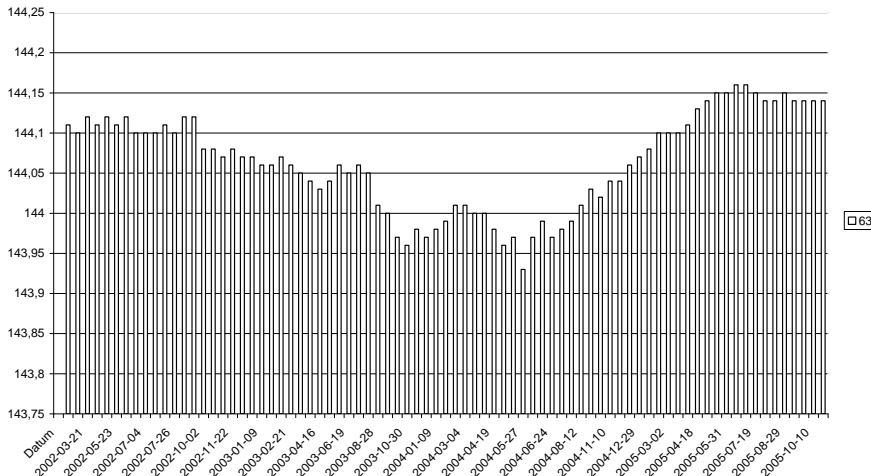
9



Mätpunkt 9

Balkvägare i ek
Övre batteridäck
Babord sida
Balksektion 11.

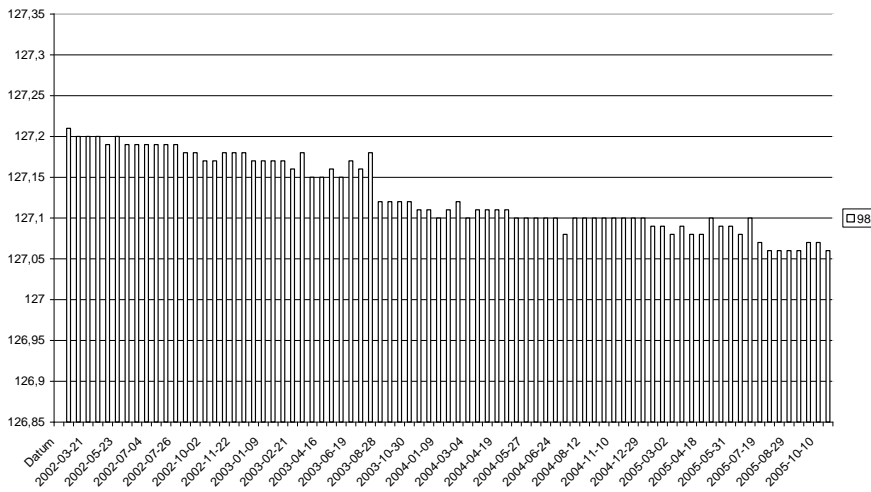
63



Mätpunkt 63

Garneringsplanka i ek.
Övre batteridäck
Styrbord sida
Balksektion 11.

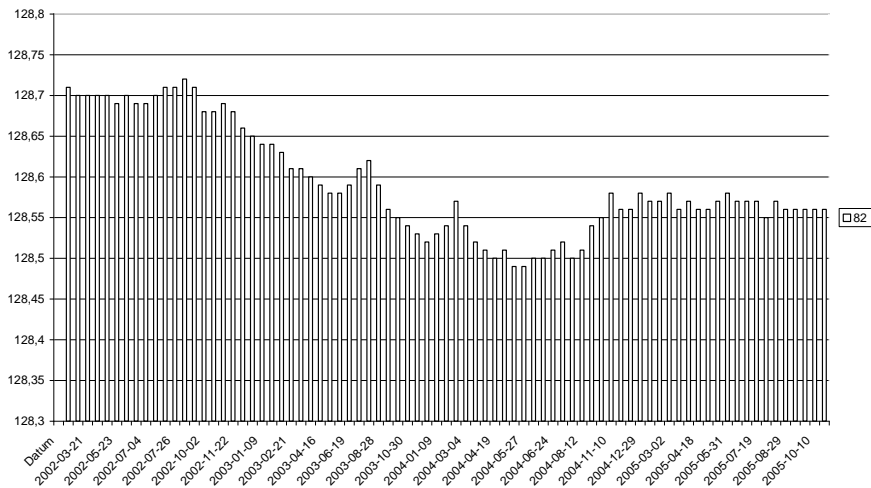
98



Mätpunkt 98

Balk i ek
Undre batteridäck,
vid trappan.
Balk 12

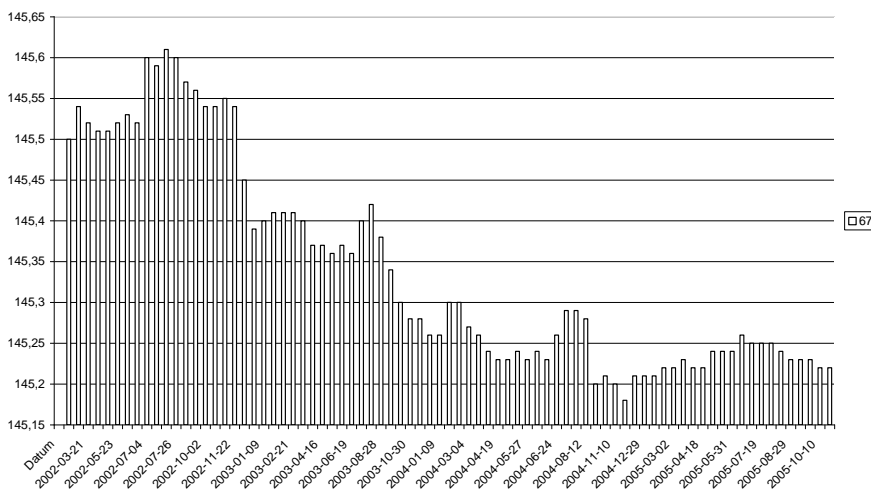
82



Mätpunkt 82

Balkvägare i ek
Undre batteridäck
Styrbord sida
Balksektion 8

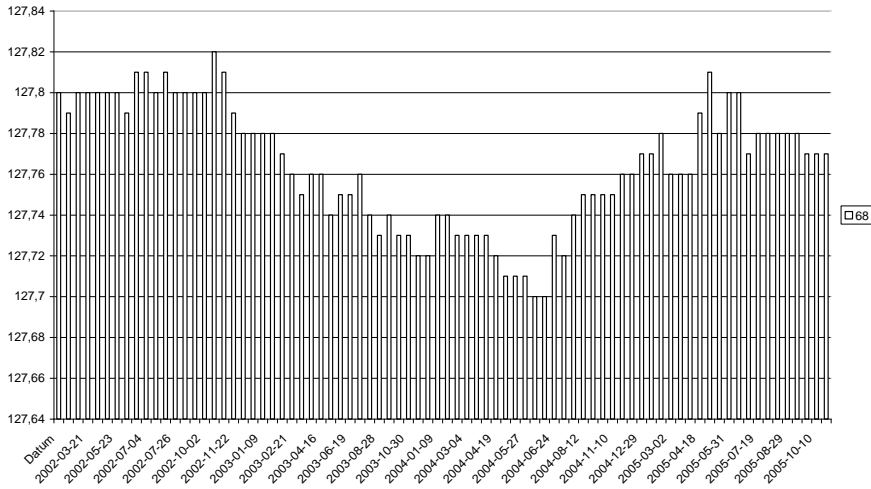
67



Mätpunkt 67

Balkvägare i ek.
Undre batteridäck
Babord sida,
Balksektion 8.

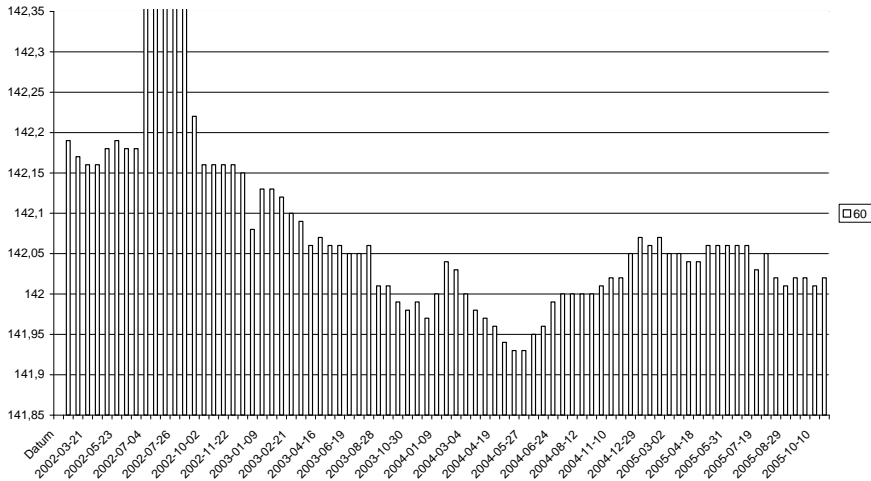
68



Mätpunkt 68

Balk i ek
Undre batteridäck
Midskepps vid
trappan
Balk 11, sidan mot
fören.

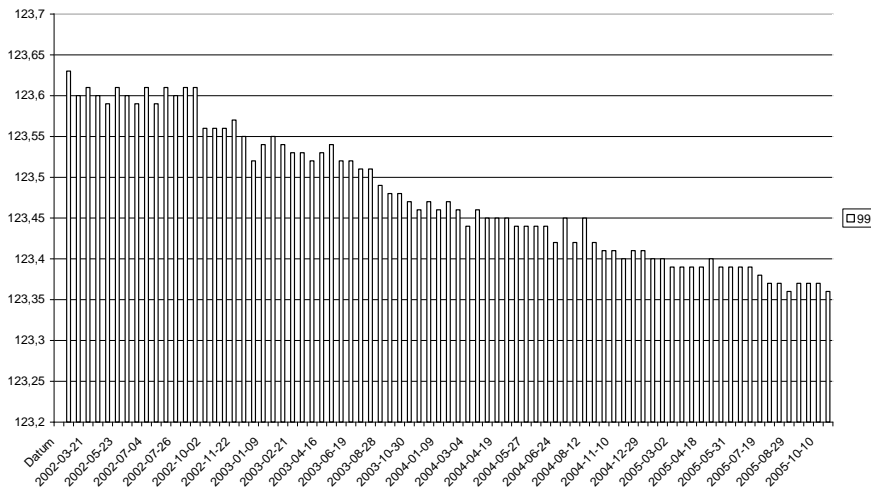
60



Mätpunkt 60

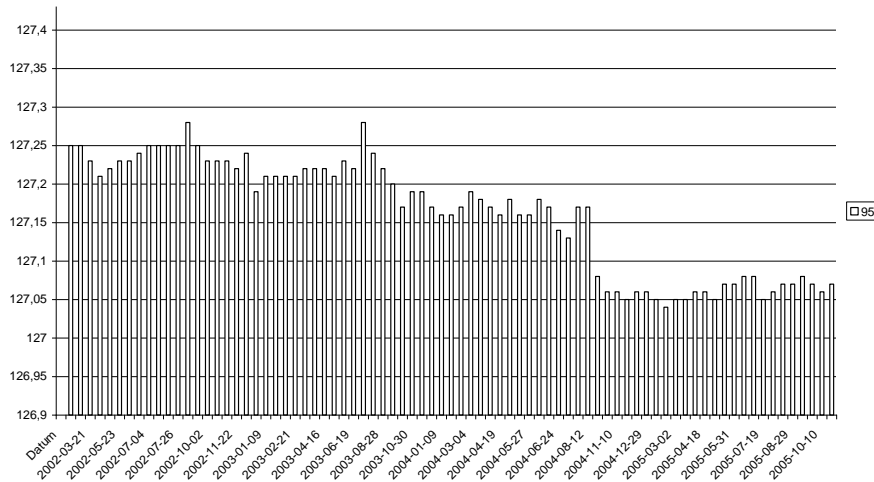
Däcksplanka i ek
Undre batteridäck
Midskepps, babord
om stormasten.
Nedanför balk 15.

99



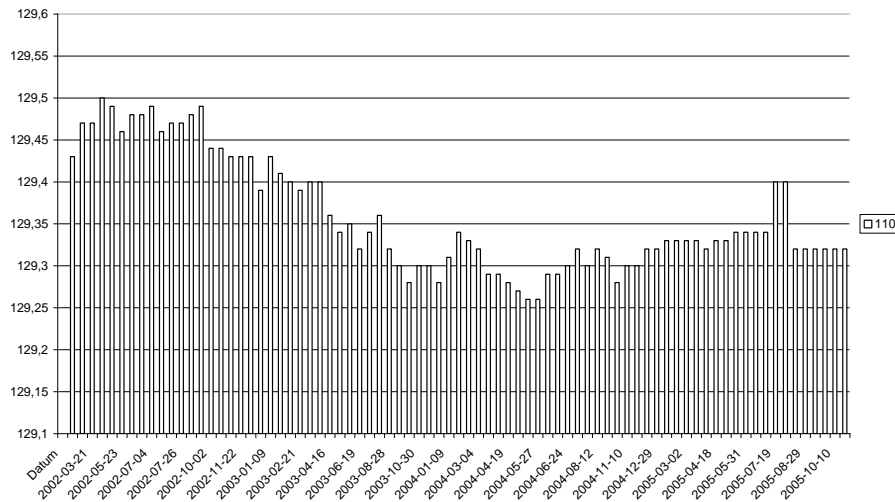
Mätpunkt 99

Balk i ek
Undre batteridäck
Babord sida
Balk 20.



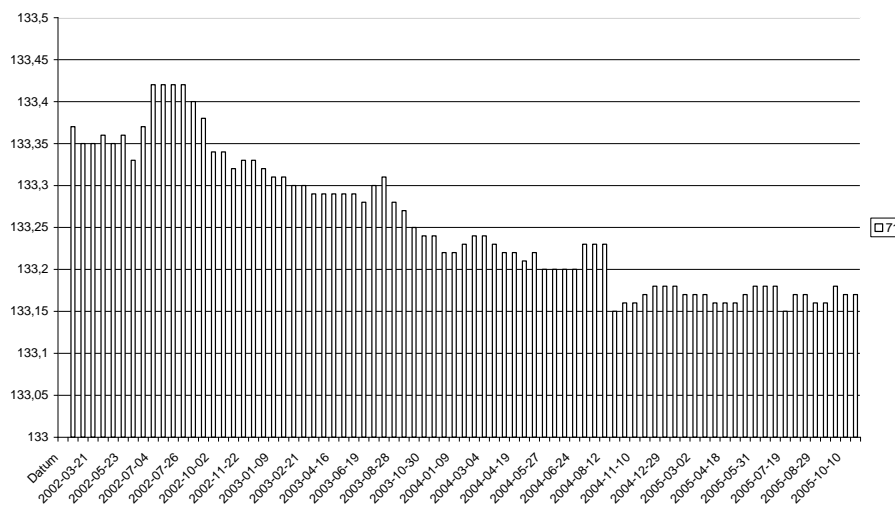
Mätpunkt 95

Balk i ek
Trossdäck, åt
styrbord
Balk 26, sidan mot
aktern.



Mätpunkt 110

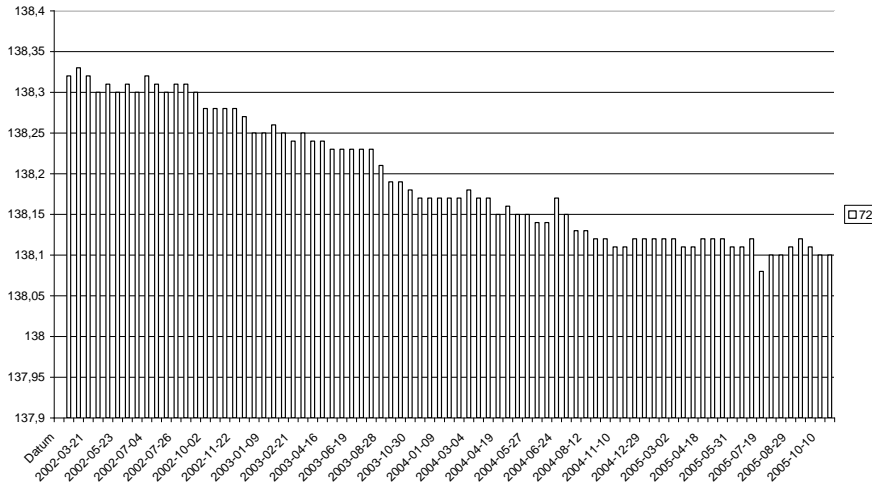
Däcksplanka i ek
Trossdäck, åt
babord sida.
Balksektion 24.



Mätpunkt 71

Garneringsplanka i
ek
Trossdäck.
Styrbord sida
Balksektion 18

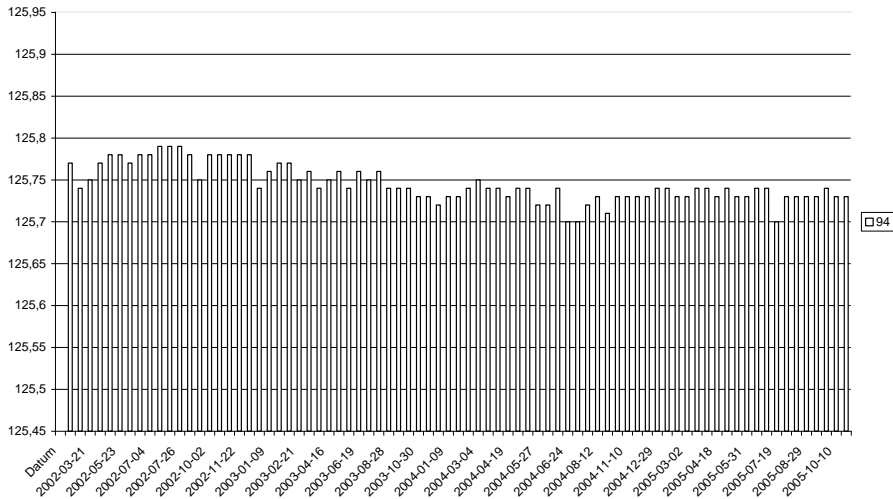
72



Mätpunkt 72

Vaterbord i ek
Trossdäck
Styrbord sida
Balksektion 18.

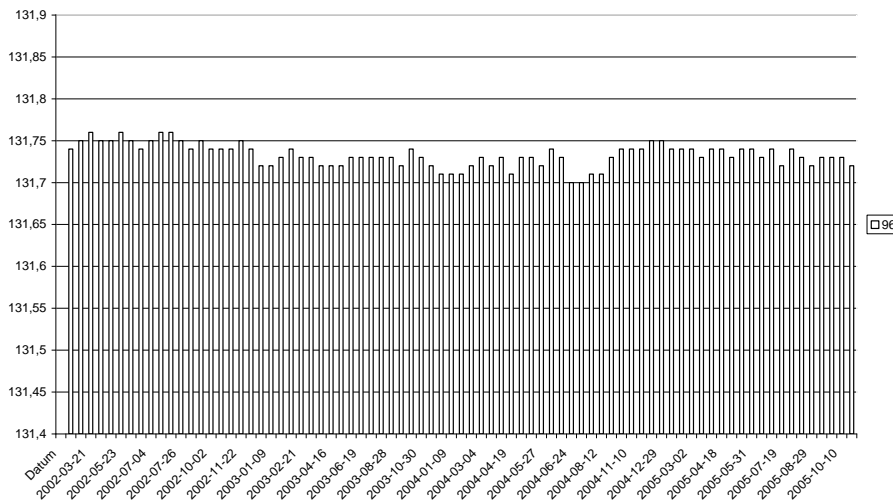
94



Mätpunkt 94

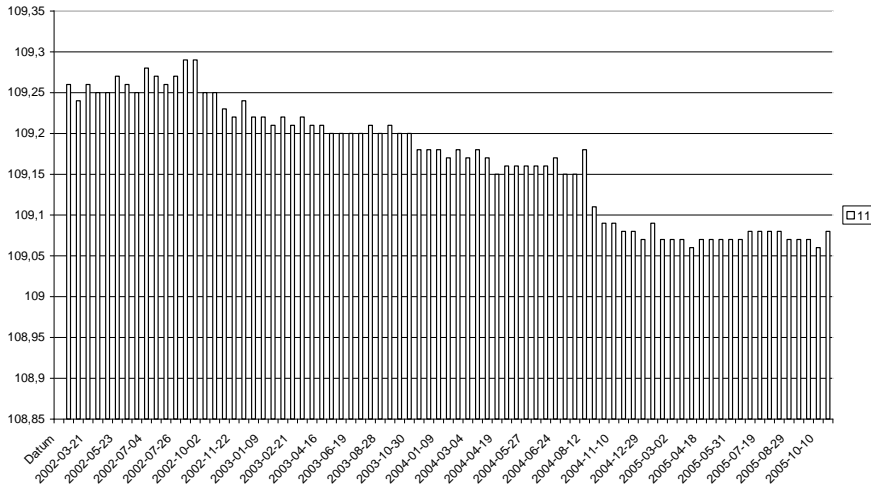
Balk i ek
Trossdäck.
Åt styrbord sida.
Balk 16.

96



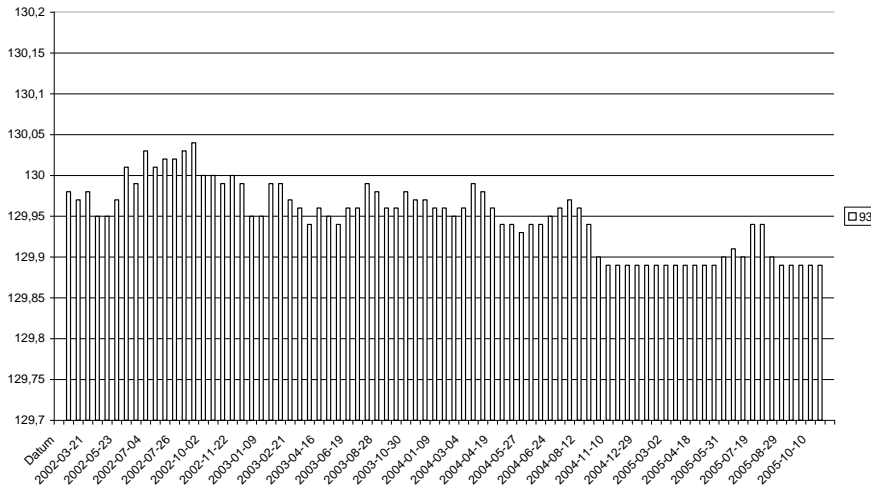
Mätpunkt 96

Balkvägare i ek.
Trossdäck.
Babord sida,
Balksektion 16.



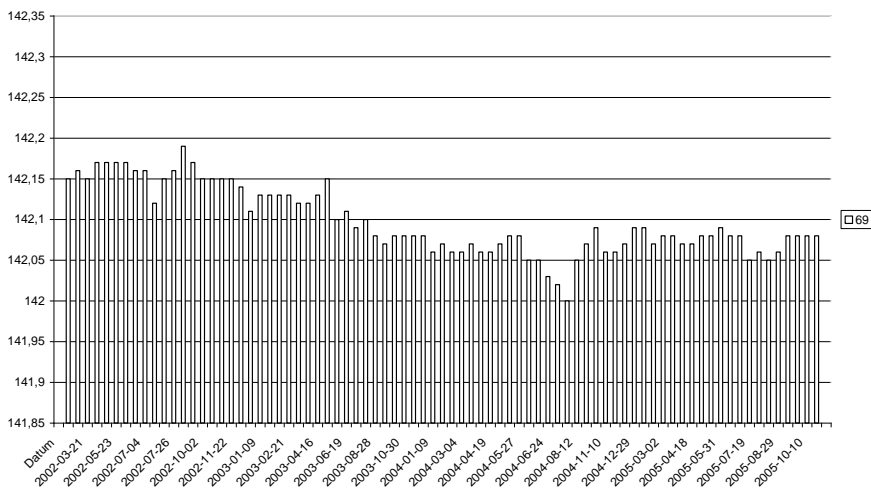
Mätpunkt 11

Balk i ek
Trossdäck.
Babord sida.
Balk 11.



Mätpunkt 93

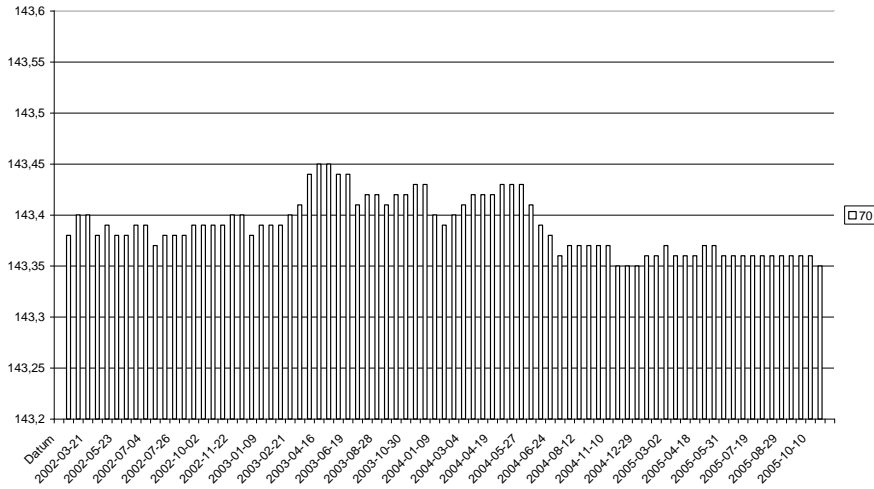
Balk i ek
Trossdäck.
Midskepps.
Balk 9, sidan mot
fören.



Mätpunkt 69

Garneringsplanka i ek
Trossdäck.
Babord sida.
Nedanför balk 7.

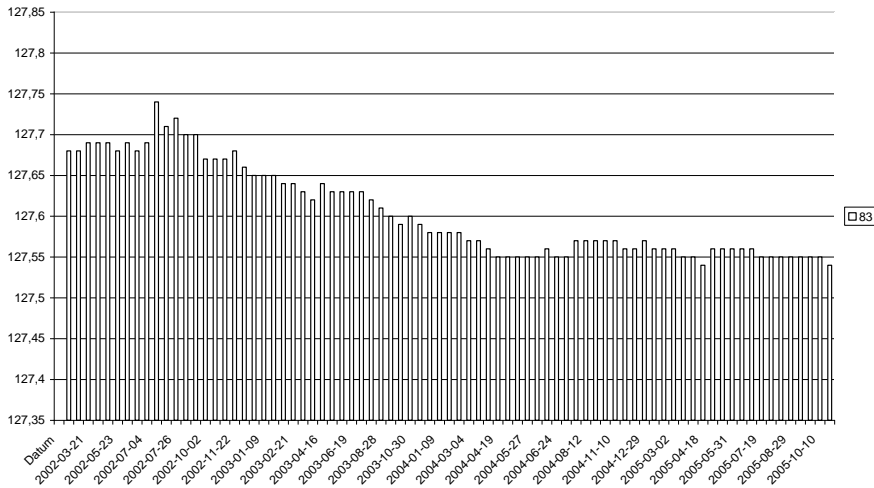
70



Mätpunkt 70

Vaterbord i ek
Trossdäck
Babord sida.
Balksektion 6.

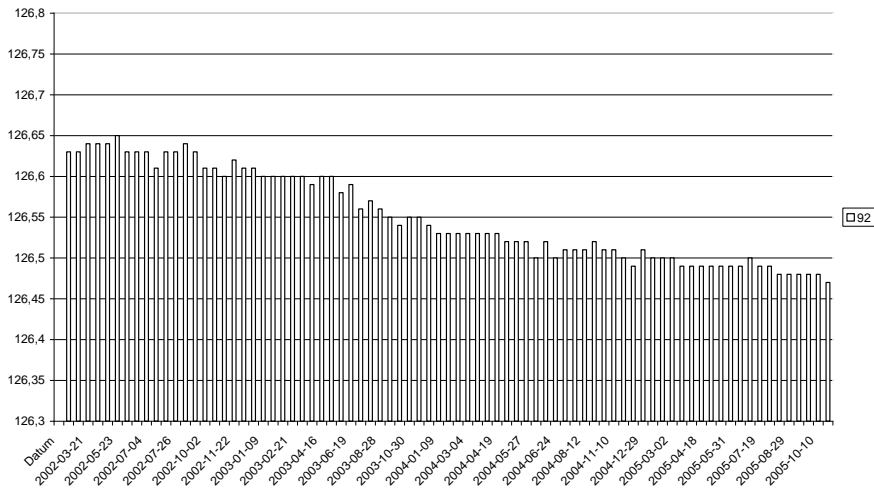
83



Mätpunkt 83

Balkvägare i ek
Trossdäck
Babord sida
Balksektion 5.

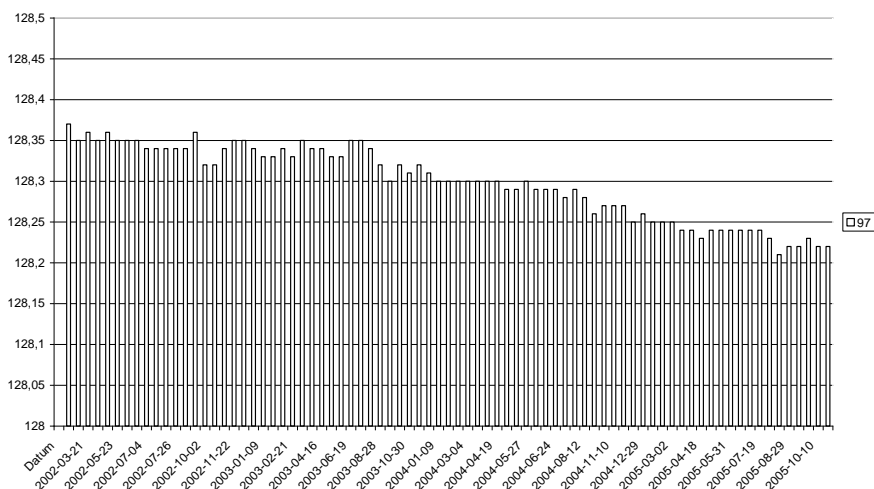
92



Mätpunkt 92

Balk i ek
Trossdäck
Åt babord.
Balk 5.

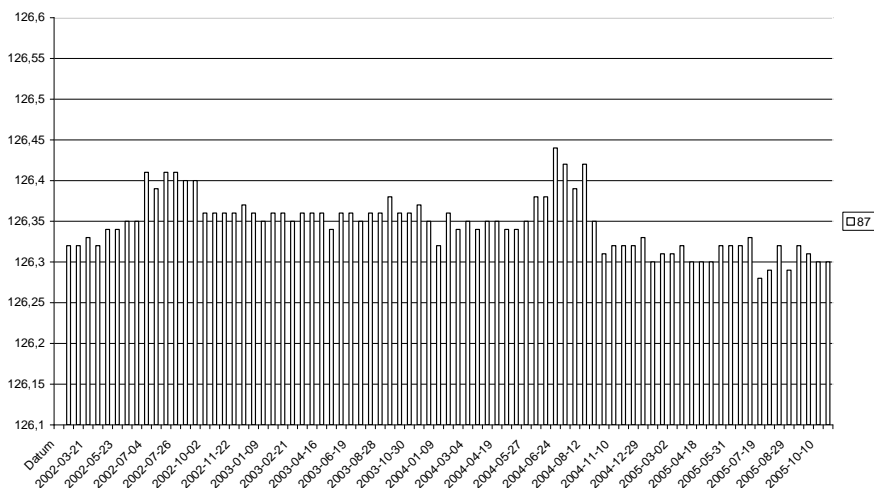
97



Mätpunkt 97

Balkvägare i ek
Trossdäck
Styrbord sida.
Balksektion 5.

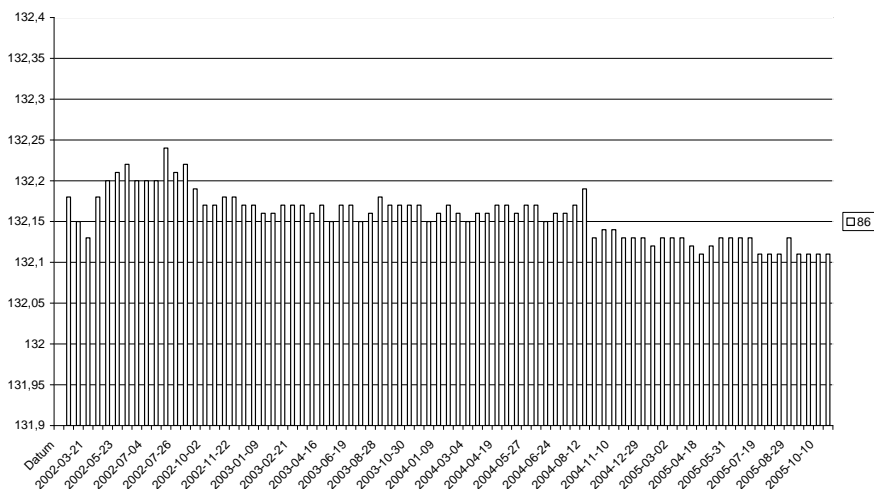
87



Mätpunkt 87

Kattspår i ek
Hålskeppet.
Bakom lejdaren.
Kattspår 7, sidan mot
fören.

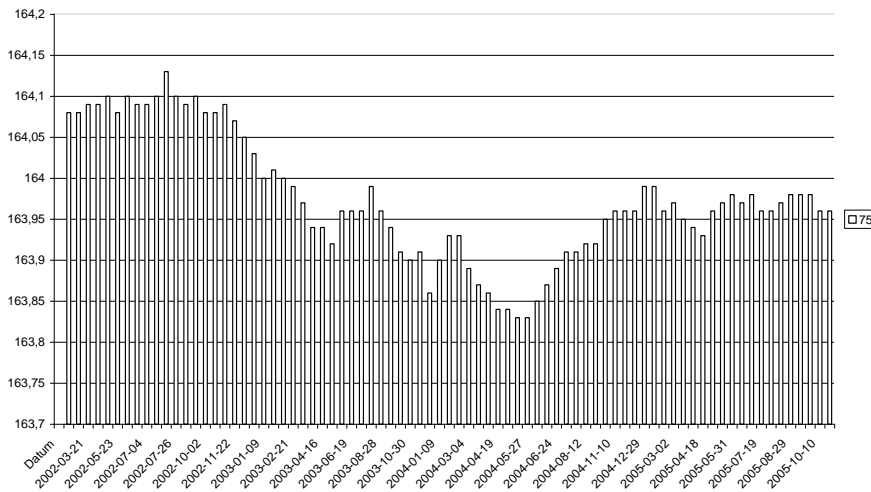
86



Mätpunkt 86

Kattspår i ek
Hålskepp.
Åt babord sida.
Kattspår 5, sidan mot
aktern.

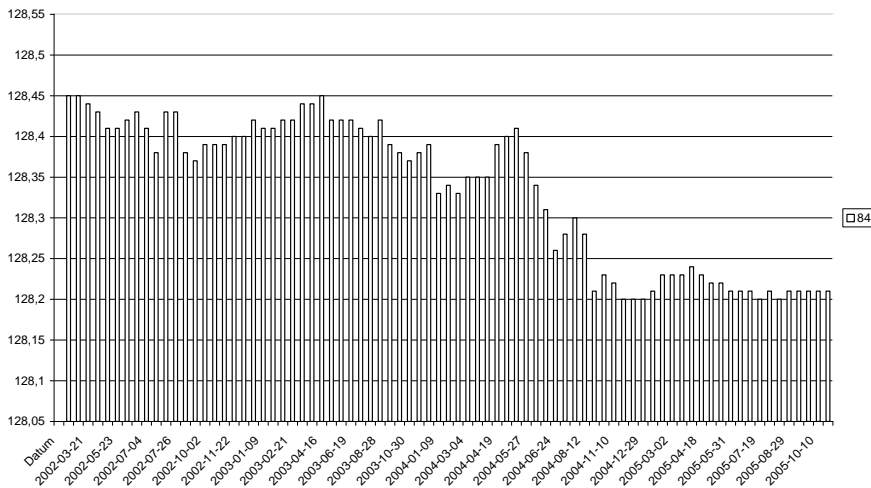
75



Mätpunkt 75

Garneringsplanka i ek
Hålskepp.
Styrbord sida
Balksektion 7.

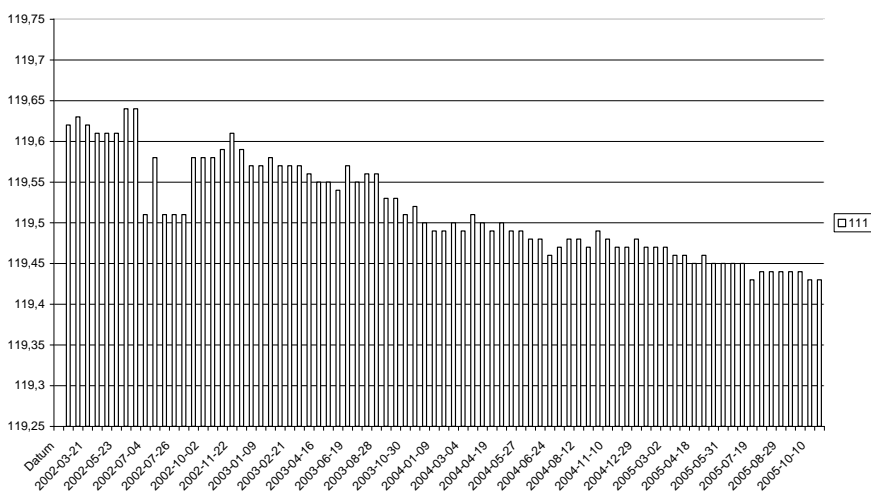
84



Mätpunkt 84

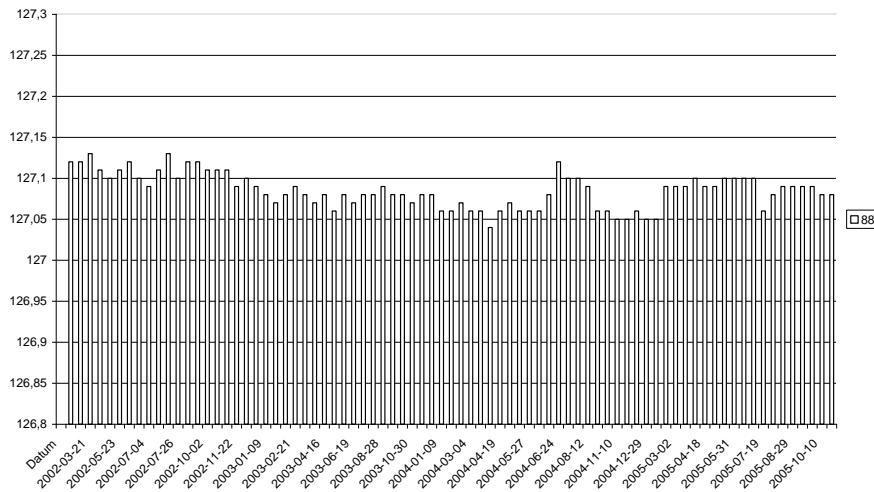
Balkvägare i ek
Hålskepp
Styrbord sida.
Balksektion 7, ovan
mätpunkt 75.

111



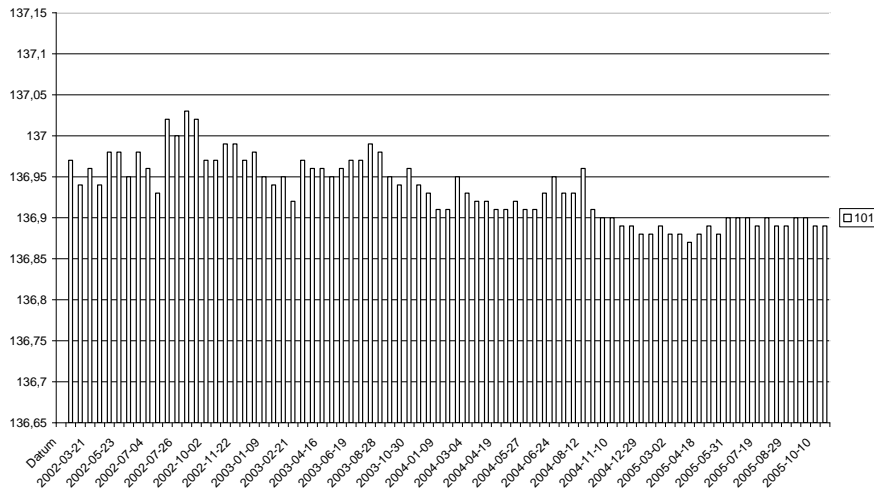
Mätpunkt 111

Balk i ek.
Hålskepp
Åt styrbord.
Balk 9, sidan mot
fören.



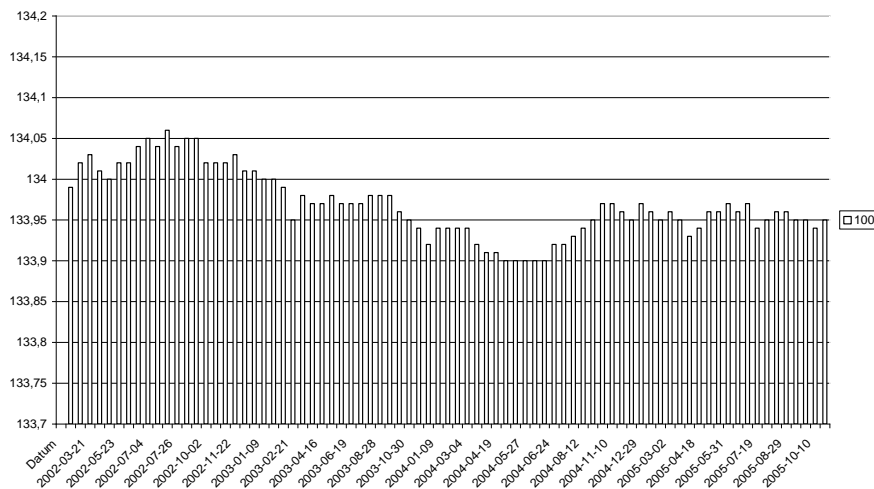
Mätpunkt 88

Kattspår i ek
Hålskepp
Åt styrbord. Nedanför
balk 11, sidan mot
fören.



Mätpunkt 101

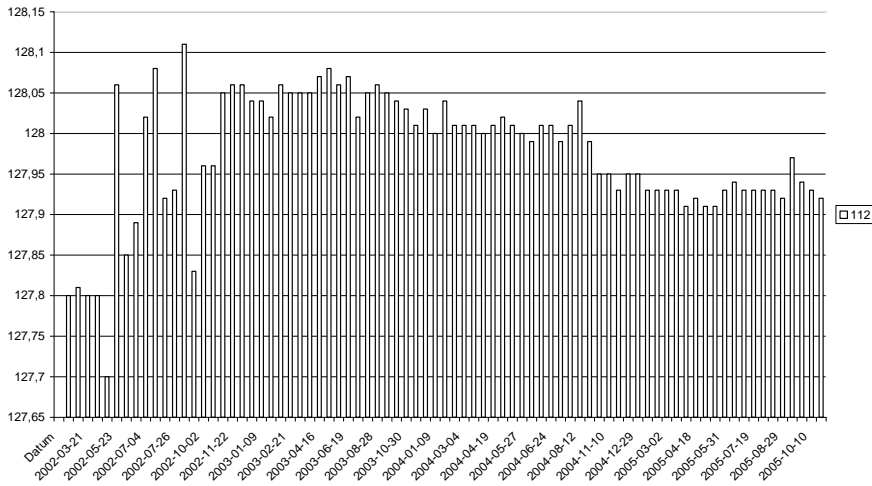
Garneringsplanka i ek
Hålskepp
Babord sida.
Balksektion 13, vid
kabyssen.



Mätpunkt 100

Garneringsplanka i ek
Hålskepp.
Styrbord sida.
Balksektion 16.

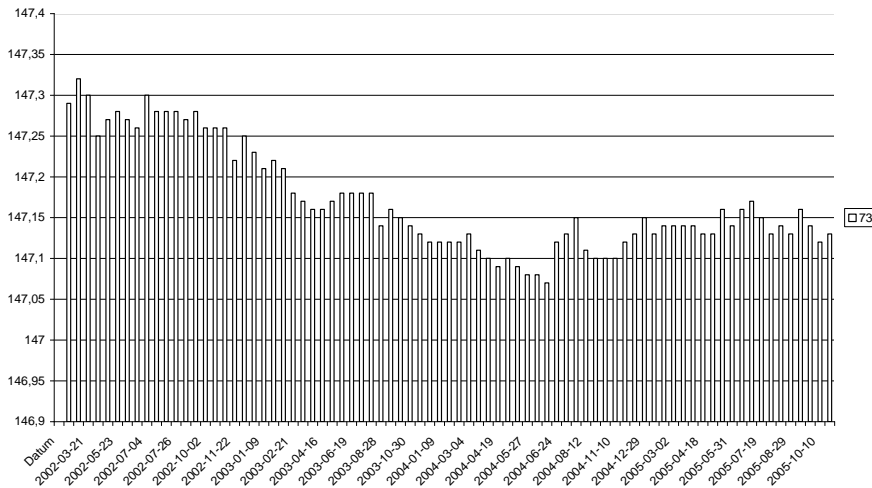
112



Mätpunkt 112

Kattspår i ek.
Hålskepp.
Midskepps
Nedanför balk 20,
sidan mot fören.

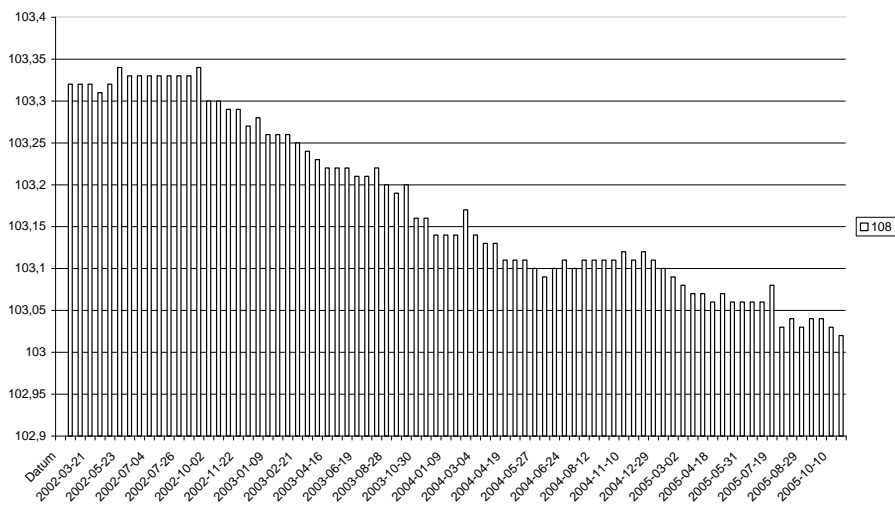
73



Mätpunkt 73

Garneringsplanka i
ek.
Hålskepp.
Babord sida.
Balksektion 21.

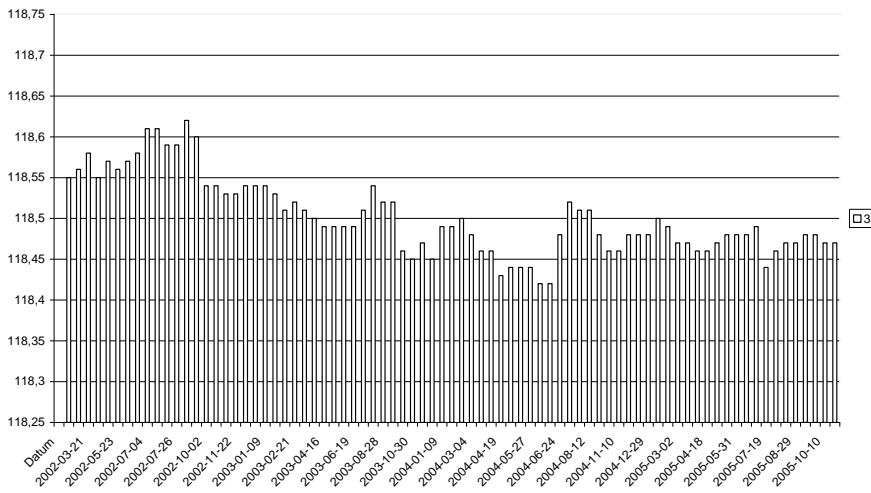
108



Mätpunkt 108

Kölen, ek.
Under skeppet.
Styrbord sida, förut.

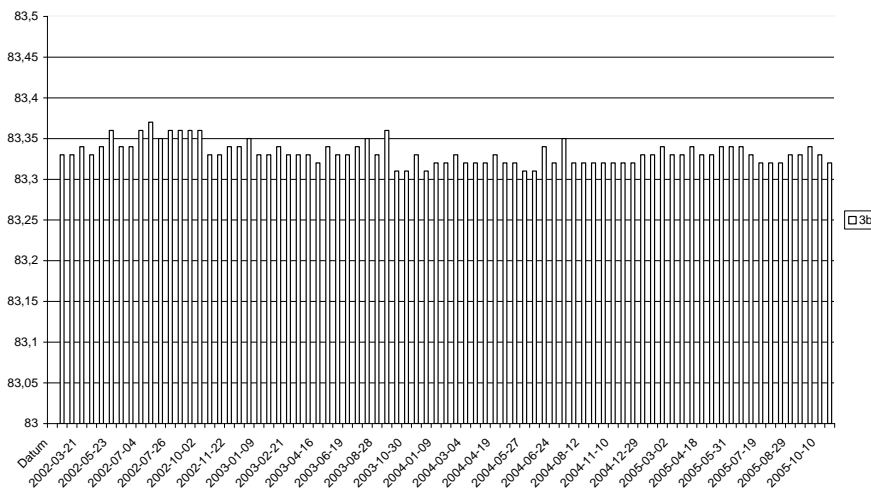
3



Mätpunkt 3

Bordläggnings-
planka i ek
Under skeppet.
Styrbord sida.
Mellan stöttorna 23-
25.
Femte plankan från
kölen.

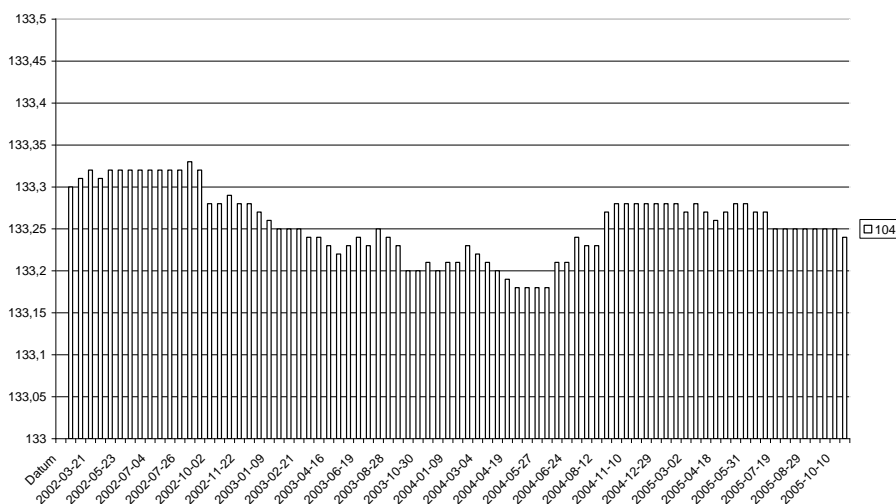
3b



Mätpunkt 3B

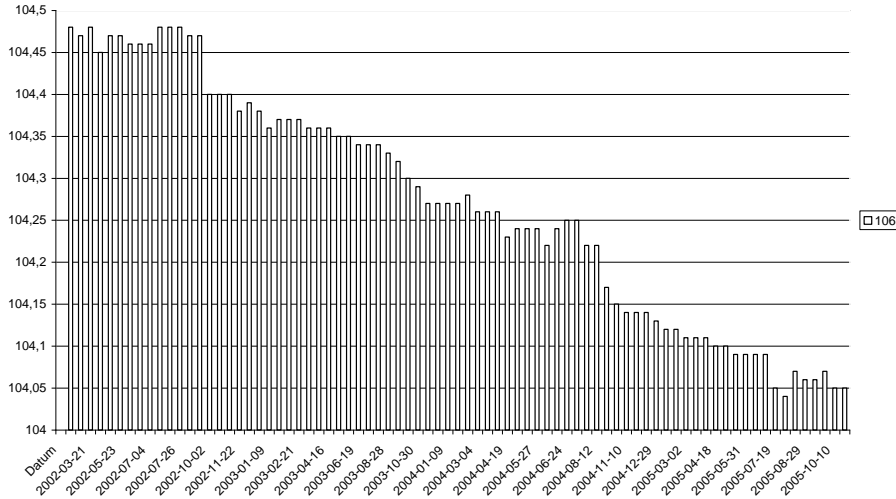
Bordläggnings-
planka i ek
Under skeppet.
Styrbord sida
Mellan stöttorna 23-
25.
Femte plankan från
kölen.

104



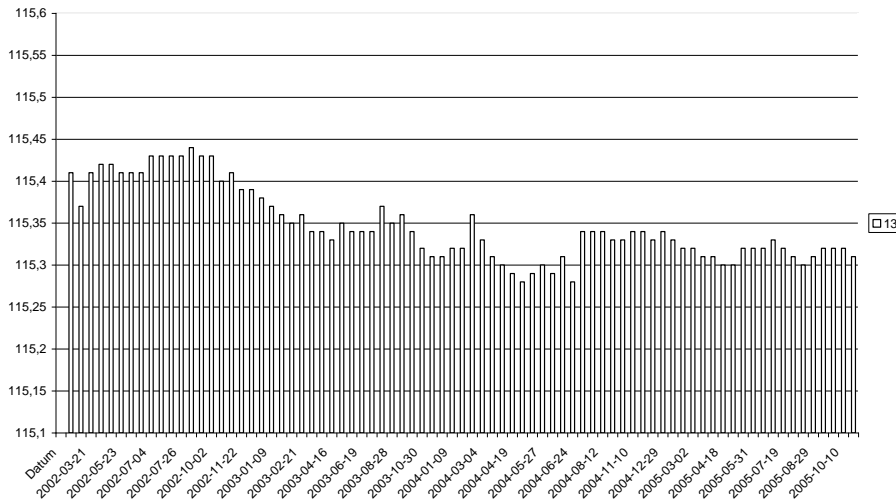
Mätpunkt 104

Bordläggnings-
planka i ek
Under skeppet.
Styrbord sida.
Vid stötta 29.
Andra plankan från
kölen.



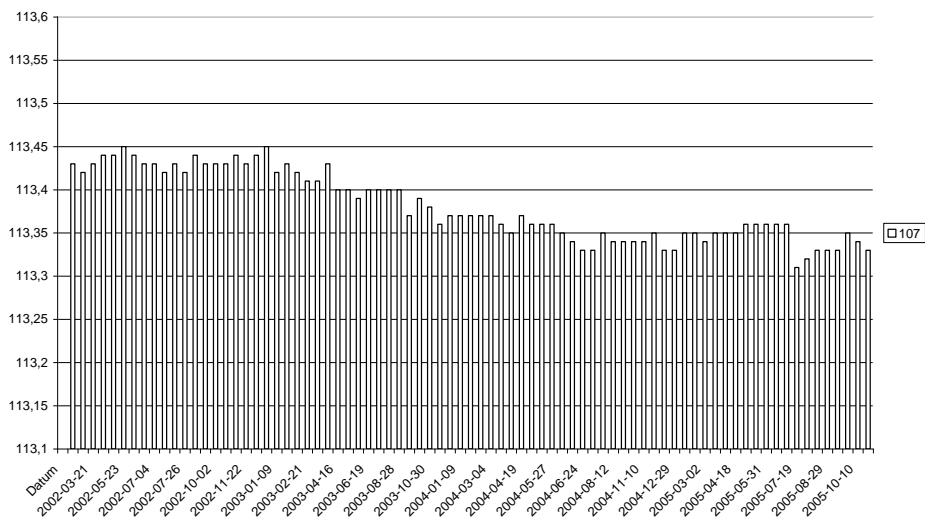
Mätpunkt 106

Kölen, ek
Under skeppet.
Babord sida.
Vid stötta 30.
Mellan kölblock.



Mätpunkt 13

Bordläggnings-
planka i ek
Under skeppet.
Babord sida.
Vid stötta 14.



Mätpunkt 107

Bordläggnings-
planka i ek
Under skeppet.
Babord sida.
Mellan stöttorna
6-8.
Tredje plankan
från kölen.