

Dynamisk provning av ek från Vasaskeppet

Mikael Perstorper

Daniel Sandin

Partille

30 december 2019

Dynalyse AB
Brodalsvägen 7
433 38 Partille
031-448632

Sammanfattning

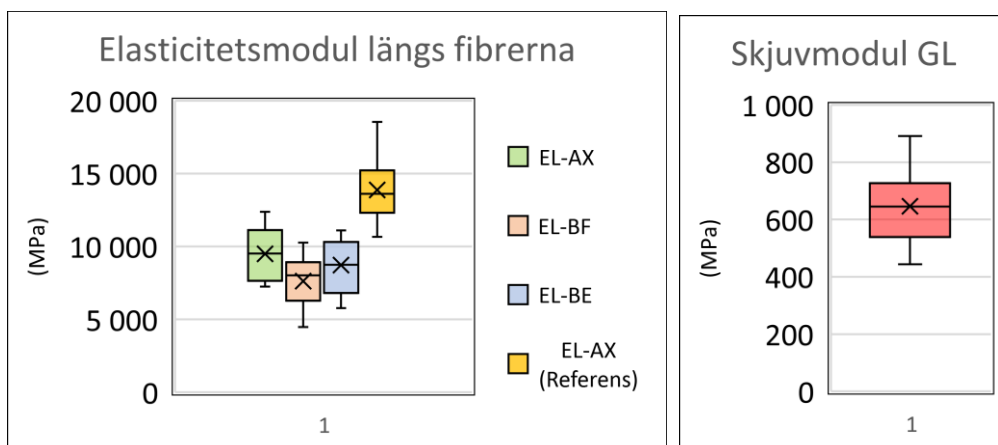
Vasamuseet har via Statens maritima och transporthistoriska museer, SMTM, gett Dynalyse AB i uppdrag att bestämma elastiska egenskaper och densitet hos plank och provkroppar från Vasaskeppet med dynamisk oförstörande mätmedodik.

Egenskaper längs fibrerna

För 16 plank från bordläggning och däck bestämdes elasticitetsmodul och skjuvmodul längs fibrerna. Skjuvmodulen bestämdes vid vridsvängning G_L och var i medeltal 650 MPa. Elasticitetsmodulen bestämdes för tre olika svängningsmoder: axiell svängning i längdled E_{L-AX} , böjsvängning i veka riktningen E_{L-BF} och styva riktningen E_{L-BE} . Dessutom bestämdes axiell elasticitetsmodul för ett referensmaterial av ny ek (17 prov)

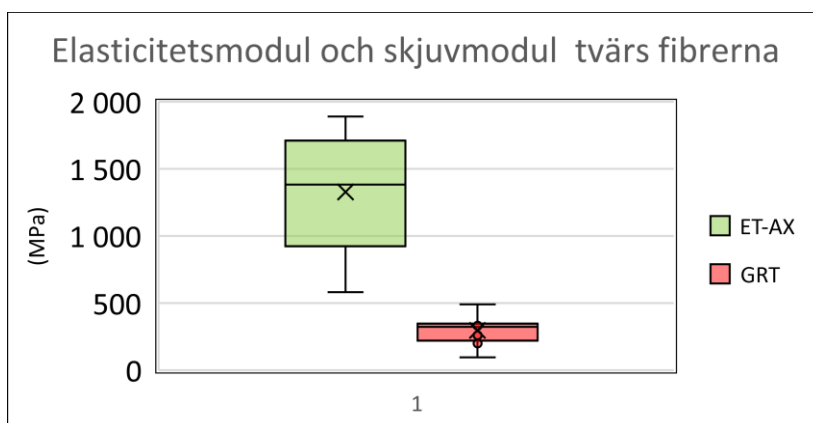
Elasticitetsmodulen längs fibrerna var i medeltal cirka 9 500 MPa för planken (vid axialsvängning) vilket är cirka 30% lägre än för referensmaterialets 13 900 MPa. Densiteten var i medeltal 810 kg/m³.

Elasticitetsmodulen vid böjsvängning var cirka 20% lägre för böjning i veka riktningen (lågkant) och 8% lägre vid böjning i styva riktningen (högkant). Detta bekräftar att ytskikten hos eken är mer nedbrutna, eftersom de ytligare delarna är mer belastade än de inre delarna vid böjsvängning och får mer inverkan på utvärderad elasticitetsmodul.



Egenskaper tvärs fibrerna

Egenskaperna tvärs fibrerna bestämdes på tio små provkroppar (L=120-150 mm) utsågade från avkap från skeppet. E-modulen tvärs fibrerna var cirka 1300 MPa. Skjuvmodulen vid rullskjuvning var cirka 300 MPa. Densiteten var i medeltal 1003 kg/m³.



1. Bakgrund och syfte

Vasamuseet har via Statens maritima och transporthistoriska museer, SMTM, gett Dynalyse AB i uppdrag att bestämma elastiska egenskaper hos plank och provkroppar från Vasaskeppet.

Bakgrunden är projektet "Stötta Vasa" som syftar till att konstruera en ny och utökad stöttning av Vasaskeppet. Den nuvarande stöttningen har visat sig vara otillräcklig och mätningar visar att skeppet deformeras med tiden. Detta är kopplat till att ekveden av olika processer brutits ned varvid de elastiska egenskaperna är sämre än för ny ek. Den betydande belastningen av att bära upp sin egentyngd innebär alltför höga påkänningar i relation till strukturegenskaperna hos planken och förbanden. De försämrade mekaniska egenskaperna har konstaterats i testet på mindre provkroppar, men det har saknats mer omfattande studier av egenskaperna hos hela plank från olika delar av skeppet.

Kunskap om de elastiska egenskaperna hos skeppets ekplank i nuvarande skick är en viktig förutsättning för att kunna konstruera en den nya stöttningen på ett lämpligt sätt.

Syftet med studien har varit att med vibrationsbaserad mätmetodik:

1. bestämma elasticitetsmodul och skjuvmodul längs fibrerna samt densitet hos plank från bordläggning och däck från Vasaskeppet.
2. bestämma elasticitetsmodul och rullskjuvmodul tvärs fibrerna samt densitet hos små provkroppar från redan avkapade delar från Vasaskeppet.
3. bestämma elasticitetsmodul hos ny ek som referens

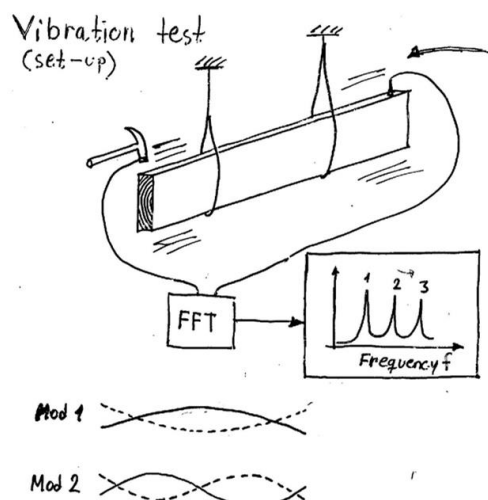
2. Mätmetodik

Med kunskap om geometri och densitet hos ett mätobjekt kan dess elastiska egenskaper bestämmas med hög noggrannhet genom analys av resonanta vibrationer. I denna studie har objekten arrangerats för att simulera frisvävande randvillkor. Med detta menas att objekten hängst upp i fjädrar med avpassade styvhet så att egenfrekvensen vid stelkroppssvängning är klart lägre än de resonansfrekvenser hos objekten som är av intresse. Alla mätningar genomfördes på Vasamuséet. Hänsyn har ej tagits till hål för bultar och skruv. Rapporterade elastiska egenskaper är i den meningen strukturegenskaper och något lägre än om kompensation för håltagning gjorts. Hålen är dokumenterade och en fördjupad analys är därför möjlig.

På grund av trämateriallets viskoelastiska natur är elasticitetsmodulen vid dynamisk provning något högre än vid statisk provning där den relativt långsamma belastningshastigheten spelar in. Skillnaden är cirka 6 %. Rapporterade dynamiska elasticitetsmoduler och skjuvmoduler kan räknas om till statiska värden genom multiplikation med en faktor 0,94.



Figur 1. Bordplanka (PL-1) upphängd i två fjädrar på högkant.



Figur 2. Principiell översikt – exempel för böjsvängning i styva riktningen

2.1 Provning av plank – elastiska egenskaper längs fibrerna

Först vägdes virket och sedan bestämdes längden. Därefter mättes tjocklek och bredd i olika lägen längs plankan (varje meter eller halvmeter). Eventuella avsmalnande ändar dokumenterades. På detta sätt kunde densitet och tvärsnittskonstanter bestämmas. Den rapporterade densiteten är skrymdensiteten baserat aktuell vikt och geometri utan hänsyn till håltagningar, dock med hänsyn till yttre geometri som avsmalnande ändar. Tvärsnittskonstanterna som används vid utvärdering av de elastiska egenskaperna är baserade på måtten i den mittre tredjedelen i längdled, som ju är mest avgörande för den första resonansfrekvensen.

Elasticitetsmodul längs fibrerna vid axialsvängning E_{L-AX}

Planken hängdes upp på högkant i två punkter via fjädrar i tredjedelspunkterna för att simulera fri-fria randvillkor. En accelerometer fästes sedan till änden på plankan med hjälp av bivax. Plankan försattes sedan i vibration genom ett lätt hammarslag mot samma ände med slagriktning längs plankan. Resultande tidssignal och frekvensspektrum registrerades och resonansfrekvenser för svängningsmod 1 och högre noterades. Med hjälp av densitet och längd kunde sedan elasticitetsmodul längs fibrerna vid axialsvängning E_{L-AX} bestämmas.

Elasticitetsmodul längs fibrerna vid böjsvängning i veka riktningen (lågkant) E_{L-BF}

Samma upphängning som ovan användes. En accelerometer fästes sedan till mitten av flatsidan på plankan nära dess ände med hjälp av bivax. Plankan försattes sedan i vibration genom ett lätt hammarslag mot vid samma ände mitt på flatsidan med slagriktning tvärs plankan. Resultande tidssignal och frekvensspektrum registrerades och resonansfrekvenser för svängningsmod 1 och högre noterades. Med hjälp av densitet och längd kunde sedan elasticitetsmodul längs fibrerna vid böjsvängning i veka riktningen (lågkant) E_{L-BF} bestämmas.

Skjuvmodul längs fibrerna vid vridsvängning G_L

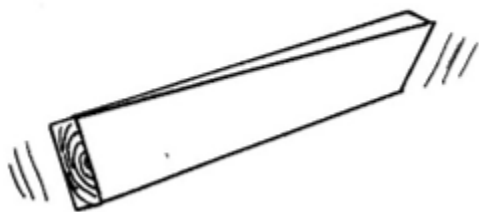
Samma upphängning som ovan användes. En accelerometer fästes sedan till hörnet av flatsidan på plankan nära dess ände med hjälp av bivax. Plankan försattes sedan i vridsvängning genom ett lätt hammarslag mot vid samma ände mot hörnet på flatsidan med slagriktning tvärs plankan. Resultande tidssignal och frekvensspektrum registrerades och resonansfrekvenser för svängningsmod 1 och högre noterades. Med hjälp av densitet och längd kunde sedan skjuvmodul längs fibrerna vid vridsvängning G_L bestämmas.

Elasticitetsmodul längs fibrerna vid böjsvängning i starka riktningen (högkant) E_{L-BE}

Samma upphängning som ovan användes. En accelerometer fästes sedan till kortsidan på plankan nära dess ände med hjälp av bivax. Plankan försattes sedan i vibration genom ett lätt hammarslag mot vid samma ände mitt på kortsidan med slagriktning tvärs plankan i styva riktningen. Resultande tidssignal och frekvensspektrum registrerades och resonansfrekvenser för svängningsmod 1 och högre noterades. Med hjälp av densitet och längd kunde sedan elasticitetsmodul längs fibrerna vid böjsvängning i styva riktningen (högkant) E_{L-BE} bestämmas.

Vid analys av elasticitetsmodul vid böjsvängning måste ofta hänsyn tagas till skjuvdeformationer och rotationströghet, så kallad balkteori enligt Timoshenko. I föreliggande studier är alla rapporterade elasticitetsmoduler vid böjsvängning korrigerade med hänsyn till detta. Därvidlag har skjuvmodulen från vridsvängning G_L använts vis korrigeringen.

Böjsvängning - högkant **E_{L-BE}** **Böjsvängning - lågkant** **E_{L-BF}**

Axialsvängning **E_{L-AX}** **Vridsvängning** **G_L**

2.2 Provning av små provkroppar - elastiska egenskaper tvärs fibrerna

Små provkroppar bereddes för bestämning av egenskaper tvärs fibrerna. Detta var strimlor med måttet längs fibrerna på 15 mm och cirka 35x140 mm tvärs fibrerna. Dessa strimlor lades på skumgummistrimlor för att simulera fri-fria randvillkor. Först bestämdes elasticitetsmodul vid axialsvängning tvärs fibrerna E_{T-AX} genom att fästa en accelerometer i änden på strimlan och excitera med ett hammarslag. Enligt samma princip bestämdes elasticitetsmodulen vid böjsvängning i veka riktningen E_{T-BF} och sedan elasticitetsmodulen vid böjsvängning i styva riktningen E_{T-BE} .

Sedan itererades fram den skjuvmodul (rullskjuvmodul) G_{RT} som gjorde att utvärderad elasticitetsmodul vid böjsvängning i styva riktningen E_{L-BE} stämde med E_{L-AX} . Detta enligt en metodik föreslagen av R. Görlacher och som provats framgångsrikt på gran.

3. Material

De 16 st planken i studien utgjordes av däckplank och bordplank som tillfälligt demonterats från skeppet (PL-1 - PL-16), se nedan. De 10 st små provkropparna bereddes från avkap som uppstått i samband med anordning av ventilation av skrovet (S-1 - S-10), se nedan. Får att få en uppfattning om egenskaperna hos ny ek mättes elasticitetsmodulen längs fibrerna hos en balk av ny ek på muséet (Ref-1) samt hos 16 st mindre ekstavar (massiva parkettstavar) på Dynalyse AB (Ref-2 – Ref-17). Den nya eken har sannolikt en fuktkvot på 7-9 % (lagring inomhus i uppvärmda utrymmen)

Tabell 1. Beskrivning av plankprov

Prov	Typ, kommentar
PL-1	Lång bordplanka med avsmalnande ändar
PL-2	Grov plank med kvadratisk tvärsnitt (penterbalk)
PL-3	Däckplanka
PL-4	Däckplanka
PL-5	Bordplanka mellan kanonportar
PL-6	Bordplanka mellan kanonportar
PL-7	Bordplanka mellan kanonportar
PL-8	Bordplanka mellan kanonportar
PL-9	Däckplanka
PL-10	Däckplanka
PL-11	Däckplanka
PL-12	Däckplanka
PL-13	Däckplanka
PL-14	Däckplanka
PL-15	Däckplanka
PL-16	Bordplanka mellan kanonportar

Tabell 2. Beskrivning av små provkroppar för egenskaper tvärs fibrerna

Prov	Vasamuséets märkning
S-1	65952, 23810
S-2	65959, 23823
S-3	
S-4	65957, 23820
S-5	65958, 23821
S-6	65954, 23811
S-7	65950, 23814
S-8	65955, 23813
S-9	65956, 23818
S-10	65953, 23808

4. Resultat

Elasticitetsmodulen längs fibrerna var i medeltal cirka 9 500 MPa för planken (vid axialsvängning) vilket är cirka 30% lägre än för referensmaterialets 13 900 MPa, vilket bekräftar tidigare studiers indikationer att de mekaniska egenskaperna hos Vasaeken är påtagligt sämre än ny ek. I litteraturen anges E-modulen längs fibrerna för ny ek till i medeltal mellan 11.000 till 15.000 MPa.

Ovanstående avser elasticitetsmodul vid axialsvängning där alla delar av tvärsnittet får samma belastning och inverkan vid utvärderingen – ett oviktat medelvärde. Det är dock värt att notera att elasticitetsmodulen vid böjsvängning i denna studie är klart lägre, cirka 20% lägre för böjning i veka riktningen (lågkant) och 8% lägre vid böjning i styva riktningen (högkant). Detta bekräftar att ytskikten hos eken är mer nedbrutna, eftersom de ytligare delarna är mer belastade än de inre delarna vid böjsvängning och får mer inverkan på utvärderad elasticitetsmodul. Om man antar att det mest försvagade skiktet är exempelvis 15 mm runt om är det dessutom att förvänta att böjning i veka riktningen är mer påverkad än den styva riktningen. Ytterligare fördjupad analys kan kvantifiera gradienten, dvs indikera hur mycket sämre ytskikten är jämfört med de centrala delarna.

Tabell 3. Resultat från provning av plank (egenskaper längs fibrerna)

					Elasticitetsmodul längs fibrerna			
Prov	Längd	Bredd	Tjocklek	Densitet	Axiellt	Böjning i veka riktn.	Böjning i styva riktn.	Skjuvmodul längs fibrerna
	L _{tot}	W _{avg}	T _{avg}	D _{gross}	E _{L-AX}	E _{L-BF}	E _{L-BE}	G _L
	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
PL-1	8 815	308,1	95,3	736	7 329	6 256	6 311	711
PL-2	5 870	256,0	258,8	676	9 537	8 252	8 746	444
PL-3	4 330	291,4	50,4	763	7 416	5 363	6 605	583
PL-4	7 860	274,0	49,9	775	7 713	4 481	6 605	583
PL-5	2 425	251,5	73,7	898	11 130	10 266	10 740	892
PL-6	2 275	217,9	78,7	878	9 523	8 817	10 388	639
PL-7	2 720	222,9	75,1	892	7 246	6 312	5 770	482
PL-8	2 195	239,5	82,1	956	12 387	10 264	10 793	761
PL-9	7 935	188,3	64,6	756	8 557	6 487	8 041	458
PL-10	7 350	230,0	59,3	909	11 122	8 930	10 240	724
PL-11	6 165	294,7	59,3	715	7 574	5 900	7 012	524
PL-12	4 585	212,3	59,7	756	11 104	8 274	10 016	613
PL-13	7 670	220,3	60,8	865	10 486	8 971	10 251	849
PL-14	7 155	220,5	51,7	774	8 164	6 499	7 117	703
PL-15	7 000	243,1	61,6	773	11 381	8 933	9 827	727
PL-16	2 235	300,0	57,1	846	11 141	8 017	11 098	651
Medel				810	9 488	7 626	8 723	646
Std-avv.				81	1 772	1 745	1 893	132

Egenskaperna tvärs fibrerna är sammanställda i tabell 4. I medeltal var E-modulen tvärs fibrerna cirka 1300 MPa: Det finns inte lika många litteraturuppgifter för egenskaper tvärs fibrerna, men flera indikerar en E-modul på 1000-1500 MPa. Att E-modulen vid axialsvängning och böjsvängning i veka riktningen är liknande styrker att mätmetoden är pålitlig, se tabell 4 nedan.

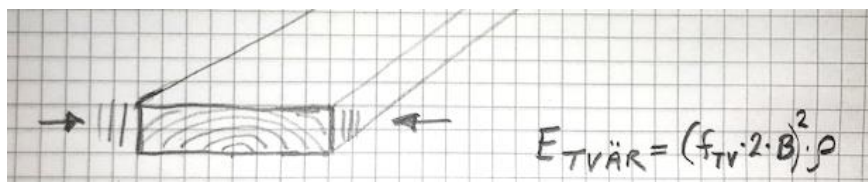
Skjuvmodulen vid rullskjuvning var i medeltal cirka 300 MPa. I litteraturen finns få källor att jämföra med, men en nyligen gjord studie angav ett värde på cirka 3-400 MPa för lövträ med högre densitet (7-800 kg/m³) som ek.

Det skall noteras att dessa små provkroppar är utsågade från avkap från skeppet. I samband med beredningen har ytskikten sågats bort i varierande omfattning. Detta innebär att den mest nedbrutna delen av tvärsnittet inte är kvar i sin helhet och kan påverka utvärderad E-modul på samma sätt som för planken. Det är därför sannolikt att elasticitetsmodul och skjuvmodul tvärs fibrerna för ett komplett tvärsnitt som en bord- eller däcksplanka med intakta ytskikt, är något lägre än i tabell 4.

Vidare bör man kalkylera med en lägre elasticitetsmodul om man vill beräkna lokala deformationer, exempelvis vid lokalt tryck mot en bordplanka, då det mjukare ytskiktet får en större betydelse.

Resultaten bör tolkas med viss försiktighet med hänsyn till att det rör sig om få prov och att vissa prov enligt uppgift kommer från samma avkap. Detta tillsammans med det färre antalet litteraturuppgifter gör det svårt att dra långtgående slutsatser om graden av nedbrytning för egenskaperna tvärs fibrerna visavi ny ek.

Försök gjordes att bestämma elasticitetsmodulen tvärs fibrerna på plank genom att mäta tvärs plankornas bredd enligt nedan. Detta misslyckades dock på grund av att ytskiktet var så mjukt att det var omöjligt att åstadkomma en stötvåg med tillräcklig energi i det aktuella frekvensområdet (3000+ Hz). Sannolikt krävs någon typ av åverkan för att kunna mäta på detta sätt. Alternativt kan en borrhärna på 15-20 mm diameter tas ut genom plankans bredd för analys och ev lokal vidare bearbetning.



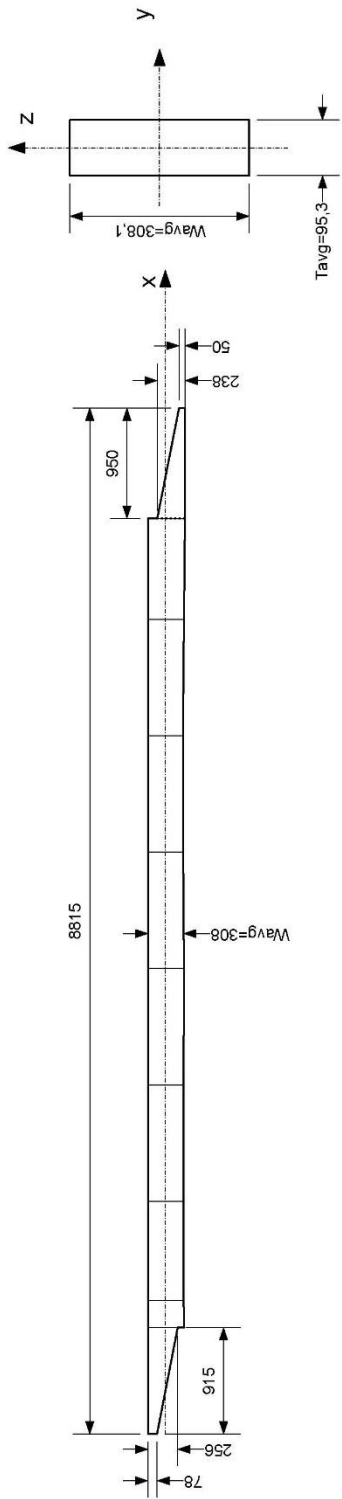
Tabell 4. Resultat från provning av små provkroppar (egenskaper tvärs fibrerna)

Prov					Elasticitetsmodul tvärs fibrerna			Skjuvmodul tvärs fibrerna
	Längd	Bredd	Tjocklek	Densitet	Axiellt	Böjning i veka riktn.	Böjning i styva riktn.	
	L _{tot}	W _{avg}	T _{avg}	D _{gross}	E _{T-AX}	E _{T-BF}	E _{T-BE}	
	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m ³)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
S-1	146,7	36,8	14,7	1 022	1 334	1 251	1 334	261
S-2	120,4	31,8	15,2	1 030	1 889	1 858	1 889	359
S-3	160,4	40,5	14,9	954	582	583	582	97
S-4	140,2	34,4	15,1	1 041	1 461	1 372	1 461	317
S-5	120,7	31,4	14,8	1 124	1 679	1 681	1 679	338
S-6	128,5	31,6	14,7	1 104	1 806	1 787	1 806	331
S-7	140,1	40,7	14,9	1 023	834	827	834	200
S-8	150,1	37,8	15,1	835	953	880	953	227
S-9	143,3	35,3	15,2	998	1 431	1 388	1 431	345
S-10	144,9	36,6	14,8	899	1 301	1 290	1 301	492
Medel				1 003	1 327	1 292	1 327	297
Std-avv.				88	426	425	426	107

Tabell 5. Resultat från provning av referensprovkroppar (egenskaper längs fibrerna)

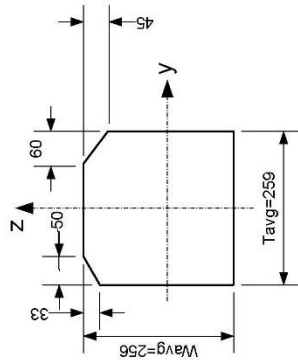
Prov	Längd	Bredd	Tjocklek	Densitet	E-modul längs fibrerna - axiellt
	L _{tot}	W _{avg}	T _{avg}	D _{gross}	E _{L-AX}
	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/m ³)	(MPa)
Ref-1	1 430	165,0	118,0	713	11 693
Ref-2	339	67,8	16,5	679	13 035
Ref-3	339	67,8	16,5	666	10 656
Ref-4	339	67,8	16,5	742	13 691
Ref-5	339	67,8	16,5	744	15 243
Ref-6	339	67,8	16,5	750	12 848
Ref-7	339	67,8	16,5	671	13 280
Ref-8	339	67,8	16,5	744	14 713
Ref-9	339	67,8	16,5	696	13 117
Ref-10	339	67,8	16,5	782	18 549
Ref-11	339	67,8	16,5	758	11 804
Ref-12	339	67,8	16,5	763	15 221
Ref-13	339	67,8	16,5	733	15 581
Ref-14	339	67,8	16,5	704	14 821
Ref-15	339	67,8	16,5	728	16 512
Ref-16	339	67,8	16,5	685	13 620
Ref-17	339	67,8	16,5	712	11 470
Medel				722	13 874
Std-avv.				35	2 015

5. Bilaga - detaljerade data och bilder på provkroppar

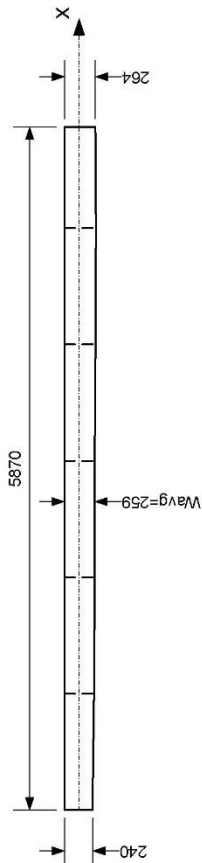


Total length	L_{tot} (mm)	8 815	L (mm)	0	T (mm)	95.8
Average width	W_{avg} (mm)	308.1	915	78.2	90.6	
Average thickness	T_{avg} (mm)	95.3	915	255.7	90.6	
Gross volume	V_{gross} (m ³)	0.2313	1150	312.5	90.6	
Weight	M (kg)	170.2	2000	307.5	95.4	
Gross density	D_{gross} (kg/m ³)	736	3000	305.0	92.7	
Equivalent length	W_{eq} (mm)	7 698	4000	307.5	95.4	
Midspan width	L_{mid} (mm)	305.0	5000	310.0	96.9	
Midspan thickness	T_{mid} (mm)	95.3	6000	302.5	101.2	
Area moment of inertia y-axis	I_y (m ⁴)	2,252E-04	7000	300.0	92.2	
Area moment of inertia z-axis	I_z (m ⁴)	2,196E-05	7865	310.0	95.7	
Polar moment of inertia	I_p (m ⁴)	2,472E-04	7865	317.5	97.8	
Torsional constant	K_t (m ⁴)	7,058E-05	7865	237.5	97.8	
			8815	50.4	84.8	

Vibrational test of Oak from the Vasa ship
Plank PL-1 – overview of geometry etc
Dynalyse AB 2019

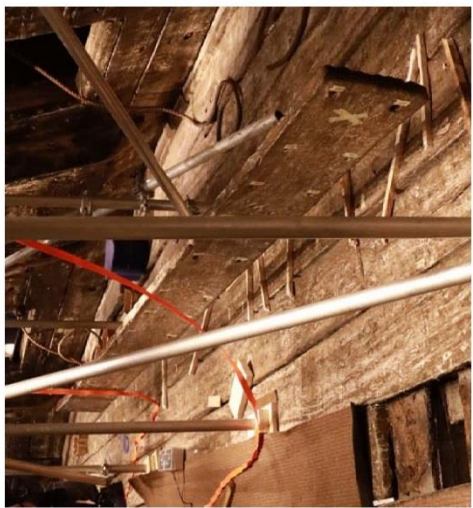
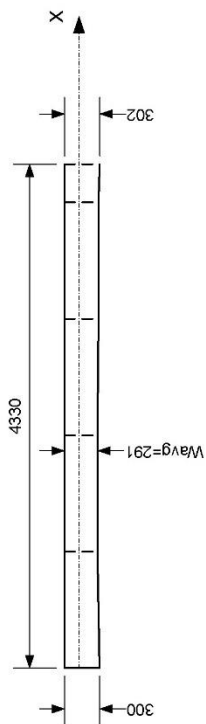
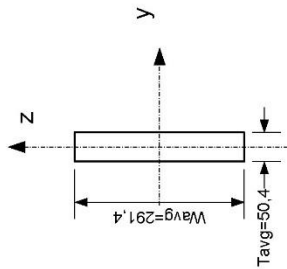


Vibrational test of Oak from the Vasa ship
Plank PL#2 – overview of geometry etc
Dynalyse AB 2019



L (mm)	W (mm)	T (mm)
0	240.2	238.7
1000	253.5	249.9
2000	259.2	251.9
3000	259.5	259.5
4000	265.2	263.4
5000	269.8	265.8
5870	264.1	263.3

Total length	L_{avg} (mm)	5870
Average width	W_{avg} (mm)	256.0
Average thickness	T_{avg} (mm)	258.8
Gross volume	V_{gross} (m ³)	0.3799
Weight	M (kg)	256.7
Gross density	D_{gross} (kg/m ³)	676
Equivalent length	L_{equiv} (mm)	5870
Midspar width	W_{mid} (mm)	258.2
Midspar thickness	T_{mid} (mm)	261.3
Area moment of inertia y-axis	I_y (m ⁴)	3.442E-04
Area moment of inertia z-axis	I_z (m ⁴)	3.633E-04
Polar moment of inertia	I_p (m ⁴)	7.075E-04
Torsional constant	K_t (m ⁴)	6.422E-04



L (mm)	W(mm)	T(mm)
0	300,0	54,3
1000	282,0	52,3
2000	282,1	48,8
3000	291,9	48,5
4000	290,8	50,2
4330	301,8	48,6

Total length	L_{tot} (mm)	4 330
Average width	W_{avg} (mm)	291,4
Average thickness	T_{avg} (mm)	50,4
Gross volume	V_{gross} (mm ³)	0,0629
Weight	M (kg)	48,0
Gross density	D_{gross} (kg/m ³)	763
Equivalent length	L_{eqv} (mm)	4 330
Midspan width	W_{mid} (mm)	284,8
Midspan thickness	T_{mid} (mm)	49,1
Area moment of inertia y-axis	I_y (m ⁴)	9,443E-05
Area moment of inertia z-axis	I_z (m ⁴)	2,805E-06
Polar moment of inertia	I_p (m ⁴)	9,723E-05
Torsional constant	K_t (m ⁴)	1,000E-05

Vibrational test of Oak from the Vasa ship
Plank PL-3 – overview of geometry etc
Dynalyse AB 2019