

Rekonstruktion af Hjortspringbåden - teoretiske beregninger og indledende forsøgsresultater

Niels Peter Fenger, Hans Lumbye-Hansen.

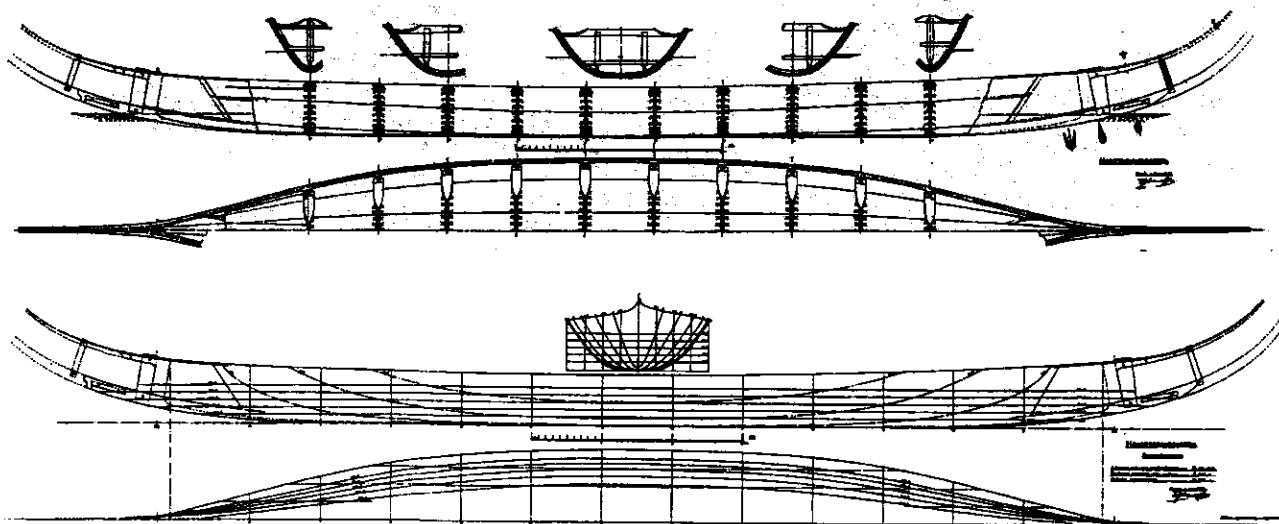
Indledning

Hjortspringbåden blev fundet i en mose på Als og blev udgravet i 1921/1922. I 1991 besluttede en gruppe mennesker på øen sig for at bygge en kopi af båden. Det kunne forudses, at denne opgave ville blive særdeles omfattende, og det var derfor nødvendigt at danne en organisation, som fik navnet Hjortspringbådens Laug. Formålet med laugene er først og fremmest at koordinere arbejdet med bygningen af båden. Desuden skal det søges om midler fra forskellige fonde til bygning af båden. Endelig skal laugene opbygge og vedligeholde et videnskabeligt netværk til museer og universiteter. I løbet af to år nåede medlemstallet op på 100, og dette har siden hen holdt sig konstant. Der er ingen historikere, arkæologer eller skibsbyggere blandt medlemmerne. Men laugene kan drage nytte af en lang række færdigheder og viden, som medlemmerne møder med. Dette kan være som følge af den enkeltes profession, men ofte er der tale om en fritidsmæssig interesse. Som eksempler kan nævnes, at der blandt medlemmerne er en billedskærer, ingeniører med specialerne fluidmekanik, styrkelære, metallurgi og computergeometri. Flere medlemmer er aktive sejlere. Et fælles træk er, at alle er indstillet på at yde kvalitetsarbejde.

Formålet med arbejdet er at bygge en rekonstruktion af båden i fuld størrelse. Derpå skal den afprøves og senere udstilles. Desuden er det vores opgave at fremskaffe så megen viden om Hjortspringbåden som mulig og synliggøre denne viden ved at dokumentere alle iagttagelser. Den indledende analyse overbeviste os om, at vore forfædre har været professionelle skibsbyggere. Gennem en lang udviklingsfase er de nået frem til det høje tekniske niveau, som kendes fra fundet. Vi har ikke vore forfædres erfaring og må derfor støtte os til moderne, teoretiske værktøjer for at nå vores mål. Resultatet af denne teoretiske analyse viser den høje udvikling, som skibsbygningskunsten havde i den keltiske jernalder. Desuden giver analysen en række ideer til de forsøg, som skal foretages med båden, når den er bygget færdig.

Grundlaget for beregningerne.

Størstedelen af det talmateriale, som danner grundlaget for beregningerne, er opmålt fra Johannesens linietegninger af Hjortspringbåden, som er gengivet i Rosenberg (1937, planche II). Desuden er en del data fremkommet gennem forsøg med forskellige forsøgsemner, som byggegruppen har fremstillet som øvelsesopgaver. (Valbjørn 1997).



Figur 1. Johannesens tegning (Rosenberg 1937, planche II).

Hydrostatisk Analyse.

Displacement.

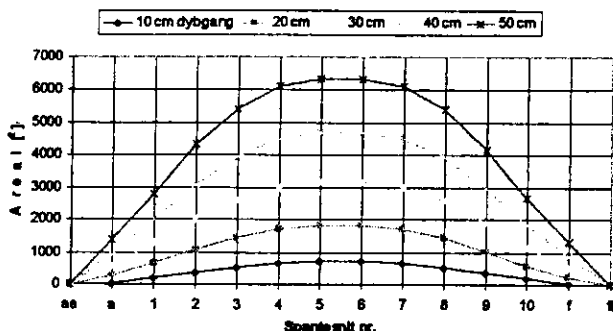
Hjortspringbådens linietegning i figur 1 (Rosenberg 1937, planche II) indeholder 12 spantesnit beliggende med 1 meters afstand. Det første ligger en meter foran tofte nr. 10 og det sidste en meter efter tofte nr. 1. Der er tegnet fem vand-

liniesnit med dybgang 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,4 og 0,5 m. For alle de nævnte værdier af dybgangen udregner man det areal af hvert spantesnit, som ligger under den pågældende vandlinie.

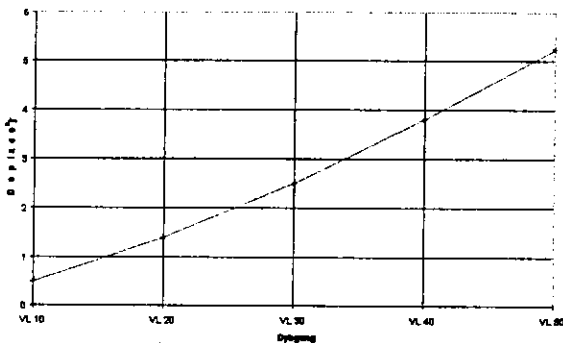
Figur 2 viser disse arealer på grafisk form, hvor abscissen er en længdekoordinat, som forløber vandret i bådens længderetning. Arealet under hver kurve er det volumetriske displacement for den pågældende dybgang. Idet der er

et lige antal spantesnit, kan man ikke benytte Simpsons metode til numerisk integration. I stedet for benyttes trapezregelen (Rawson og Tupper, Vol I, 23).

Under beregningerne er det forudsat, at de fem vandlinier har samme længde. Dette er ikke helt korrekt, men den her ved begåede fejl er uden betydning.



Figur 2. Spantesnittenes fortrængningsarealer for dybgang fra 10 til 50 cm.



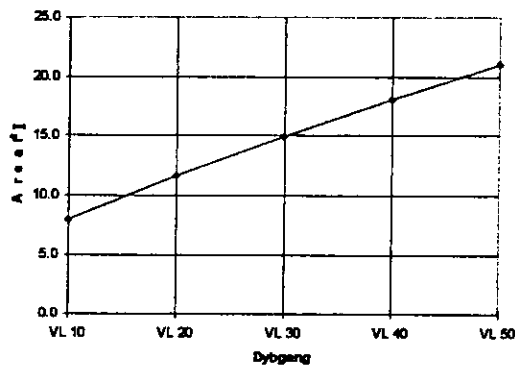
Figur 3. Deplacement som funktion af dybgangen.

Johannesen angiver (Rosenberg 1937, 94), at bådens masse er ca. 550 kg i tom tilstand. Det svarer til en dybgang på 0,1 m. Med en nominal last på 2000 kg vil dybgangen øges til 0,3 m.

Våd overflade.

Bådens våde overflade bestemmes i princippet på samme måde som omtalt ovenfor. I stedet for fortrængningsarealerne beregner man buelængden af den neddyppede del af hvert spantesnit. De fremkomne buelængder integreres med hensyn til den længdekoordinat, som forløber i bådens længde

retning. Resultatet er vist i figur 4.



Figur 4. Våd overflade som funktion af dybgang.

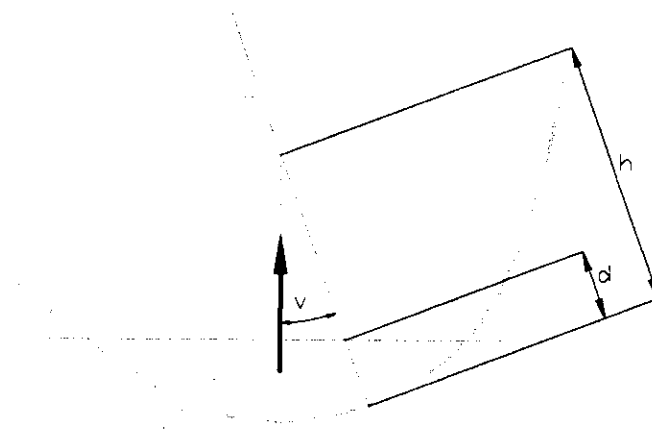
Metacentrets beliggenhed i den retliggende båd.

Metacentrets beliggenhed afhænger af såvel af deplacementet som af krævningsvinklen. I første omgang beregnes beliggenheden af dette punkt, når båden ikke krænger. Dette benyttes til bestemmelse af begyndelsesstabiliteten. Beregningerne er gennemført for hvert af de fem vandlinesnit på følgende måde: Først bestemmes tyngdepunktet af det fortrængte vand. Derpå beregnes inertimomentet af det pågældende vandlinesnit. Dette divideres med deplacementet, og man får den afstand, som metacentret ligger over det nævnte tyngdepunkt, se Rawson and Tupper (Vol I, 20). Detaljerne i beregningerne er beskrevet i Medlemsmappen, sektion 2.5.1, p. 5

I figur 6 i næste afsnit er metacentrets beliggenhed vist for den retliggende båd, når deplacementet er 2,5 m³. Til sammenligning vises metacentrets beliggenhed, når fartøjet er krænet.

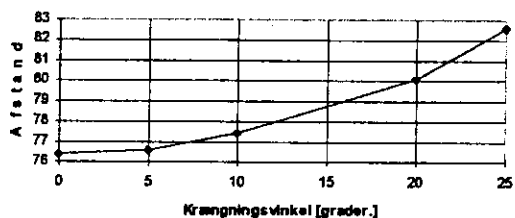
Metacentrets beliggenhed i den krævede båd.

Når båden er krænet en vis vinkel, skal beregningerne gennemføres på en anden måde, som er vist i figur 5.



Figur 5 Metacentret for den krævede båd.

For nogle valgte krængningsvinkler beregnes tyngdepunktet for det fortrængte vand i hvert spantesnit. Metacenteret bestemmes som skæringspunktet af den lodrette linie gennem tyngdepunktet og bådens centerlinie. Detaljerne i disse beregninger er beskrevet i medlemsmappen, sektion 2.5.1, p.5. Figur 6 viser metacenterets beliggenhed som funktion af krængningsvinklen for den nominelle last på 2000 kg/ 0,3 m dybgang/ 2,5 m³.

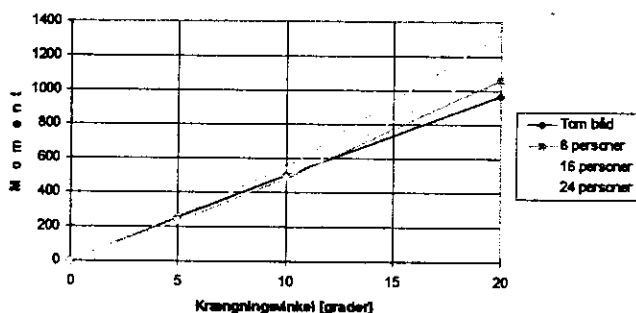


Figur 6. Metacenterets højde over bunden ved displacement 2,5 m³

Man bemærker, at metacenterets beliggenhed næsten ikke ændrer sig med krængningsvinklen. Det betyder, at båden kun har ringe formstabilitet. Årsagen hertil er, at bunden har et næsten cirkulært tværsnitsprofil.

Bådens tyngdepunkt i lastet tilstand.

Det er vanskeligt at beregne det resulterende tyngdepunkt af båden med besætning. For at finde en omtrentlig beliggenhed af dette punkt er udført nogle forsøg med den midtersektion, som er fremstillet af byggegruppen i træningsøjemed (Valbjørn 1997). Ved at sammenholde dette med de beregnede beliggenheder af metacenteret kan man beregne det oprettende moment som funktion af krængningsvinklen. Resultatet er vist i figur 7.



Figur 7. Oprettende moment.

Beregningerne kan anskueliggøres på følgende måde: Antag, at en besætning på 22 mand sidder på plads på tofterne. Såfremt yderligere en mand træder op på den ene ræling, vil båden krænge så meget, at den netop begynder at tage vand ind.

Det bliver interessant at sammenligne de udførte beregninger med de krængningsforsøg, som skal gennemføres med båden, når den er færdig.

Hydrodynamisk analyse.

Karakteristiske koefficienter.

Med henblik på at sammenligne forskellige typer af skibe og både kan man udregne nogle koefficienter, som beskriver karakteristiske egenskaber af det pågældende fartøj. Koefficienterne er vist i nedenstående tabel 1. Nogle af størrelserne afhænger af dybgangen og er beregnet for værdierne 0,2 og 0,3 m.

Såfremt man kun betragter Hjortspringbåden, kan man ikke drage nogen oplysninger ud fra disse tal. Men hvis man kender tilsvarende koefficienter for andre fartøjer, kan man foretage sammenligninger. Det falder uden for rammerne af nærværende skrift at give en definition af de enkelte koefficienter. I stedet henvises til Rawson og Tupper (1976, vol. 1, 12) og (vol. 2, 383) samt McGrail (1978, 136).

Tre af koefficienterne i tabel 1. benyttes i næste afsnit til beregning af residualmodstanden. Disse størrelser er fremhævet med fed skrift. Til beregningerne er der benyttet den største bredde i vandlinien.

Koefficient	Dybgang 0,3 m	Dybgang 0,2 m
Længde-bredde koef	10,0	10,8
Længde-dybgang -	47	66
Bredde-dybgang -	4,7	6,1
Vandliniens finheds -	0,6	0,61
Midtskibs areal -	0,75	0,75
Blokkoeff.	0,41	0,43
Prismatisk koef.	0,55	0,58
Vertikal prismatisk -	0,69	0,70
Besætningskoef.	14,7	
Koeff. for aktive padlere	13,3	
Konstanter:		
Længde konstant	10,5	11,8
Breddekonstant	1,05	1,10
Dybgangskonstant	0,22	0,18
Våd overfladekonstant	8,1	9,3
Midtskibs arealkonst.	0,172	0,147

Tabel 1. Koefficienter og konstanter.

Fremdrivningsmodstand og effektbehov.

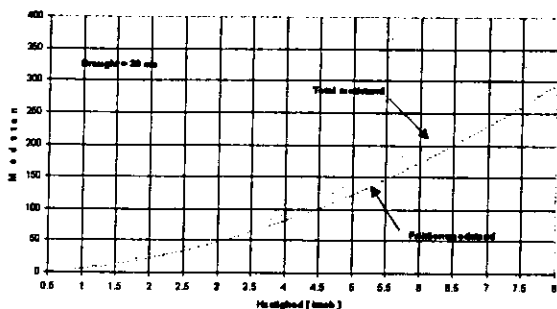
Ved fremdrivningsmodstanden forstår man den kraft, som kræves for at drive båden frem gennem vandet. Den afhænger af hastigheden og kan beregnes ud fra kendskab til limietegningerne og de deraf udledte koefficienter. Man deler normalt den samlede modstand op i to dele.

Ved **Friktionsmodstanden** forstår man den kraft, som kræves for at bevæge en plan plade med samme hastighed som båden. Pladen skal have samme længde som bådens vandlinie, og dens areal skal være lig fartøjets våde overflade. **Residualmodstanden** skyldes bådens bov- og hæk-bølge samt afløsning af grænselag.

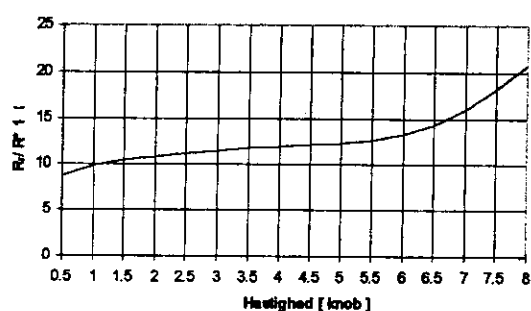
De to bidrag til modstanden er beregnet for båden med en last på 2000 kg svarende til et displacement på 2,5 m³ og

en dybgang på 0,3 m. Grundlaget for beregningerne er beskrevet af Gertler (1954).

Nedenstående figur 8 viser friktionsmodstanden og den totale modstand som funktion af hastigheden.



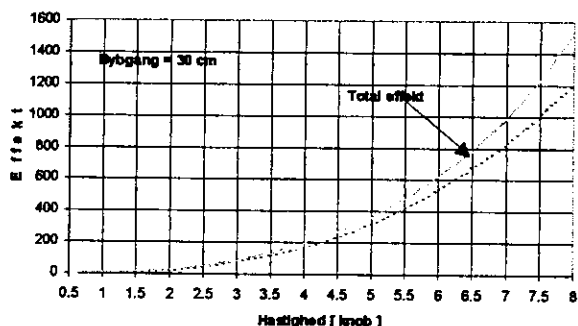
Figur 8. Fremdrivningsmodstand.



Figur 9. Residualmodstand i % af totalmodstand.

Figur 9 viser et karakteristisk træk ved Hjortspringbåden. Idet der er tale om en meget slank båd med en lang vandlinie, er residualmodstanden lille i forhold til den totale modstand. Man ser, at den del af modstanden, som går til bølgedannelse og afløsning af grænselag kun udgør 20% af den samlede modstand ved en fart på 8 knob. Friktionsmodstanden er således dominerende, og det er derfor vigtigt med en glat bund for at opnå en stor fart. Fundets rester af animalsk fedt og linolie kan ses i denne sammenhæng.

Den nyttiggjorte effekt til fremdrift findes ved at multiplicere modstanden med hastigheden. Den er vist som funktion af hastigheden i figur 10



Figur 10. Nyttiggjort effekt til fremdrift (ved displacement $2,5 \text{ m}^3$)

Ved differentiation af effekten med hensyn til displacementet finder man, at hvis man øger displacementet med 4% (reg-

net ud fra $2,5 \text{ m}^3$) skal effekten kun øges med 1,8% for at holde den samme fart (gældende for 8

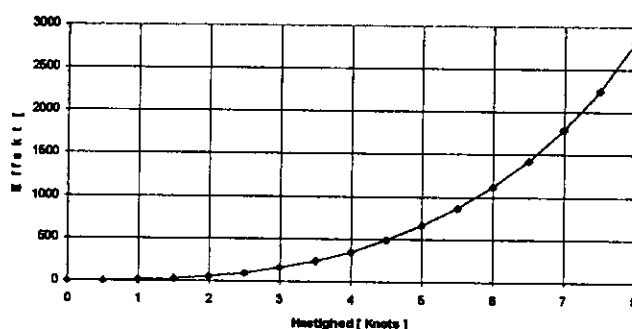
knob). Bådens skipper kan udnytte dette til at medføre nogle hundrede kg ballast for at øge bådens stabilitet ved passage af en åben havstrækning. Det medfører således kun en beskedne reduktion af farten.

Padlernes effektivitet.

I Hjortspringfundet var der 15 padler med noget forskellig udformning. Et fællestræk er dog, at de alle har lange og smalle blade. Fra fund af stammebåde i Danmark kendes padler med brede blade, og man vil umiddelbart anse sådanne padler for mere effektive. Coates (1991) angiver, at smalle padler og årer kun er fordelagtige i høj sø. Hjortspringbåden er imidlertid ikke egnet til sejlads over åbent hav, og det er derfor ikke indlysende, hvorfor vore forfædre har valgt at benytte så smalle padler. Det blev derfor besluttet at underkaste padlefunktionen en nærmere analyse.

Undersøgelserne viser, at den hydrodynamiske virkningsgrad for padlerne øges, desto større padlernes areal er. Padleprocessen er imidlertid intermitterent, idet besætningsmedlemmerne for hvert tag skal løfte padlerne op af vandet. Hertil kræves et arbejde, som ikke genvindes, når padlen senere sænkes ned igen. For at minimere dette arbejde skal padlen være så let som muligt. I en optimering af padlerne indgår der også en række fysiologiske aspekter, ligesom bådens hastighed er af betydning.

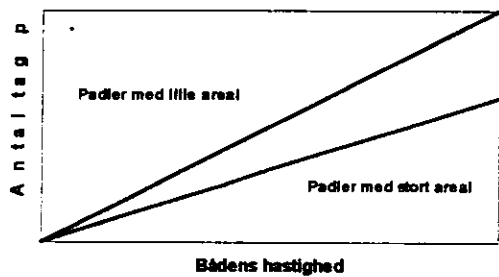
Der er opstillet en simpel matematisk model, hvormed man kan beregne den hydrodynamiske virkningsgrad af padleprocessen samt padlernes slip i forhold til det forbi-strømmende vand. Det skønnes, at padlerne er neddyppede i halvdelen af den tid, som medgår til et tag. Herved kan man beregne den effekt, som svarer til akselhestekraften for et maskindrevet skib. Denne effekt er vist i figur 11, og man ser, at den er næsten dobbelt så stor som den nyttiggjorte effekt i figur 10.



Figur 11. "Akselhestekraft" som funktion af hastigheden.

Padlekadencen (Antal tag per tidsenhed) afhænger ved en given hastighed af padlernes areal. Sammenhængen er vist i figur 12, hvor man ser, at kadencen skal øges, når padlernes areal bliver mindre. Der er ingen talværdier på

akserne, fordi nogle af de koefficienter, som indgår i beregningerne, endnu ikke kendes.



Figur 12. Padlekadancen som funktion af bådens hastighed.

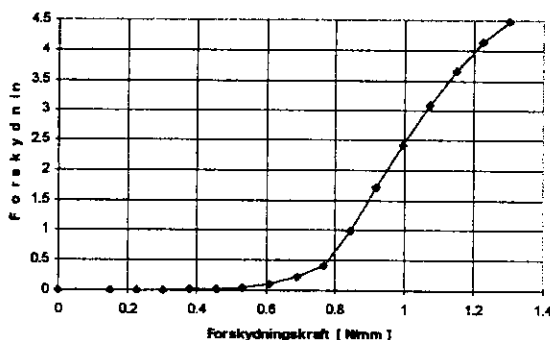
Padlefunktionen skal undersøges nærmere ved den praktiske afprøvning af båden.

Spændingsanalyse.

Syningernes forskydningsstyrke.

Syningernes styrke er i høj grad afgørende for bådens egenskaber. Coates (1985) har beskrevet sammenføjning af planker ved syning. Stingene betragtes som fjedre, som presser bordene mod hinanden. Når disse påvirkes af en forskydningskraft, som ikke er alt for stor, forhindrer friktionen at bordene forskyder sig i forhold til hinanden. Friktionskoefficienten for træ mod træ i våd tilstand er 0,65 ifølge Coates (1985).

Lauget har udført et eksperiment med to 600 mm lange planker, der er syet sammen på samme måde, som det kendes fra Hjortspringbåden. Alle forhold så som geometri, syningernes opstramning, knuderne og tætningsmaterialet var i nøje overensstemmelse med hvad, der kendes fra båden. Plankerne blev påvirket til forskydning, idet der blev påført en variabel kraft i sømmens retning. Samtidig blev den relative forskydning mellem de to planker målt. Resultatet er vist i figur 13.



Figur 13. Forskydning som funktion af forskydningskraft for en syning.

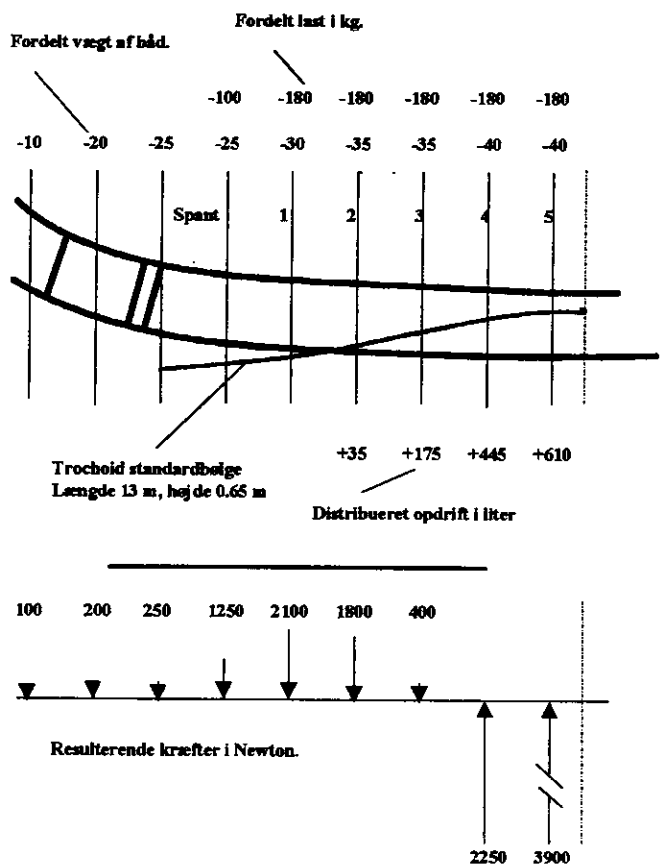
Man ser, at plankerne ikke bevæger sig i forhold til hinanden før forskydningskraften bliver større end 0,5 N/mm (Kraft per mm i syningens retning). Når forskydningskraften bliver større end denne værdi, begynder plankerne at bevæge

sig i forhold til hinanden med en lav hastighed. Denne bevægelse ophører i løbet af 20 - 30 sekunder, hvilket indikerer, at friktionen er af viskos natur. Når kraften aflastes, bevæger plankerne sig ikke tilbage til udgangspositionen. Dette er en vigtig iagttagelse, idet det betyder, at syningerne ikke kan tåle at blive udsat for alternerende forskydningskræfter, som er større end 0,5 N/mm. En overskridelse af denne værdi vil forårsage lækage og slid på syningerne.

Båden betraget som en bjælke.

Det første skridt består i at beregne de kræfter, som påvirker båden. Idet den betragtes som en bjælke, kan man opdele kræfterne i tre bidrag. Fartøjets egenvægt og vægten af lasten (besætning med udstyr) virker nedad, medens opdriften virker opad. De tre kræfter skal være i ligevægt. Da bådens egenvægt kun udgør 20% af det fuldt udrustede fartøj, kan denne del af belastningen med tilstrækkelig nøjagtighed erstattes af en række enkeltkræfter. Lastens vægt er ligeledes medtaget i form af en række enkeltkræfter. Alle kræfter påføres ved spanterne, som er placeret med 1 meters afstand. Af symmetri Grunde medtages kun den ene halvdel af båden i beregningerne. Opdriftkræfterne beregnes dels i tilfælde af, at båden sejler i stille vand, dels at den sejler i bølger.

Vægte og belastninger i kg, opdrift i liter.

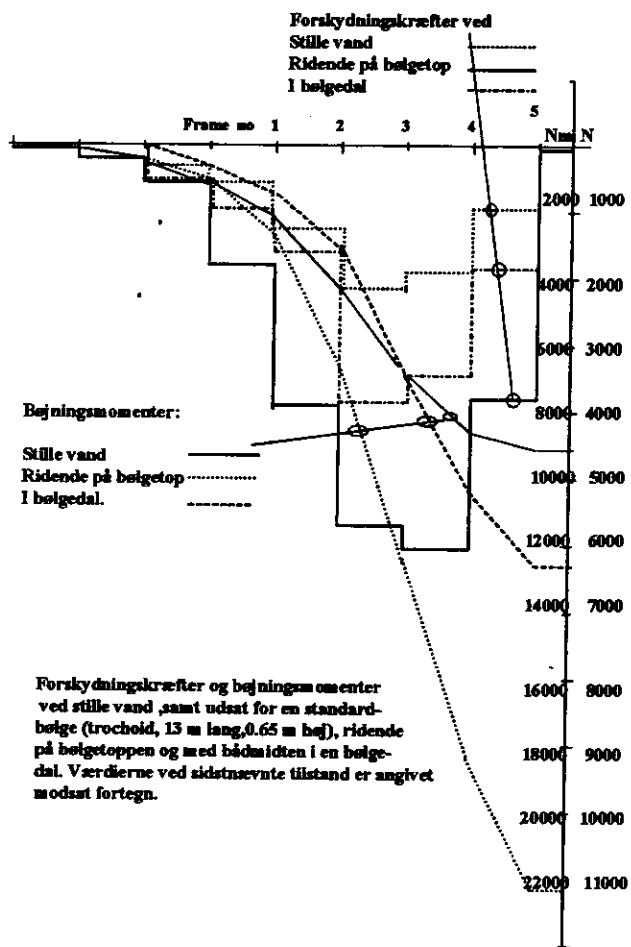


Figur 14. Ydre kræfter på skibsskroget.

Det er almindelig praksis at beregne opdriftskræfterne, når båden befinder sig i bølger med en længde, som er lig med vandlinielængden og som har en højde på 5% af denne længde (Rawson og Tupper, vol I, 179). Eksistensen af sådanne bølger forudsætter en vanddybde, som mere end den halve bølgelængde (6,5 m).

Beregningerne er gennemført dels for båden ridende på en enkelt bølge midtskibs, dels når den bæres af en bølge i hver ende. Desuden er der foretaget beregninger for stille vand. I figur 14 er kræfterne vist, når båden bæres af en bølge midtskibs.

Når kræfterne er bestemt, kan man tegne kurver for forskydningskræfter og bøjende momenter. Kurverne for de tre belastningstilfælde er indtegnet i nedenstående figur 15. Når båden bæres mellem to bølger, er fortegnene modsat det viste.



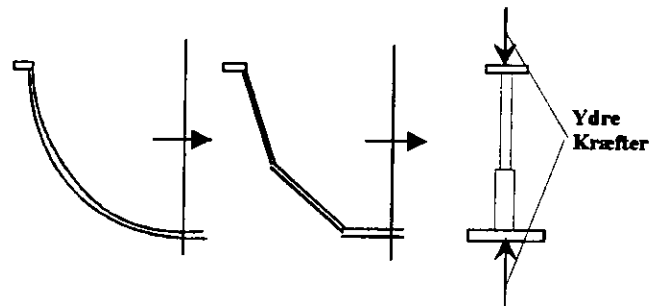
Figur 15. Indre kræfter i skroget.

Med henblik på at forenkle beregningerne er bådens tværsnit forenklet som vist i figur 16. I-bjælken, som er vist til venstre, har samme inertimoment som båden, og kræfterne påføres i centerlinien.

Figur 16. Strukturmodel.

Selv om forenklingerne synes ret grove, giver beregningerne nogenlunde nøjagtige resultater. Det skyldes, at båden er meget slank, og dens tværsnit ændrer sig derfor ikke ret meget fra midtskibs og 3,5 m ud mod enderne. Der er derfor ingen skaleffekt at tage hensyn til.

Den største usikkerhed ved beregningerne skyldes, at der ikke er taget hensyn til den 'elasticitet', som syningerne medfører. Skrogets deformationer vil derfor blive større end de beregnede værdier, som gengives nedenstående. Opdriftskræfterne er en fordelt belastning, men de er som



omtalt erstattet af enkeltkræfter, og dette medfører også en usikkerhed af beregningerne.

Det har endnu ikke været muligt at gennemføre finite element beregninger, men forhåbentligt bliver det muligt på et senere tidspunkt

Beregningresultaterne er vist i nedenstående tabel 2.

Tilfælde nr.	1	2	3	4
$\sigma_{\max, \text{reling}}$	3,5	-1,9	5,4	1,4
$\sigma_{\max, \text{køl}}$	-1,8	1,0	-2,8	-0,8
τ_{\max}	5,2	-3,4	8,6	1,9
u_{\max}	-19	11	-30	-9

Tabel 2. Spændinger og deformationer.

σ betegner spændingerne i N/mm^2 , τ er forskydningskraften i den nederste syning i N per mm længde af syningen, mens u angiver stævnens lodrette forskydning i forhold til midtskibs, målt i mm. Negativt fortegn betyder trykspænding eller at stævnen er deformeret nedad.

Tilfælde nr. 1 betyder, at båden rider på en bølge midtskibs, mens 2 angiver, at den bæres mellem to bølger. Tilfælde 3 er differencen mellem dem, og 4 er gældende for roligt vand.

Vurdering af resultaterne fra spændings- og deformationsanalysen.

De beregnede tryk- og trækspændinger skal sammenlignes med brudspændingen for lindetræ, som ifølge mellemsmappen, sektion 3 er 85 N/mm^2 . Man ser, at de beregnede værdier er langt lavere end denne værdi.

Derimod er forskydningskræfterne i den nederste syning særdeles store, når båden udsættes for høj sø. Forskydningskræfterne skifter retning, hver gang en sø passerer. Herved vil tætningsmaterialet slides, og båden vil blive læk. Det er derfor ikke tilrådeligt at sejle i åbent farvand, når der er sø med en bølgehøjde, som er større end 0,65 m. I så tilfælde vil stævnene bevæge sig 30 mm op og ned i forhold til midtskibs. Når bølgelængden er kortere som det er tilfældet i nærheden af kysten, kan man benytte beregningresultaterne for stille vand, hvilket viser, at påvirkningerne er betydeligt mere acceptable.

Konklusion.

Den beskrevne analyse viser, at båden er uegnet til sejlads over åbne farvande, men derimod velegnet til kyst- og flodtrafik. Hvis man undlader at placere besætningen ved stævne og tofterne 1 og 10, vil bølgerens indflydelse på spændinger og deformationer blive væsentligt reduceret. Ballast placeret mellem tofterne 4 og 7 vil have en gavnlig indflydelse, idet det både forøger stabiliteten og reducerer spændingerne.

Båden har et stort fartpotentiale, idet fremdrivningsmodstanden er lille. Det er stadig uafklaret, hvorfor den er udrustet med smalle padler. Egenvægten er lille, og båden kan derfor let tages på land af besætningen og endda bæres over land.

De mange forhold, som er beskrevet ovenstående, skal yderligere behandles ved de sejladsprøver, som båden skal underkastes, når den er færdig. De gennemførte analyser er væsentlige for planlægningen af disse undersøgelser.

Referencer.

Hjortspringbådens Laug, Medlemsmappen
(<http://home6.inet.tele.dk/hjortspr>)

Rawson,K.J, og Tupper,E. C.1976,*Basic Ship Theory*.
Volume I og II. Longman 1976

Gertler, M. *A Reanalysis of the Original Test Data for the Taylor Standard Series*. Navy Department, the David W. Taylor Model Basin, Report 806, Washington D. C.

McGrail, Sean, 1978, *Logboats of England and Wales*.
BAR, British Series 51 (i),

Rosenberg, G., 1937, *Hjortspringfundet*, Det Kongelige Nordiske Oldtidsskriftselskab, Gyldendal.

Valbjørn, K. V. et al, *Rekonstruktion of the Hjortspringboat - Philosophy, Execution and initial Results*, ISBSA 8, Gdansk 1997.

Coates, John, , *Power and Speed of Ored Ships*, ISBSA 6, Roskilde 1991

Coates, John, 1985, *Sewn Plank Boats* BAR Int Series 276.