

SKIBSMODSTAND – fra modelforsøg til fuldskala

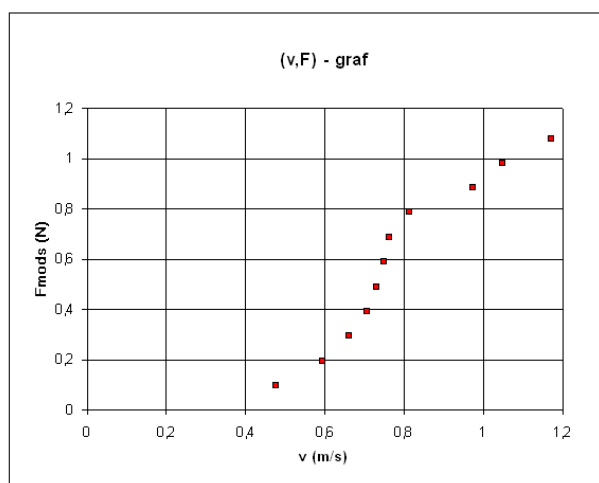
Ole Trinhammer,
DTU-Fysik og Rungsted Gymnasium

Denne note omhandler databehandling af målinger på skibsmodstand. Figur 1 viser en mulig opstilling. På figur 2 ses et nærbillede, der viser bølgemønstret bag skibet. Dette bølgemønster går tabt, hvis forsøget udføres i en tagrende. Figur 3 viser et eksempel på målinger. Man ser tydeligt, at der ikke er tale om en ren potenssammenhæng. Bulen opad på kurven optræder, hvor bølgemønstret er særlig stort, svarende til konstruktiv *interferens* mellem bølger fra skibets for- og bagende. Sådanne interferenser søger man at undgå ved at påsætte en *bulb* i skibets forende og i øvrigt indrette skibets længde, så det befinder sig i en nedadbuende del på kurven, når det sejler med sin marchhastighed. Dvs. destruktiv interferens og dermed så svagt bølgemønster som muligt.



Figur 1. Skibet trækkes vandret af en tråd gennem en trisse op til en anden trisse hvorover tråden fører til et faldende lod. Tophastigheden bestemmes ved hjælp af en tænketrisse (Smart Pulley). Vandkarret står på et bord og er fremstillet af spånplade og en havepressenning. Man måler tophastigheden ved belastning med forskellige lodder. Kamilla, Karen, Camilla og Line 2.g.

Figur 2. Bemærk bølgemønstret omkring skibet. Det bidrager til skibsmodstanden sammen med gnidningsmodstanden nede i vandet.



Figur 3. Målinger af skibsmodstand som funktion af hastighed for LEGO-båd. Bemærk bulen opad cirka midt på kurven. Her er modstanden særlig stor i forhold til hastigheden, fordi bølgemønstret har særlig stor amplitude som følge af konstruktiv interferens.

Modstandens bestanddele

Skibsmodstanden består stort set af 2 nogenlunde lige store dele, nemlig bølgemodstanden og gnidningsmodstanden. Bølgemodstanden skyldes de bølger, skibet danner, når det skubber til vandet på sin vej gennem det. Gnidningsmodstanden skyldes vandets viskositet. De viskøse bidrag kan beregnes, men bølgemodstanden kan ikke. Til gengæld kan bølgemodstanden findes ved modelforsøg og så skaleres op til fuldskala.

Forudsætningen for at resultaterne for bølgemodstanden kan overføres fra model til fuldskala, er, at modellen er geometrisk ligedannet med fuldskalaskibet. Dermed vil bølgemodstand og tyngdekræfter skalere med de geometriske dimensioner. Det kaldes Froude-skalering (udtales fruid) og optræder, når Froudes tal er ens for model og fuldskala

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (1)$$

Her er v er skibets hastighed, g er tyngdefeltstyrken og l er længden af skibet. Man ser, at hvis længden skaleres op med en faktor 100, skal hastigheden skaleres op med en faktor 10 for at Fr holdes konstant.

Alle modstandskræfter F udtrykkes ved samme form for udtryk ved at definere *modstandsfaktorer* c

$$F = c \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 A, \quad (2)$$

hvor ρ (rho) er vandets massefylde og A er arealet af skibets våde overflade (den del, der er under vand, når skibet flyder i ro). Modstandsfaktoren kaldes også *modstandskoefficienten* eller *formfaktoren*. Man finder dermed modstandsfaktoren for den *totale modstand*

$$c_{\text{total}} = \frac{F_{\text{modstand}}}{\frac{1}{2} \rho v^2 A}. \quad (3)$$

Modstandsfaktoren for de viskøse kræfter afhænger af Reynolds tal

$$Re = \frac{v d \rho}{\eta}. \quad (4)$$

Her er d længden af skibets vandlinie, dvs. vandlinien målt på skroget fra for til agter og η (eta) er vandets viskositet. Man ser, at hvis Fr holdes konstant, vil Re ikke være konstant. (Hvis d vokser med en faktor 100 skulle v vokse med en faktor 10 for at holde Fr konstant, men dermed vil Re vokse med en faktor 1000). Det betyder, at de viskøse kræfter ikke skaleres fra model til fuldskala. Men det gør ikke noget, for det viskøse bidrag kan nemlig beregnes. Man har fundet, at modstandsfaktoren for de viskøse kræfter følger formlen

$$c_{\text{visk}} = \frac{0,075}{(\log(Re) - 2)^2}. \quad (5)$$

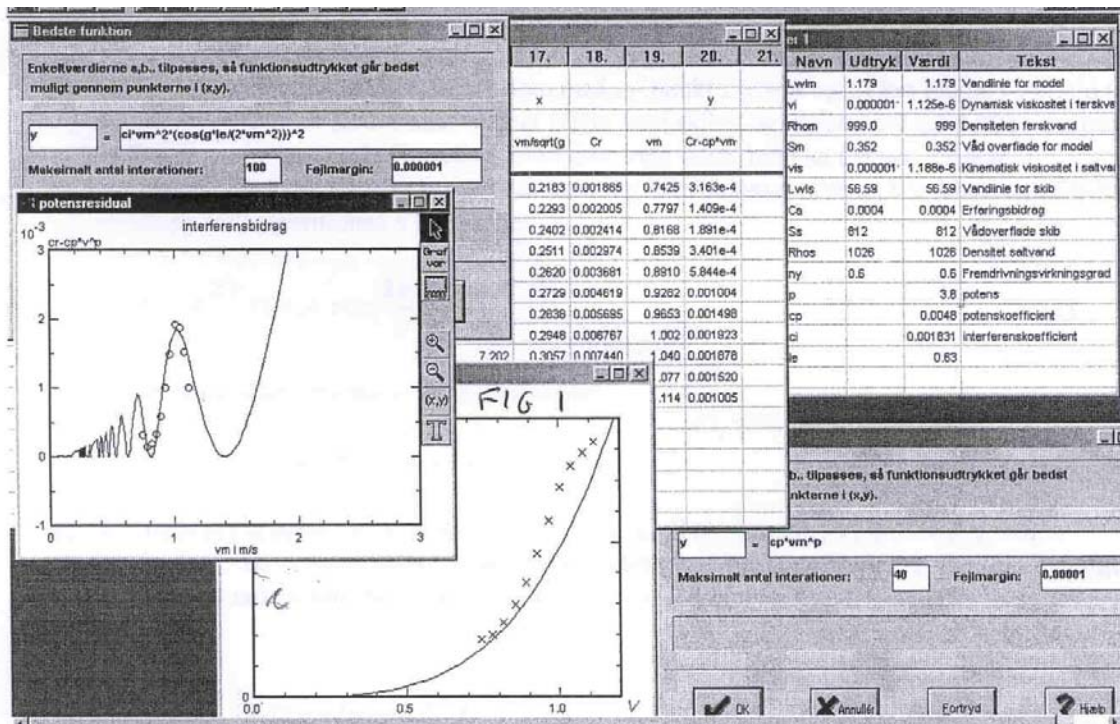
Fra modelforsøg til fuldskala

Vi er nu i stand til at overføre målingerne på model til fuldskala. Proceduren er følgende: Først bestemmes den totale modstandsfaktor for modellen ved hver af de målte hastigheder, så beregnes den viskøse modstandsfaktor for samme hastigheder. Herefter findes forskellen, som beskriver *restmodstanden* (bølgemodstand og eventuelt andet). På grund af Froude-skalering kan restmodstanden overføres til fuldskala. Den viskøse modstandsfaktor i fuldskala beregnes nu ud fra det tilhørende Reynoldstal, så man kan finde totalmodstandsfaktoren som summen af restmodstandsfaktor (bølgemodstand) og viskøs modstandsfaktor. Skematisk kan proceduren stilles op, så man ender med at vurdere den nødvendige motoreffekt for en ønsket marchhastighed på fuldskalaskibet, nemlig således

- a. Beregn $c_{total,model}$.
- b. Beregn $c_{visk,model}$.
- c. Beregn $c_{rest,model} = c_{total,model} - c_{visk,model}$.
- d. Vælg skalafaktor, f.eks. 100, så $v_{fuldskala} = 10 v_{model}$ ved $l_{fuldskala} = 100 l_{model}$.
- e. Når $Fr_{fuldskala} = Fr_{model}$, har vi $c_{rest,fuldskala} = c_{rest,model}$.
- f. Beregn $c_{visk,fuldskala}$. (Der tillægges et erfaringsbidrag på 0,0004 for små både - mindre end 100m vandlinielængde)
- g. Beregn $c_{total,fuldskala} = c_{rest,fuldskala} + c_{visk,fuldskala}$.
- h. Beregn endelig skibsmodstanden F_{total} for hver hastighed. Tegn graf.
- j. Aflæs en passende marchhastighed for fuldskalaskibet.
- k. Beregn slæbeeffekten $F_{total} \cdot v$ for fuldskalaskibet.
- m. Motoreffekten (akseffekten) kan nu findes idet slæbeeffekten typisk er 60 % af akseffekten.

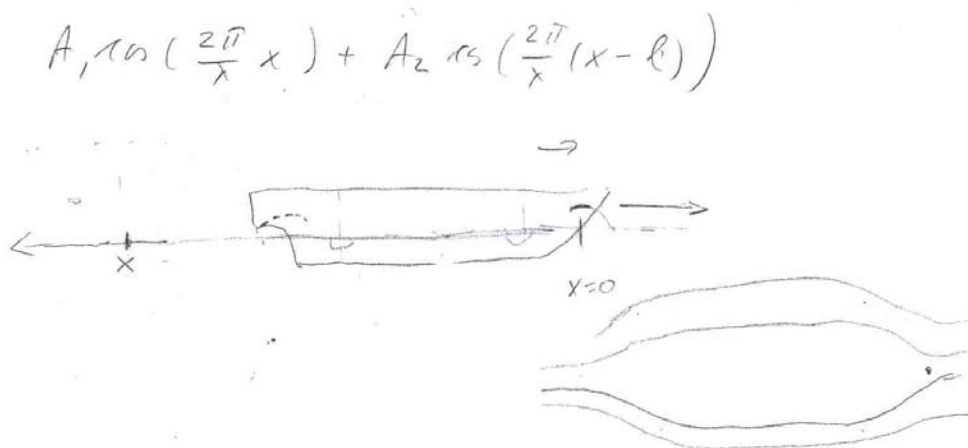
Interferensdelen af bølgemodstanden.

Databehandlingen kan videreføres med en fitning, der påviser interferensdelen i bølgemodstandskoefficienten c_{rest} . Her skal en simpel model antydes. For en detaljeret gennemgang af fitningen henvises til noten i litteraturlisten.



Figur 4. Skærmdump af fitting af restmodstandskoefficienten, dvs. bølgemodstanden, i FPro

Man bemærker i figur 4, "FIG 1", at restmodstanden ikke følger en simpel potensafhængighed, men varierer i forhold til en sådan. Vi skal her se på, hvordan man kan modellere sig frem til at forstå det "bulede" forløb som et resultat af interferens mellem bølger fra skibets for og agter, se figur 5. Ved forskellige hastigheder kan optræde henholdsvis destruktiv og konstruktiv interferens. Man ønsker destruktiv interferens, da bølgerne her delvist udslukker hinanden, så bølgemodstanden dermed bliver forholdsvis lille ved den pågældende hastighed.



Figur 5. Skitse af skib med bølgedannelse for $(x = 0)$ og agter $(x = l)$.

Litteraturliste:

Torben Amtrup, Arne Johansen og Ole Trinhammer: Vand – under overfladen. Gyldendal 1995.
Heri gennemgås skaleringslove for Froude-skalering og Reynolds-skalering. Ovenstående procedure svarer til opgave 26 side 33, hvor der også tages højde for skalering af massefylde og viskositet. Tak til Christian Aage, Institut for Skibs- og Havteknik, DTU for vejledning

En opstilling til måling af skibsmodstand er beskrevet i en artikel ”Skibsmodstand går ikke som hastighedskvadrat” i LMFK-bladet nr 9, november 1997, og er tilgængelig på nettet på adressen <http://www.datalyse.dk/carl/skibsmod.htm>

Noten ”Fitning af restmodstand på skibe” (april 2000 Rungsted Gymnasium) er tilgængelig på adressen <https://wiki.fysik.dtu.dk/nanotekar/Skibsmodstand?action=AttachFile&do=get&target=SkibsmodstandFitning.pdf>